

Kostengünstige Disposition von Telebussen

Diplomarbeit von
Fridolin Klostermeier¹ und Christian Küttner²

Betreuer:
Prof. Dr. Martin Grötschel
Vizepräsident des Konrad-Zuse-Zentrums
für Informationstechnik (ZIB)
Heilbronner Str. 10
10711 Berlin

¹Weisestr. 7, 12049 Berlin. Tel. 030/621 55 46

²Katzlerstr. 9, 10829 Berlin. Tel. 030/215 46 15

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	5
Der Telebus-Service und seine gegenwärtigen Kosten	5
Das Telebus-Projekt am ZIB	5
Operations Research	5
Mathematische Optimierung	6
Informatik	6
Inhalt der Diplomarbeit	7
Ein Tourenplangenerator mit Steuerung	7
Ein Konzept zur Serviceverbesserung bei gleichzeitiger Kostensenkung	8
Aufbau der Diplomarbeit	9
1 Der Betriebsablauf der Disposition: Heute und Morgen	11
2 Telebus-Disposition als mathematisches Problem	22
2.1 Das Telebus-Dispositionproblem	22
2.2 Mathematische Einordnung des Dispositionsproblems	23
2.3 Komplexität des Dispositionsproblems	25
2.4 Modelle und Lösungsansätze	25
2.5 Bisherige Lösungen für Behindertenfahrdienste	29
2.6 Gründe für die Wahl des Set-Partitioning-Modells	30
2.7 Anforderungen an den Spaltengenerator	31
3 Rechnergestütztes Disponieren	33
3.1 Anforderungen an die Disposition	33
3.2 Systementwurf	35
4 Der Programmmentwurf und sein Fundament	39
4.1 Die Schnittstelle zu den Eingabe-Daten	40
4.1.1 Die Fahrtwunschdaten	40
4.1.2 Der Stadtplan	49

4.1.3	Die Fahrzeugdaten	54
4.2	Die beiden grundlegenden Datenmodelle und ihre Implementierung	59
4.2.1	Das Modell für das Disponieren	59
4.2.2	Implementierung des Datentyps Dispo-Graph	63
4.2.3	Das Modell für den Tourenplan	67
4.2.4	Implementierung des Datentyps B-Plot	67
4.3	Das Steuerpult für die Disposition	70
4.4	Die Maßeinheiten	71
4.4.1	Zeiten	71
4.4.2	Orte	71
4.4.3	Kapazitäten	72
4.4.4	Kosten	72
5	Das Fahrtwunschverknüpfungsprogramm	74
5.1	Einzelbestellungen	74
5.1.1	Bestellungsdaten mit Zeitvarianz	74
5.1.2	Statistiken	78
5.2	Sammelfahrten	80
5.2.1	Definition	80
5.2.2	Problemanalyse	80
5.2.3	Heuristiken	82
5.2.4	Implementierung	90
5.2.5	Strategien	91
5.2.6	Handvorgabe-Sammelfahrten	93
5.2.7	Statistiken	94
5.3	Ein- und Anbindungen	99
5.3.1	Definition	99
5.3.2	Anschluß finden	100
5.3.3	Abschlüsse finden	101
5.3.4	Zulässige und vertretbare Bindungen	103
5.3.5	Das Optimierungsproblem	105

5.3.6	Heuristiken	106
5.3.7	Implementierung	108
5.3.8	Strategien	109
5.3.9	Handvorgabe-Ein-/Anbindungen	110
5.3.10	Statistiken	110
5.4	Ergebnisse von Verknüpfungsvarianten	115
6	Das Tourenplanprogramm	122
6.1	Graph der Möglichkeiten	122
6.1.1	Die Verbindungskanten	122
6.1.2	Kriterium für das Legen einer Kante	122
6.1.3	Die Ordnung der Kanten	124
6.2	Tourenplan	125
6.2.1	Zwei Verfahren	125
6.2.2	Der Algorithmus	128
6.2.3	Parametergesteuerte Heuristiken	129
6.2.4	Strategien	134
6.2.5	Kosten	136
7	Das Fahrzeugzuteilungsprogramm	137
7.1	Die Fahrzeugzuteilung im Modell	137
7.2	Der Assignment-Algorithmus	138
7.3	Die Tour-Fahrzeug-Anpassung	139
7.4	Flexible Busanmietung als Programm	142
7.5	Der Tourenplan wird zum B-Plot	146
8	Umdisposition	148
8.1	Verbesserungsheuristiken	148
8.2	Taxibusse	150

9 Der Tourenplangenerator im Test	152
9.1 Tourenplan-Kosten	155
9.1.1 Beispiel: Donnerstag, 4.2.1993	155
9.1.2 Beispiel: Sonntag, 7.2.1993	162
9.2 B-Plot-Kosten	166
10 Die Unternehmensberatung	170
Zusammenfassung	170
10.1 Kurzfristig verwirklichtbar (Sofortmaßnahmen)	174
10.1.1 Taxidisposition auslagern	174
10.1.2 Busanmietung verändern	175
10.1.3 Verbesserungen in der Telebus-Zentrale	177
10.2 Mittelfristig verwirklichtbar (bis Winter 93/94)	178
10.2.1 EDV-Einsatz in der Zentrale vereinheitlichen	178
10.2.2 Rechnergestützt disponieren	179
10.2.3 Busanmietung flexibilisieren	180
10.2.4 Taxi-Mischsystem verbessern	182
10.2.5 „Taxibusse“ als Puffer für Spontanbuchungen und Umdispositionen	183
10.3 Langfristig verwirklichtbar (bis Winter 1994/95)	185
10.3.1 Fahrtwunschannahme verbessern	185
10.3.2 Neue Fahrbetrieb-Abteilung bilden	187
10.3.3 Rechnergestützt umdisponieren	189
10.3.4 Rechnergestützt abrechnen	189
10.3.5 Zivildienstleistende als Fahrer bei den karitativen Fahrdiensten	190
11 Adieu, Dinosaurier oder: Wie rationalisiert man im öffentlichen Dienst?	192
Literaturverzeichnis	197
Anhang A	199
Behinderten-Fahrdienst Wien	199
Der Telebus-Service in der Presse	203

Einleitung

Der Telebus-Service und seine gegenwärtigen Kosten

„Telebus“ ist der soziale Behindertenfahrdienst im Land Berlin. In der Telebus-Zentrale (Berliner Zentralausschuß für soziale Aufgaben e.V.) werden die Anrufe der Telebus-Benutzer entgegengenommen. Sie bestellen dort einen Spezialbus (Telebus) oder ein Taxi (Tele-taxi) und werden von ihrer Wohnung zu jedem beliebigen Ziel innerhalb Berlins oder im Umland und auch wieder zurück gefahren. Falls nötig, leisten die Fahrer Treppen- oder Gehhilfe. Der Telebus-Service ist für die Behinderten umsonst und wird an allen sieben Tagen der Woche von 5 Uhr morgens bis 1 Uhr nachts angeboten.

Der Telebus-Jahresetat beläuft sich zur Zeit (1993) auf 33 Millionen DM, wobei die Telebus-Zentrale etwa 3 Millionen DM und der Fahrdienst etwa 18 Millionen DM jährlich kosten. Der Fahrdienst setzt sich aus Bussen und Taxen gewerblicher Busunternehmen und Bussen karitativer Verbände (Rotes Kreuz, Lazarus-Hilfswerk, Arbeiterwohlfahrt und Caritas) zusammen. Der Rest des Betrages (12 Millionen DM) wird für das sogenannte Taxi-Mischsystem benötigt: Jeder Berechtigte hat zur Zeit Anspruch auf die Erstattung von Kosten privater Taxifahrten bis zu einer Summe von 300 DM monatlich.

Das Telebus-Projekt am ZIB

Das Telebus-Forschungsprojekt des Konrad-Zuse-Zentrums für Informationstechnik (ZIB) hat das Ziel, den Fahrdienst (insbesondere die Disposition der Telebusse) zu verbessern, d.h. kundenfreundlicher zu gestalten und gleichzeitig billiger zu machen.

Die Disposition ist das Herzstück der Arbeit in der Telebus-Zentrale. Disposition heißt, die telefonisch eingegangenen Fahrtwünsche (etwa 1.000 am Tag), so auf die Spezialbusse und die Taxen zu verteilen, daß „gute“ Touren entstehen und möglichst wenige Fahrzeuge gebraucht werden.

Die Disposition von Telebussen ist ein Beispiel für ein sehr schwieriges Planungsproblem. Das ZIB versucht, solche schwierigen Probleme mit Hilfe von Methoden des *Operations Research* und durch den Einsatz von Verfahren der *mathematischen Optimierung* und der *Informatik* zu lösen.

Operations Research

Operations Research bedeutet, ökonomische Planungsprobleme zu formalisieren, um sie mit Hilfe von mathematischen Verfahren zu lösen. Um das Telebus-Dispositionproblem

mathematisch betrachten zu können, muß es erst einmal verstanden werden. Dabei fällt als erstes auf, daß die Disposition zwar im Zentrum der Arbeit in der Telebus-Zentrale steht; sie steht aber nicht für sich alleine. Es werden die Vorarbeiten der Busanmietung und der Fahrtwunschannahme geleistet. Am Tag selbst werden täglich 20 Stunden lang in der Funkzentrale die Fahrten betreut und überwacht. Nachträglich müssen die den Fahrbetrieben entstandenen Kosten abgerechnet werden. Eine Computerlösung, die sich auf die reine Disposition beschränkte, ohne den Rahmen zu verändern, in die sie eingebettet ist, erreichte nicht die gewünschte Verbesserung.

Wir haben deshalb den gesamten Arbeitsablauf *um die Disposition herum* untersucht, das Benutzerverhalten und die Busanmietungsstrategie analysiert, Statistiken aufgestellt und ausgewertet. Dabei wurde einerseits deutlich, daß die alleinige Installierung eines Computerprogramms zur Disposition die Probleme dieses Betriebs nicht löst; andererseits ergaben sich bei der Arbeit viele Erkenntnisse, die neben der Einsparung durch eine verbesserte Disposition zu weiteren Kostensenkungen oder Leistungssteigerungen im Behindertenfahrdienst führen werden. Dieser Teil der Arbeit wurde bereits im März 1993 als technischer Bericht des ZIB (Borndörfer, Grötschel, Klostermeier und Küttner[1993]) veröffentlicht. Seitdem sind bereits einige der von uns vorgeschlagenen Maßnahmen im Telebus-Betrieb verwirklicht worden.

Mathematische Optimierung

Das mathematische Modell, das für die Telebus-Disposition gewählt wurde, beruht auf der Idee, alle zulässigen Tagestouren für die Telebusse zu erzeugen, um danach die beste und kostengünstigste Kombination herauszufinden („Set Partitioning“). Die Idee ist also, *nicht* zu versuchen, beste Touren direkt zu berechnen, sondern die Kapazität der heutigen Computer auszunutzen, um stets tausendmal so viele Touren wie nötig „im Hinterkopf“ zu haben. Set-Partitioning-Modelle in diesen Größenordnungen können bisher noch nicht gelöst werden. Es handelt sich dabei um ein schwieriges Problem der kombinatorischen Optimierung, das weiterer Untersuchungen bedarf, die im Rahmen der Dissertation von Ralf Borndörfer geführt werden.

Informatik

Da die Anzahl aller sinnvollen denkbaren Telebus-Touren ungeheuer groß ist, muß man sich auf eine möglichst gute Auswahl aus dieser Menge beschränken. Diese Aufgabe hat ein der mathematischen Optimierung vorgeschaltetes Computerprogramm („Spaltengenerator“). Dieses Computerprogramm soll aber nicht nur Touren erzeugen, sondern außerdem in der Lage sein, in sehr kurzer Zeit Lösungen (Telebus-Dispositionen) zu produzieren. Diese

sind noch nicht optimal, aber doch schon so gut, daß die Disposition von der bisherigen Handarbeit auf ein rechnergestütztes Arbeiten umgestellt werden kann.

Inhalt der Diplomarbeit

Diese Diplomarbeit soll alle Vorschläge, Ideen, Erkenntnisse und Ergebnisse zusammenfassen, die während der Arbeit an dem Telebus-Projekt entstanden sind. Sie soll als Dokumentation für die von uns geschriebenen Computerprogramme dienen, soll aber auch ein Beispiel dafür geben, wie wir uns eine gute und ausführliche Programmdokumentation vorstellen. Gleichzeitig faßt sie eine Fülle von Erkenntnissen über die Struktur der mit der Telebus-Disposition zusammenhängenden Probleme zusammen. Viele dieser Erkenntnisse und die daraus entstandenen Ideen und Vorschläge beruhen auf der Auswertung der uns von der Telebus-Zentrale zur Verfügung gestellten Daten mit Hilfe des Computers. Die von uns geschriebenen Computerprogramme haben uns vielfältige Modellrechnungen zur Disposition von Telebussen ermöglicht. Daraus ist ein Gesamtkonzept entstanden, um den Telebus-Fahrdienst zu verbessern und ihn kostengünstiger zu betreiben. Diese Diplomarbeit soll das Handbuch sein, das die Veränderungen beim Telebus-Fahrdienst begleiten wird.

Ergebnisse dieser Diplomarbeit sind:

1. Ein Tourenplangenerator für die heuristische Lösung des Telebus-Dispositionproblems, der auch als Spaltengenerator für den Set-Partitioning-Löser verwendet werden kann.
2. Ein Konzept für einen besseren und billigeren Telebus-Betrieb, das Veränderungen auf vielen Ebenen vorschlägt und sie in einen zeitlichen Ablauf einordnet.

1. Ein Tourenplangenerator mit Steuerung

Die Hauptarbeit des Projekts ist die tatsächliche Herstellung der Dispositions-Software und die ausführliche Dokumentation der Entwurfsentscheidungen, der Programmentwicklung und der gewählten Implementierung. Es entstand ein Tourenplangenerator, der heuristisch zulässige Dispositionen erzeugt, die zunächst unabhängig von der mathematischen Optimierung als Lösungen in der Telebus-Zentrale benutzt werden sollen. Dieses Programm kann auch als ein Spaltengenerator zur Erzeugung von (Touren-)Spalten als Eingabe für den Set-Partitioning-Löser dienen.

Zwei Aspekte waren bei diesem Computerprogramm wichtig: Erstens sollen die Kundenwünsche durch die Disposition möglichst gut befriedigt werden und erst danach die

benötigten Busse angemietet werden (zur Zeit läuft es andersherum). Zweitens verwenden wir immer den Begriff „rechnergestütztes Disponieren“ um deutlich zu machen, daß der Prozeß des Disponierens nicht *vollständig* an den Computer abgegeben werden soll. Der Disponent muß über die Einstellung einer Vielzahl von Parametern und Handvorgaben die Arbeit des Computers steuern können; er muß die Ergebnisse verändern und verbessern können. Der Computer muß sich dem Menschen anpassen und nicht der Mensch dem Computer.

Somit geht unser Systementwurf von den Menschen aus. Er ist gekennzeichnet durch seinen modularen Aufbau. Damit sind Änderungen und Verbesserungen in jedem einzelnen Arbeitsfeld jederzeit möglich, ohne das ganze System verändern zu müssen. Dieses System ist als Werkzeug und als Werkzeugmaschine konzipiert. Handarbeit ist nicht ausgeschlossen. Im Gegenteil: durch die vielfältigen Interaktionsmöglichkeiten bleibt der Arbeitsablauf dicht an dem des Handbetriebs.

2. Ein Konzept zur Serviceverbesserung bei gleichzeitiger Kostensenkung

Die wesentliche Kostensenkung beim Telebus-Service wird nicht durch den Einsatz von Computerprogrammen in der Zentrale, sondern durch Veränderungen im Umfeld erreicht werden. Deshalb dokumentiert diese Arbeit nicht nur ein Programm, sondern enthält zusätzlich ein Gesamtkonzept, das eine Unternehmensberatung darstellt. Wir schlagen darin vor, die Arbeitsorganisation in der Telebus-Zentrale und die Praxis der Fahrzeuganmietung zu verändern. Dieses Konzept stellt die kaufmännische Seite des Telebus-Projekts dar und ist das Ergebnis der Analyse des Betriebsablaufs in der Telebus-Zentrale und vieler Modellrechnungen, die wir mit Hilfe des von uns entwickelten Dispositionsprogramms aufgestellt haben.

Unserer Ansicht nach ist der gesamte Telebus-Betrieb zu teuer, und er beschäftigt zu viele Mitarbeiter. Wir schlagen vor, lieber weniger, aber qualifizierteres, Personal einzusetzen, das auch flexibel verschiedene Aufgaben im Betrieb wahrnehmen kann. Da es sich bei den täglich rund tausend Fahrtwünschen um große und nur noch schwer überschaubare Datenmengen handelt, sollte die mit der Disposition verbundene Arbeit EDV-unterstützt geleistet werden.

Nach der Umorganisation der Telebus-Zentrale durch die Schaffung einer integrierten Fahrbetrieb-Abteilung greifen Buchung, Disposition und Umdisposition ineinander und sind aufeinander abgestimmt. Die Fahrbetrieb-Abteilung kann nach diesem Entwurf qualifiziert arbeiten und planen. Alle Daten stehen nach ihrem Sinnzusammenhang geordnet in einer Datenbank zur Verfügung. Die Abrechnung ist unkompliziert und konzentriert sich auf die Kontrolle. Die Erstellung von Statistiken wird zur Datenbankrecherche. Die Geschäftsführung erhält die Daten, um die Arbeitsqualität kontrollieren zu können. Sie

kennt die Anforderungen, kann stets bedarfsorientiert agieren und die Zentrale mit Weitsicht leiten.

Die Eckpunkte des Konzepts sind:

- Es erreicht eine Kostensenkung in der Telebus-Zentrale um insgesamt 700.000 DM pro Jahr. Das ist in eine Reduktion der Verwaltungskosten um rund 23 %.
- Im Fahrdienst sind bei Befolgung unserer Vorschläge Einsparungen von mindestens 5 Millionen DM pro Jahr möglich, also eine Kostenreduktion von fast 30 %.
- Dabei wird gleichzeitig der Service für die Behinderten deutlich verbessert.
- Erstmals wird eine Kosten- und Qualitätskontrolle des Telebus-Fahrdienstes möglich.

Aufbau der Diplomarbeit

Im **1. Kapitel** analysieren wir den heutigen Ablauf der Disposition und stellen ihm einen zukünftigen, wünschbaren Ablauf gegenüber, um das Ziel vor Augen zu haben.

In **Kapitel 2** wird die mathematische Modellbildung für die computergestützte Lösung des Dispositionsproblems diskutiert. Die Modellierung als Multi-Commodity-Min-Cost-Flow-Problem wird dem Set-Partitioning-Modell gegenübergestellt.

Die Kapitel 3 und 4 analysieren die Anforderungen an eine rechnergestützte Disposition. Diese Analyse führt zu einem Entwurf für das Programmsystem. In **Kapitel 3** werden die Anforderungen an die Disposition analysiert. Diese führen zu den grundlegenden Entscheidungen über die Architektur des Dispositionsprogramms. **Kapitel 4** stellt den „Bauplan“ vor und beschreibt das Fundament des Programms: die Schnittstellen zu den Eingabedaten Fahrtwünsche, Stadtplan und Fahrzeuge, die grundlegenden Datenstrukturen und die Parametersteuerung. Die vorgefundenen Dateien der Telebus-Zentrale werden unseren eigenen Datenblattentwürfen gegenübergestellt.

In den Kapiteln 5 bis 7 werden die implementierten heuristischen Dispositions-Algorithmen und ihre Entwicklung dokumentiert: in **Kapitel 5** die Fahrtwunschverknüpfung, in **Kapitel 6** der Tourenplangenerator und in **Kapitel 7** die Fahrzeugzuteilung. In einem gesonderten Anhang drucken wir die Programme als Listing ab.

Kapitel 8 enthält Ideen und Heuristiken für die Umdisposition am Fahrttag. Die vorgestellten Algorithmen wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht implementiert.

Kapitel 9 soll Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Strategien und Parametereinstellungen aufzeigen. Zu diesem Zweck werden am Beispiel zweier

Tage die Einstellung der Steuerparameter des Programms und die verwendeten Heuristiken variiert und die erzielten Ergebnisse miteinander verglichen.

Die sich durch den gesamten Text ziehenden Erkenntnisse und Statistiken über das Disponieren von Telebussen führen schließlich zu einem Gesamtkonzept, das eine Unternehmensberatung für die Senatsverwaltung für Soziales darstellt. Im **10. Kapitel** präsentieren wir das Konzept zur Serviceverbesserung bei gleichzeitiger Kostensenkung beim Telebus-Fahrdienst und betten es in einen zeitlichen Ablauf ein.

Kapitel 11 sprengt den Rahmen dieser Diplomarbeit. Wir stellen die Frage, wie sich ein solches umfassendes Konzept in der öffentlichen Verwaltung verwirklichen läßt. Wirken die Strukturen des öffentlichen Dienstes nicht allen Rationalisierungsbemühungen entgegen? Uns interessiert die Frage: Wodurch unterscheidet sich Unternehmensberatung in der öffentlichen Verwaltung von derjenigen in der privaten Wirtschaft? Wie kann und soll eine gute Beratung und ein sinnvoller EDV-Einsatz im öffentlichen Dienst aussehen?

Wir schlagen vor, diese Fragen zu untersuchen und hoffen, mit unserem Herangehen an dieses Projekt, wie es sich in den dokumentierten Ergebnissen widerspiegelt, einen ersten Ansatz zu ihrer Beantwortung gefunden zu haben.

1 Der Betriebsablauf der Disposition: Heute und Morgen

_____ Februar 1993 _____ Februar 1995 _____

Bus- und Taxianmietung

Entscheidungsgrundlage

- Es gibt einen festen Kreis karitativer und privater Anbieter für die Telebusse und Teletaxen.
- Für die Anmietung der Telebusse und Teletaxen werden als Entscheidungsgrundlage die entsprechenden Zahlen aus dem Vorjahr genommen.
- Die Erfahrungen vom Vorjahr aus der Zusammenarbeit mit den verschiedenen Anbietern fließen in die Entscheidung über Verteilung und Anzahl der gemieteten Fahrzeuge ein.
- Für die Festlegung der genauen Einsatzzeiten zählt nur „Fingerspitzengefühl“.

Anmietungsverträge

- Die Anzahl der angemieteten Telebusse und Teletaxen pro Unternehmen (Depot) und Tag wird ein Jahr im voraus festgelegt.
- Die Fahreranzahl jedes Busses (zwei Fahrer oder ein Fahrer) steht ebenfalls ein Jahr vorher fest. Das Anmietungsverhältnis zwischen Doppel- und Solobussen ist werktags etwa 7 : 2 und an Wochenenden etwa 8 : 1.
- Die Depotverteilung und deren Kapazitäten sind durch den Kreis der Anbieter bestimmt und entsprechen nicht dem regionalen Fahrtwunschaufkommen.

Busanmietung

Entscheidungsgrundlage

- Durch jährliche Ausschreibungen wird der Kreis der karitativen und privaten Anbieter für den Telebus flexibilisiert.
- Es werden Kriterien für die Auswahl der Telebusse formuliert, über deren Prioritätensetzung jährlich neu entschieden wird.

Anmietungsverträge

- Jährlich werden bei den Telebusanbietern Betriebsstunden, bezogen auf Monate, angemietet. Pro Monat wird unterschieden in einen festen Sockel an Betriebsstunden, die garantiert gefahren und bezahlt werden, und den restlichen Teil an Betriebsstunden, der möglichst kurzfristig angemietet werden kann.
- Mit jedem Telebusanbieter werden Flexibilitätszusagen ausgehandelt bezüglich der Fahreranzahl, der Fahrzeuge, der Schichtformen und Einsatzzeiten.
- Die Teletaxen werden nicht angemietet.

Preise

- Ab 1.1.1993 wurden die Preise bei den Bussen um 8 – 10 % erhöht. Die Preise für Doppelbusse liegen pro Stunde zwischen 65,71 DM und 74,81 DM. Solobusse kosten pro Stunde zwischen 45,84 DM und 55,37 DM.
- Ab 20.12.1992 wurden die Preise bei den Taxen um etwa 7 % erhöht. Für die Teletaxen gilt der Taxitarif. Für Hilfeleistungen von Seiten der Fahrer ist kein Preis ausgehandelt.

Einsatzzeiten

- Die Einsatzzeiten werden spätestens einen Monat im voraus vereinbart.
- Sie haben nichts mit der konkreten zeitlichen Fahrtwunschverteilung zu tun.
- Jeder Bus wird in der Regel für eine Schicht von 8,5 oder 10,5 Stunden (inklusive 30 Minuten Pause) angemietet.
- Die Busse beginnen oder beenden ihre Tages-tour immer zu einer halben oder zu einer vol-len Stunde.
- Pro Tag werden zwischen 3 und 15 E-(= Einsatz-)Busse kurzfristig für ca. 10 bis 60 Be-triebsstunden bestellt.
- Die genaue Anzahl und die Zeiten der E-Busse werden am Vorabend festgelegt. Eine Voran-mietung dieser Busse gibt es nur informell.

Buseinsatzdaten

- Die im voraus angemieteten Kapazitäten wer-den in der EDV erfaßt und dienen später dem Vordruck des Busplan-Formulars („B-Plot“).

Fazit

Die Busanmietung ist die Vorgabe für die gesamte Disposition.

Preise

- Durch die öffentliche Ausschreibung aller Auf-träge und harte Verhandlungen wird versucht, die Kosten niedrig zu halten (Beispiel Wien, s. Anhang A).
- Für die Teletaxen gilt der Taxitarif.

Einsatzzeiten

- Die Einsatzzeiten, die Fahreranzahl, die Depotverteilung und die Fahrzeuge sind möglichst flexibel zu halten und werden erst durch die Disposition festgelegt.

Buseinsatzdaten

- Die fest und die flexibel angemieteten Kapa-zitäten werden in der EDV erfaßt und dienen später der Disposition und der Abrechnung.

Fazit

Die Fahrtwünsche sind die Vorgabe für die Disposi-tion. Erst daraus ergibt sich die Busanmietung.

Fahrtwunschannahme

Telefon

- Die neue Telefonanlage kann aus technischen und personellen Gründen nicht zuverlässig und sinnvoll genutzt werden.

Organisation

- Es gibt verschiedene Telefonnummern für die Annahme von
 - Gruppen- und Dauerfahrten
 - Vorwegbuchungen (bis drei Tage vorher)
 - Aktualbuchungen (während der Disposition bis zum Vorabend)
 - Spontanbuchungen (am selben Tag)

Wo ein Anruf landet, ist meist Zufall. Bis ein Fahrtwunsch gebucht wird, wird der Anruf oft über mehrere Stationen durchgestellt.

- Das Personal in der Fahrtwunschannahme ist für den Telefon-Service nicht explizit ausgebildet.

EDV

- Die Fahrtwünsche werden als Daten von einer EDV-Anlage erfaßt.
- Die Benutzeroberfläche dafür ist unflexibel und entspricht keinerlei ergonomischen Kriterien. Ein großer Teil der statistisch ausgewiesenen Stornierungen beruht darauf, daß ein unvollständiger oder falsch eingetippter Fahrtwunsch erst gebucht, dann storniert und dann wieder neu gebucht werden muß. Die Stornierungsstatistik ist also völlig unzuverlässig.

Fahrtwunschannahme

Telefon

- Die Telefonanlage ist zuverlässig, weil sie simpel und robust ist.

Organisation

- Es gibt eine einzige Telefonnummer für die Annahme von Fahrtwünschen zweier Arten:
 - Vorwegbuchungen (bis zum Vorabend)
 - Spontanbuchungen (am selben Tag) werden zur Leitzentrale durchgestellt.
- Das Personal in der Fahrtwunschannahme ist für den Telefon-Service explizit ausgebildet.

EDV

- Die Fahrtwünsche werden als Daten von einer EDV-Anlage erfaßt.
- Die Benutzeroberfläche dafür ist flexibel und entspricht ergonomischen Kriterien.

- Bei einem ungewöhnlich hohen Fahrtwunschaufkommen (über 1.500) an besonderen Tagen muß das Personal mehr als sonst jederzeit mit dem Absturz der alten EDV-Anlage (PDP 11) rechnen.
- Die Firma PCDS soll bis Mitte Juli 1993 die Fahrtwunschannahme auf einem neuen Rechner installieren.

Fahrtwunschedaten

- Bei der Fahrtwunschannahme werden nur Abholzeiten abgefragt, nicht aber gewünschte Ankunftszeiten.
- Am Telefon wird über die Wunschzeit evtl. mit dem Kunden verhandelt. Eine Abholzeit im 10-Minuten-Raster wird vereinbart. Die gebuchte Abholzeit entspricht nicht unbedingt der Wunschzeit.
- Der Fahrtzweck (Freizeitfahrt oder Arzt-, Arbeits-, Terminfahrt) wird zwar erfragt, hat aber wegen der Beschränkung auf die Abholzeit wenig Aussagekraft. Oft ist der gebuchte Fahrtzweck nicht der wirkliche, sondern nur derjenige, unter dem die Fahrt abrechnungstechnisch verbucht werden soll.
- Standardisierte Daten, die immer abgefragt werden, sind diejenigen, die für die Abrechnung und die Statistiken wichtig sind, nicht aber diejenigen, die die Disposition braucht.
- Hinweise für den Fahrdienst werden in einer textuellen Infozeile (z.B. „3.Etage, 2 Pudel“) festgehalten, die unformalisiert ist. Für die Disposition enthält sie entscheidende Daten.
- Nicht alle Informationen über einen Fahrtwunsch sind erfaßt. Diejenigen, die erfaßt sind, sind nicht unbedingt korrekt. Nur durch das Zurückgreifen auf Erfahrung, eigenes Wissen und Intuition wird ein richtiges Disponieren möglich.

- Es gibt ein EDV-System für den Telebusbetrieb, basierend auf marktgängiger Hard- und Software. Es umfaßt die EDV-Arbeiten in der Fahrtwunschannahme, bei der Disposition, in der Leitzentrale und der Verwaltung, insbesondere auch in der Abrechnung.

Fahrtwunschedaten

- Bei der Fahrtwunschannahme werden die gewünschten Abholzeiten oder Ankunftszeiten im 10-Minuten-Raster entgegengenommen. Der Telebus-Service sichert zu, daß das Fahrzeug höchstens ± 5 Minuten verspätet oder zu früh vor Ort ist.
- Am Telefon wird über die Wunschzeit mit dem Kunden nicht verhandelt.
- Für die Disposition werden die voraussichtlichen Ein- und Ausstiegszeiten der Kunden (bis auf 5 Minuten genau) eingetragen.
- Ist die Ankunftszeit die Wunschzeit, wird eine Abholzeit dem Kunden sofort mitgeteilt.
- Alle für eine gute Disposition und für eine korrekte Abrechnung wichtigen Daten sind standardisiert.
- In der Infozeile werden nur Vermerke für den Fahrer und den Funk festgehalten.
- Durch eine bessere Bildschirmoberfläche wird die Annahmezeit für einen Fahrtwunsch halbiert.
- Die Rate der Stornierungen liegt unter 5 %, weil das Buchen auf Vorrat durch die kurzfristigere Buchungsmöglichkeit und vermehrtes Zulassen von Spontanbuchungen nicht mehr nötig ist.

Februar 1993

- Die errechneten Kilometerangaben in den Fahrtwunschedaten stimmen nicht, denn der nach der Maueröffnung neugefaßte und um den Ostteil Berlins erweiterte digitalisierte Stadtplan von der Studiengesellschaft für Nahverkehr (SNV) wurde im BZA nicht implementiert. Der BZA verwendet weiterhin die alte SNV-Fassung für West-Berlin, erweitert um maximal 87 Knotenpunkte für den Ostteil, während der neue SNV-Stadtplan 327 Knotenpunkte im Ostteil vorsieht.
- Die Rate der Stornierungen (Fehlbuchungen) liegt bei 25 %. Bis 3 Tage vorher liegt sie bei 10 – 20 %.
- Jeder abgeschlossene EDV-Vorgang in der Fahrtwunschannahme (Fahrtwunsch, Stornierung, Fehlbuchung) wird aus Sicherheitsgründen von einem Drucker protokolliert.

Dispositionsvorbereitung

Karten und B-Plot

- 3 Tage vor dem zu disponierenden Tag werden abends ab 17 Uhr alle Fahrtwünsche auf postkartengroßen Kartonkarten ausgedruckt.
- Die Karten werden abgerissen, Arztfahrten werden aussortiert und für die spätere Abrechnung markiert.
- Alle angemieteten Fahrzeuge werden auf mehreren Druckerseiten ausgedruckt und zu einem großen Plan, dem „B-Plot“, zusammengeklebt.

Februar 1995

- Jeder gebuchte Fahrtwunsch bzw. jede Stornierung wird gesichert.

Dispositionsvorbereitung

Entfällt

Busdisposition

Ablauf

- 2 Tage vor dem zu disponierenden Tag morgens beginnt die Busdisposition.
- Aus einem Stapel von ca. 600 Busbestellungen und ca. 400 Teletaxenbestellungen werden „die Karten gelegt“.
- Jeder Disponent hat seine eigene Dispositionstechnik, die „Handschrift“.
- Die Disposition geht von den angemieteten Bussen aus und nicht von den Fahrtwünschen.
- Alle disponierten Bustouren werden per Hand in den B-Plot geschrieben. Vermerkt wird der Anfangsbezirk, die Anzahl der im Fahrzeug beförderten Personen und der Endbezirk.
- Bleiben bei der Busdisposition Fahrtwünsche übrig, die einen Telebus benötigen, werden E-Busse disponiert.

Faustregeln der Disposition

- Lasse viel „Luft“.
- Lege „schöne“ Touren.
- Nimm möglichst nahe Anschlüsse und vermeide weite Anfahrtswege. Je weiter der Anfahrtsweg, desto mehr kann dem Bus passieren (z.B. Stau). Herumstehen und auf die nächste Bestellung in der Nähe warten ist sicherer.
- Schau für mögliche Zusammenfassungen 30 Minuten zurück und 40 Minuten voraus. Finden sich passende Karten, wird zusammengefaßt. Verschiebe dabei, falls nötig, die Anfangszeiten um maximal ± 30 Minuten. Bei größerer Verschiebung wird „Rückruf nötig“ vermerkt, damit der Behinderte rechtzeitig von dieser Änderung erfährt. (Nachträgliche Veränderung der Kundenwünsche!)

Busdisposition

Ablauf

- Einen Tag vor dem zu disponierenden Tag wird jeweils eine Busdisposition automatisch erstellt und gesichert. Dies ist nur eine Sicherheitsmaßnahme für den Fall, daß am Vortag höhere Gewalt die gesamte EDV-Anlage lahmlegt und der Telebusbetrieb kurzfristig per Hand weiterlaufen muß.
- Am Vorabend findet das rechnergestützte Disponieren statt. Grundlage sind die zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Fahrtwünsche.
- Das Dispositionsprogramm arbeitet parametergesteuert. Jede Parametereinstellung entspricht einer bestimmten Qualitätsgarantie für das Ergebnis. Es werden jeweils unterschiedliche Strategien mit verschiedenen Algorithmen automatisch durchgerechnet. Die billigste Variante wird genommen.
- Das Ergebnis der rechnergestützten Disposition ist ein ausgefüllter B-Plot und ein DIN A4 Blatt pro Bus.
- Alle Fahrtwünsche, die nicht von Telebussen sondern von Teletaxen erfüllt werden sollen, stehen auf einer Liste.

- Finde für lange Fahrten (> 30 Minuten) eine oder mehrere Einbindungen. Bei Verschiebungen wird notfalls „Rückruf nötig“ vermerkt. Der Gedanke ist hier: Unbegründet lange Fahrten sollen bestraft werden. Und: Sollte der Fahrtwunsch noch storniert werden, fährt der Bus nicht leer.
- Verschiebe, falls nötig, nicht so dringend wirkende Einzelfahrten ohne Rückruf bis zu ± 15 Minuten. Wenn der Fahrtzweck es erlaubt, verschiebe mehr und vermerke „Rückruf nötig“.
- Lege Gruppen- und Dauerfahrten in ihren vertrauten Konstellationen (gewisse Behinderte fahren immer zusammen oder bestimmte Fahrtwünsche werden jeden Tag in gleicher Reihenfolge auf den gleichen Bus disponiert).
- Berücksichtige bei allen Zusammenfassungen, Gruppenfahrten und Einbindungen die jeweiligen Buskapazitäten.

Ziel

Der Fahrbetrieb soll möglichst reibungslos verlaufen, ohne daß viele Funkkontakte und Umdispositionen nötig werden.

Taxidisposition

Ablauf

- Am Vortag werden die angemieteten Teletaxen mit den Karten der bei der Busdisposition übriggebliebenen taxifähigen Fahrtwünsche disponiert.
- Alle disponierten Taxitouren werden per Hand in den B-Plot geschrieben. Pro Fahrt wird der Anfangsbezirk, die Anzahl der im Fahrzeug beförderten Personen und der Endbezirk vermerkt.
- Bleiben bei der Taxidisposition Fahrtwünsche übrig, werden sie mit den E-Bussen bedient.

Ziel

Die Disposition von Telebussen soll kostensparend sein und flexibel einstellbare Qualität gewährleisten.

Taxidisposition

Ablauf

- Eine Taxidisposition ist rechnergestützt jederzeit möglich. Sie wird aber nicht gemacht. Die genaue Aufteilung auf die Taxen ist Sache der Taxizentralen bzw. Taxiunternehmen, nicht der Telebuszentrale. In der Telebuszentrale wird dieser Posten nicht disponiert sondern nur kontrolliert.

Abschlußarbeiten der Disposition

Karteikasten

- Die Fahrtwunschkarten werden zu Tourenstapeln zusammengefaßt.
- Am Vorabend wird für jedes disponierte Fahrzeug jede Karte einzeln als Telefax an den entsprechenden Fahrbetrieb geschickt, damit er den Fahrplan für die Fahrer erstellt. (Zusatzarbeit für den Fahrbetrieb!)
- Die Tourenstapel werden, nach Busnummern sortiert, in einem Karteikasten abgelegt.

Fahrdienstbetreuung in der Leitzentrale

Fahrtwunschannahme

- Viele Fahrtwünsche und nicht nur die Spontanbuchungen kommen in der Leitzentrale an und werden dort gebucht.
- Die Spontanbuchungen werden entgegengenommen und mit den Einträgen auf dem B-Plot und den Karten verglichen. Es wird entschieden, ob der Fahrtwunsch irgendwo hineinpaßt. Über Funk wird mit den entsprechenden Fahrern darüber verhandelt, ob ihnen die Änderung paßt. Entsprechend dem Ergebnis wird die Spontanbuchung bestätigt oder abgelehnt.

Umdisposition

- Spontanbuchungen werden nur entgegengenommen, wenn ein Fahrzeug verfügbar ist und der Fahrer über Funk rechtzeitig erreicht werden kann.
- Stornierungen führen zu Pausen oder Fehlfahrten, je nachdem wie kurzfristig storniert wird.

Abschlußarbeiten der Disposition

B-Plot und Busblätter

- Am Vorabend werden der B-Plot, die Busblätter und die Teletaxi-Fahrtwünsche ausgedruckt.
- Die Busblätter werden an die entsprechenden Anbieter gefaxt. Sie teilen den Anbietern mit, welche ihrer Fahrzeuge mit wieviel Personal zu welchen Einsatzzeiten von der Telebuszentrale gemietet werden. Gleichzeitig sind sie die Busfahrpläne für die Fahrer.

Fahrdienstbetreuung in der Leitzentrale

Fahrtwunschannahme und Umdisposition

- Die von der Fahrtwunschannahme durchgestellten Spontanbuchungen werden entgegengenommen.
- Kommt der Wunsch von einem Kunden, der Telebus fahren will, kann durch eine schnelle Online-Disposition sofort entschieden werden, ob entsprechend umdisponiert werden kann oder nicht. Der Kunde erhält sofort eine konkrete Auskunft.
- Kommt der Wunsch von einem Kunden, der Teletaxe fahren will, wird dieser Fahrtwunsch den Taxizentralen bzw. Taxiunternehmen übermittelt.
- Es sind vermehrt Spontanbuchungen für Telebusse möglich durch den Einsatz von „Taxibussen“, das sind mit Taxibestellungen gefüllte Telebusse, die eine Dispositionsmasse darstellen. Die Spontanbuchung wird gegebenenfalls auf diese Busse disponiert.

- Ausfälle im Fahrdienst führen zu Umdispositionen oder Absagen zugesagter Fahrten. Gründe für Ausfälle sind z.B.: Die Adresse bzw. der Fahrgast wird nicht rechtzeitig gefunden; die Fahrt braucht länger als geplant; das Fahrzeug steckt im Stau oder ist defekt.
- Da Hin- und Rückfahrt vom Telebus-System garantiert werden, muß für die Umdisposition bei Ausfällen immer ein Fahrzeug vorhanden sein, das noch genügend „Luft“ hat, um zusätzliche Fahrten spontan zu übernehmen.
- Alle Fahrten sind nur auf dem B-Plot und den Karten erfaßt.

Fahrbetrieb und Funk

- Die Funkfrequenz ist überlastet und hat eine zu kleine Reichweite (z.B. ist Berlin-Buch nicht erreichbar).
- Die Teletaxen sind auf der gleichen Frequenz mit der Leitzentrale verbunden.
- Weil sie per Funk nicht durchkommen, müssen Fahrer häufig von der Telefonzelle aus versuchen, die Leitzentrale zu erreichen.
- Jedes Fahrzeug meldet sich mindestens zum Arbeitsbeginn und -ende an bzw. ab. Die Abmeldung umfasst mindestens die Angaben über die gefahrenen Kilometer und die Anzahl der beförderten Begleitpersonen.
- Bei neuem oder ortsunkundigem Fahrpersonal wird versucht, einen regelmäßigen Funkkontakt zu halten. Diese Fahrer melden mindestens den Anfang und das Ende jeder Fahrt.
- Das Fahrpersonal ist für die spezielle Aufgabe des Behindertentransports nicht ausgebildet. Motivation, die aus sozialem Engagement herrührt, kann nicht vorausgesetzt werden.

- Bei Ausfällen im Fahrdienst kann nach dem gleichen Prinzip verfahren werden.
- Frühzeitige Stornierungen führen gegebenenfalls zu einer rechnergestützten Umdisposition.
- Wenn der Bus schon zum Kunden unterwegs ist, führen Stornierungen zu Pausen oder Fehlfahrten. In dieser Situation lohnt es sich nicht, rechnergestützt umzudisponieren.
- Alle gefahrenen Touren und erteilten Aufträge an die Taxizentralen oder Taxiunternehmen sind in der EDV erfaßt.

Fahrbetrieb und Funk

- Der Funk ist funktionstüchtig. Dadurch, daß die Teletaxen nicht mehr von der Telebus-Leitzentrale gesteuert werden, sondern von ihren Taxizentralen, kann der Funk vollständig für die Fahrdienstbetreuung der Telebusse bzw. für Umdispositionen genutzt werden und ist nicht überlastet.
- Jedes Fahrzeug meldet sich mindestens zum Arbeitsbeginn und -ende an bzw. ab.
- Bei neuem oder ortsunkundigem Fahrpersonal wird versucht, einen regelmäßigen Funkkontakt zu halten. Diese Fahrer melden mindestens den Anfang und das Ende jeder Fahrt.
- Das Fahrpersonal ist für die spezielle Aufgabe des Behindertentransports ausgebildet oder ist dafür besonders geschult. Die Motivation, einen guten Behindertenservice zu gewährleisten, ist durch eine entsprechende Entlohnung gegeben oder weil diese Aufgabe von jungen Menschen im Rahmen des Zivildienstes übernommen wird.

Abrechnung

Gewinn und Verlust

- Die Ausgaben gliedern sich auf in die Kosten für die angemieteten Telebusstunden, die E-Bus-Kosten, die Kosten der Teletaxen und die Rückerstattungen an die Behinderten für die Fahrten im Taxi-Mischsystem.
- Einnahmen entstehen aus Arztfahrten und Arbeitsfahrten.

Subunternehmer und karitative Fahrdienste

- Die abgerechneten Stunden der einzelnen Firmen nach Fahrzeugtypen müssen mit den aus dem B-Plot ersichtlichen disponierten Stunden und mit den durch den Funk erfaßten am Tag gemeldeten Stunden verglichen werden.
- Da keine dieser Daten EDV-erfaßt sind, findet die Abrechnung mit Papier und Bleistift statt.

Teletaxen

- Alle Fahrten werden von den Taxiunternehmen einzeln nach Taxameter abgerechnet. Für jeden im Taxi beförderten Fahrtwunsch muß über die auf der Fahrtwunschkarte gedruckte Kilometerangabe der Taxifahrpreis überschlagen werden, um die Seriosität der Taxi-Rechnung zu beurteilen.

Taxi-Mischsystem

- Etwa 3.000 – 4.000 Briefe kommen pro Monat in der Telebus-Zentrale an mit Taxiquittungen der Nutzer des Taxi-Mischsystems. Die Quittungen werden bearbeitet; die Kosten werden erstattet.

Abrechnung

Gewinn und Verlust

- Die Ausgaben gliedern sich auf in die Kosten für die Betriebsstunden der Telebusse und die Kosten der Teletaxen. Die Kosten der Teletaxen setzen sich zusammen aus den Fahrten der Vorwegbuchungen und des Taxi-Mischsystems, zuzüglich der Kosten für die Servicedienste der Taxizentralen oder Taxiunternehmen.
- Einnahmen entstehen aus Arztfahrten und Arbeitsfahrten.

Subunternehmer und karitative Fahrdienste

- Die in Rechnung gestellten Betriebsstunden der einzelnen Anbieter, aufgegliedert nach Fahrzeugen und Personal, werden mit den gespeicherten Daten verglichen.

Teletaxen und Taxi-Mischsystem

- Die in Rechnung gestellten Fahrten von Teletaxen werden mit den gespeicherten Fahrtwünschen, die in Rechnung gestellten Servicedienste der Taxizentralen oder Taxiunternehmen werden mit den erteilten Aufträgen verglichen. Für das Taxi-Mischsystem werden die Kosten maximal bis zur festgelegten Obergrenze den Taxiunternehmen erstattet. Hier dienen die von den Behinderten unterschriebenen Quittungen der Kontrolle.

Arzt- und Arbeitsfahrten

- Die Arzt- und Arbeitsfahrten werden aus dem Karteikasten herausgesucht, und es wird an Hand des B-Plots überprüft, welche davon ausgeführt wurden.
- Pro Arztfahrt bekommt Telebus 5 DM von den Krankenkassen erstattet.
- Pro Arbeitsfahrt bekommt Telebus individuell verschiedene Beträge erstattet.

Kontrolle

- Eine Kontrolle der Rechnungen durch die Übersicht der stattgefundenen Fahrten ist nur mit großem Aufwand möglich.
- Der Senat erhält die monatliche Abrechnung etwa zwei Monate später.
- Die Form der Abrechnung und der beiliegenden Statistiken erlaubt dem Senat wenig Einblick in den Fahrbetrieb, so daß eine wirkliche Kontrolle nicht möglich ist.

Arzt- und Arbeitsfahrten

- Die ausgeführten Arzt- und Arbeitsfahrten sind in der EDV gespeichert.
- Pro Arztfahrt bekommt Telebus den dafür festgesetzten Betrag von den Krankenkassen erstattet.
- Pro Arbeitsfahrt bekommt Telebus individuell verschiedene Beträge erstattet.

Kontrolle

- Eine Kontrolle der Rechnungen ist jederzeit möglich.
- Eine Kontrolle der Qualität der Fahrten und der Servicedienste ist jederzeit möglich.
- Wann der Senat die monatliche Abrechnung erhält, hängt nur davon ab, zu welchem Zeitpunkt die Rechnungen der Anbieter in der Telebus-Zentrale eintreffen.
- Die Form der Abrechnung ist detailliert. Für jeden Tag, jede Woche oder jeden Monat kann eine genaue Aufstellung der geleisteten Busbetriebsstunden, Teletaxenfahrten und Servicedienste rechnergestützt erstellt werden.
- Die erfaßten Daten ermöglichen aussagekräftige Statistiken über die wirklichen Kosten und Leistungen des Telebusdienstes.
- Mit dem Computerprogramm zur Disposition ist nicht nur die Disposition möglich, sondern es können auch Experimente gemacht, Modelle berechnet und neue Ideen auf ihre Kosten oder Leistungen überprüft werden.

2 Telebus-Disposition als mathematisches Problem

Wir wollen nun das Telebus-Dispositionproblem mathematisch einordnen. Wir haben die Arbeitsabläufe in der Telebus-Zentrale und das Verfahren der Busanmietung untersucht und diesen unsere eigenen Vorstellungen von einer modernen Telebus-Zentrale entgegengesetzt. Demnach sollen die Telebusse in Zukunft rechnergestützt disponiert werden. Um ein Computerprogramm zu entwerfen, daß dieses Problem löst, müssen wir uns zunächst über das Problem klar werden. Ein Computerprogramm löst eine mathematische Abstraktion eines Problems: ein Modell. Die Frage ist dann, ob das gewählte Modell dem Problem gerecht wird. Nur dann löst das Computerprogramm auch das Problem.

2.1 Das Telebus-Dispositionproblem

Was ist also das Telebus-Dispositionproblem? Die eingegangenen Fahrtwünsche sollen auf Bustouren verteilt und innerhalb jeder Tour in eine fahrbare Reihenfolge gebracht werden. Aus der Analyse des Telebus-Betriebs haben sich drei Grundentscheidungen ergeben:

1. Die Fahrtwünsche sollen der Ausgangspunkt der Disposition sein. Sie vollständig und möglichst fahrgastfreundlich zu erfüllen, ist das oberste Ziel. Dem entgegen steht das Interesse des Senats, diese Beförderung möglichst billig zu leisten. Deshalb soll eine gemeinsame Beförderung mehrerer Fahrtwünsche in Sammelfahrten, Ein- und Anbindungen weiterhin erlaubt sein. Für die Behinderten soll dies aber keine unzumutbaren Verspätungen bedeuten und die Geduld des Fahrgastes nicht überstrapazieren.
2. Die Busanmietung soll nicht Vorgabe, sondern Ziel der Disposition sein. Deshalb heißt Disposition nur, die (eventuell zusammengefaßten) Fahrtwünsche zu Touren zusammenzustellen und in eine Reihenfolge zu bringen. Diese Touren werden erst hinterher den verfügbaren Bussen zugeteilt, weil wir sagen: Die Fahrzeuge sind keine fest vorgegebene Menge sondern ein *Markt*. Wie man garantiert, daß jede Tour auch ein tatsächlich verfügbares Fahrzeug abbekommt, ist ein Problem der Fahrzeuganmietung. Dafür werden Vorschläge in den Kapiteln 7 und 10 gemacht.
3. Da die Rahmenbedingungen und Ziele beim Disponieren sich oft verändern, soll das Computerprogramm möglichst flexibel arbeiten und nicht nur *eine* Lösung zulassen, sondern viele verschiedene Varianten ermöglichen.

Das Telebus-Dispositionproblem ist ein *Optimierungsproblem*: Nicht nur irgendein Fahrplan für die Telebusse soll herauskommen, sondern ein möglichst guter. Aber was heißt „gut“? Für die Behinderten geht es um die Maximierung der Servicequalität, für den Senat

um die Minimierung der Kosten, die Telebus-Zentrale will, daß die Disposition schnell und unkompliziert verläuft, und die Busfahrer wollen einen möglichst wenig chaotisch aussehenden Plan, am besten den gleichen wie immer. Das Ziel der Optimierung ist also durchaus nicht klar, und was das für Folgen hat, werden wir bei der Diskussion der mathematischen Modellierung merken.

Und wieso reden wir eigentlich von *einem* Optimierungsproblem? Schon durch einfaches Überlegen kommt man auf viele komplexe Optimierungsfragen, die sich bei der Telebus-Disposition stellen: Was ist eine optimale Tour? Was ist ein optimaler Tourenplan? Ergibt die Summe optimaler Touren einen optimalen Tourenplan? Wer soll mit wem gemeinsam befördert werden? Wie hängt die Entscheidung darüber, welche Fahrtwünsche gemeinsam befördert werden, mit dem optimalen Tourenplan zusammen? Wie bringe ich hinterher das Fahrzeugangebot mit der Nachfrage, den Touren, in Einklang? Wie und wann lege ich am günstigsten die fehlenden oder vagen Zeitangaben jedes Fahrtwunsches fest? Oder lege ich sie besser gar nicht fest? Man sieht: Wahrscheinlich ist es illusorisch, das Dispositionsproblem mit *einem* mathematischen Verfahren, das den großen Wurf versucht, lösen zu wollen. Trotzdem wollen wir am Ende eine – global gesehen – gute oder sogar beste Lösung herausbekommen. Deshalb wollen wir jetzt auch erst einmal global auf dieses Problem schauen und eine grobe Einordnung in die Welt der Mathematik versuchen.

2.2 Mathematische Einordnung des Dispositionsproblems

In der wissenschaftlichen Literatur finden wir die Fahrzeugeinsatzplanung für Behindertenfahrdienste als Teil der großen Klasse der „vehicle routing and scheduling“-Probleme. Diese umfassen drei große Gebiete, die aufeinander aufbauen und immer komplexere Probleme enthalten (Zusammenstellung nach Bodin, Golden, Assad und Ball[1983]):

Routenplanung. Hierzu gehören das „Traveling Salesman Problem“ und das „Chinese Postman Problem“. Beim Traveling Salesman Problem geht es darum, die kürzeste Rundreise von einem Depot aus zu planen, die jeden *Kunden* (Knoten im Graphen) genau einmal besucht (kürzester Hamilton-Kreis). Anders beim Chinese Postman Problem: Hier wird eine kürzeste Rundreise von einem Depot aus gesucht, die jede *Straße* (Kante im Graphen) mindestens einmal benutzt. Denkbar sind alle möglichen Varianten und Kombinationen der Erschwerung: z.B. mehrere Depots, mehrere Fahrzeugtypen oder mehrere Handlungsreisende bzw. Postboten. Gemeinsam ist ihnen allen, daß es nur auf die *Reihenfolge* der besuchten Kunden bzw. Straßen ankommt, also auf die gefahrene *Route*. Nicht betrachtet wird die Dimension der Zeit: Zu welcher Uhrzeit wird ein Kunde aufgesucht. Entspricht dies seinem Wunsch?

Einsatzplanung. Diese Dimension kommt bei den Einsatzplanungsproblemen hinzu. Hier will jeder Kunde zu einem bestimmten Zeitpunkt beliefert werden, oder ein vorher erstell-

ter Busfahrplan erzwingt, daß ein Bus zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort sein muß. Es gibt hier zwei Arten von Problemen: Fahrzeugeinsatzplanung und Personaleinsatzplanung. Der einfachste Fall der Fahrzeugeinsatzplanung ist eine Situation mit einem einzigen Depot, mehreren Fahrzeugen und festen Zeiten für jeden Kunden. Gesucht ist ein Fahrplan für die verfügbaren Fahrzeuge, der die Kunden pünktlich bedient. Erschwerungen sind auch hier wieder: mehrere Depots, mehrere Fahrzeugtypen oder die Begrenzung der Länge einer Tour (durch Schichtlänge, gefahrene Kilometer, usw.). Ist der Fahrplan erstellt, kommt das nächste Problem: die Besatzung muß den disponierten Touren zugeordnet werden. Das in der wissenschaftlichen Literatur am häufigsten beschriebene Personaleinsatzplanungsproblem ist die Crew-Einsatzplanung für Fluggesellschaften. Das Charakteristische der Einsatzplanungsprobleme ist das Planen in den Dimensionen von Raum *und* Zeit. Es geht hier aber nur um relativ „einfache“ Probleme. Jede Einzelaufgabe (Beförderung eines Kunden, Busfahrt zwischen zwei Endstationen, etc.) wird als unteilbar angesehen. Außer der Einhaltung der zeitlichen Abfolge, werden Reihenfolgeprobleme und Unwägbarkeiten, die sich aus der Ungenauigkeit von Zeitangaben ergeben können, nicht betrachtet.

Kombinierte Routen- und Einsatzplanung. Genau diese beiden Erschwernisse kommen nun hinzu. Werden z.B. mehrere Personen von einem gemeinsamen Ort aus zu verschiedenen Zielen befördert, muß wieder ein Routenplanungsproblem gelöst werden, nämlich die Bestimmung der optimalen Ausstiegsreihenfolge. Ein- und Aussteigen jedes Kunden sind nicht mehr unzertrennbar in ihrer direkten Abfolge, sondern es können Kunden zusteigen, während andere noch im Fahrzeug sitzen. Sind die gewünschten Abholzeiten nicht fest, sondern im Rahmen eines „Zeitfensters“ variabel disponierbar, dann hängen die möglichen Nachfolgerkunden in einer Tour von den festgelegten Zeiten des schon disponierten Teils ab. Einen „Graph aller Möglichkeiten“ von vornherein aufzubauen, ist dann unmöglich. Die typischen Beispiele für die kombinierten Routen/Einsatzplanungsprobleme kommen alle aus der Praxis: Schulbus-Routenplanung, Zugmaschinen/Anhänger-Routen- und Fahrtplanung und Behindertenfahrdienste.

Unser Dispositionsproblem liegt also anscheinend in der dritten Problemklasse. Routen- und Fahrzeugeinsatzplanung laufen parallel, und auch das Problem des Fahrereinsatzes auf den disponierten Touren muß gelöst werden. In der Literatur ist das Problem unter dem Namen „Dial-a-ride routing and scheduling problem“ bekannt. Ganz genau: „Multiple vehicle static dial-a-ride routing and scheduling with time windows“. Wenn wir die gewünschten Abfahrtszeiten als fest ansehen und mögliche „Minitouren“ (Sammelfahrten, Ein- und Anbindungen) in einem vorher laufenden Programm für sich abgeschlossen disponieren, können wir das Telebus-Dispositionsproblem aber auch als Einsatzplanungsproblem (Problemklasse 2) ansehen, denn dann geht es um die Auswahl von Touren, die die Kundenwünsche pünktlich bedienen, aus einem vorher erzeugbaren „Graph aller Möglichkeiten“.

2.3 Komplexität des Dispositionsproblems

Obwohl die vorgestellten typischen Fälle der einzelnen Problemklassen sich ziemlich ähneln, unterscheiden sie sich doch sehr in ihrer mathematischen Komplexität. Das Traveling Salesman Problem ist *NP*-schwer, während das Chinese Postman Problem polynomiell lösbar ist. Ähnlich in der nächsten Klasse: Das oben beschriebene einfachste Einsatzplanungsproblem (ein Depot, mehrere Fahrzeuge) ist polynomiell lösbar (als Min-Cost-Flußproblem); jede weitere Restriktion macht das Problem sofort *NP*-schwer. Die vorgestellten Probleme in der dritten Problemklasse sind alle *NP*-schwer. (Lenstra und Rinnooy Kan[1981])

2.4 Modelle und Lösungsansätze

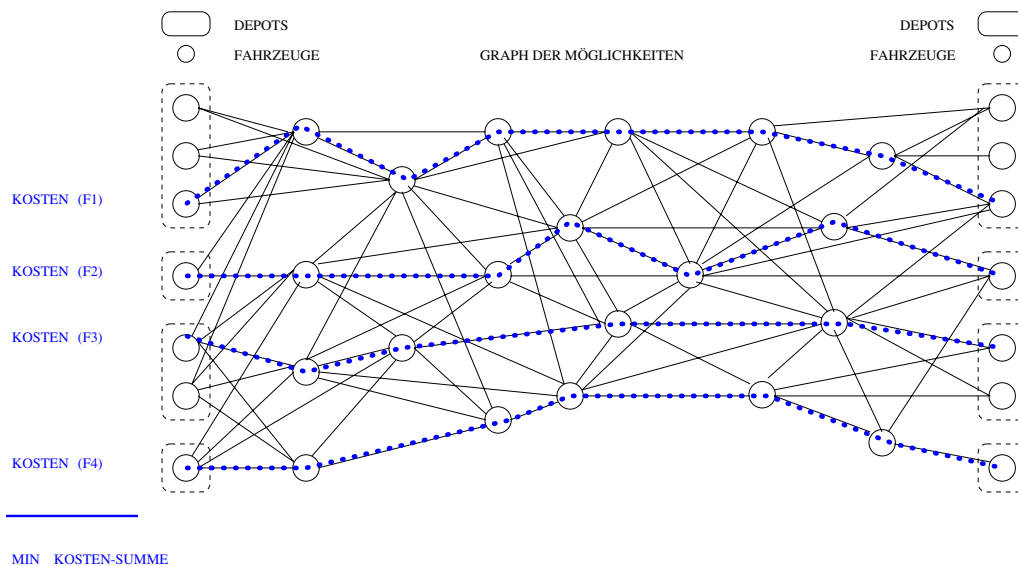
Wir haben oben gesehen, daß das Telebus-Dispositionsproblem sehr viele verschiedene Optimierungsprobleme enthält. Wir wollen uns deshalb zunächst auf die Tourenplan-Erzeugung beschränken und das Problem der Zusammenfassung von Fahrtwünschen nicht betrachten. Die damit zusammenhängenden Probleme werden in Kapitel 5 ausführlich behandelt und dort auch gelöst.

Viele der in der Literatur betrachteten Routen- und Einsatzplanungsprobleme und deren Anwendungsfälle lassen sich als *Set-Partitioning-Problem* modellieren: Zähle alle möglichen Routen auf und suche danach die optimale Kombination, die das Problem löst, heraus. Als *Lösungsstrategie* wirkt diese Methode ziemlich einfältig. Sie ist unabhängig von dem konkreten Problem, der Telebus-Disposition. Sie paßt darauf. Aber sie paßt auch auf viele andere Probleme. Sollte man nicht versuchen, eine Modellierung zu finden, die dem Problem, Routen- und Fahrpläne zu berechnen, näherkommt?

Welches Modell ist adäquat für das Telebus-Dispositionsproblem? Wenn wir uns die möglichen Routen als Graph vorstellen, geht es darum, eine Menge von Wegen durch diesen Graph zu finden, die von jeweils einem Depot aus über einzelne Fahrten wieder zum Depot zurückführen, so daß alle Fahrtwünsche auf genau einem Weg liegen. Dies kann man als *Multi-Commodity-Flow-Problem* modellieren (Bodin, Golden, Assad und Ball[1983]. Andreas Löbel versucht dies gerade am ZIB für das Problem der Busumlaufplanung), wobei die einzelnen „commodities“ die verschiedenen Fahrzeugtypen und -kapazitäten sind. In der Literatur wird dieses Modell für Einsatzplanungsprobleme (Problemklasse 2) erwähnt. Für das Telebus-Problem, als „dial-a-ride“-Problem (Problemklasse 3) aufgefaßt, sind überhaupt keine Spezialmodelle bekannt. Es bleibt nur Set Partitioning. Vergleichen wir also die beiden Modelle Multi-Commodity Flow und Set Partitioning.

Multi-Commodity Min-Cost Flow. Auf dieses Modell kommt man, wenn man das Telebus-Dispositionsproblem als das Problem auffaßt, Busse mit einer möglichst guten

Abfolge von Bestellungen zu belegen. Dies wäre also von der Idee her ein Modell, das dem Telebus-Betrieb, wie er bisher läuft, gerecht würde. Die Depots werden als spezielle Knoten eines Graphen codiert, wobei jedes Depot noch einmal nach den unterschiedlichen Fahrzeugtypen (Kapazitäten) aufgefächert wird. Alle Bestellungen sind Bestellungsknoten, und die Kanten des Netzwerks stellen alle Möglichkeiten der Abfolge von Bestellungen dar, also den „Graph aller Möglichkeiten“. Die Knoten haben die Kapazität 1, denn es soll nur höchstens *ein* Fluß durch jeden Knoten laufen; keine Bestellung soll mehrmals erfüllt werden. Die Depotknoten werden verdoppelt und links und rechts neben das Netzwerk gemalt. Von jedem Depot aus wird so viel Fluß in das Netzwerk gepumpt wie dort Busse stationiert sind.



Jetzt geht es darum, Flüsse aus den verschiedenen Depots heraus zu finden, die rechts wieder in dasjenige Depot zurückführen, in dem die Tour links begonnen hatte, so daß jeder Bestellungsknoten genau einmal durchflossen wird und minimale Flußkosten entstehen.

Wenn man das Telebus-Dispositionsproblem so modelliert, muß man die ganzen Nebenbedingungen des Problems als Gleichungen (oder Ungleichungen) formalisieren. Insbesondere wird die Lage der Depots festgelegt. Nicht formalisieren läßt sich in diesem Modell die Längenbeschränkung einer Tour durch die Länge einer Schicht und die Berücksichtigung von Pausen. Ändert sich eine der Nebenbedingungen, insbesondere die Lage eines Depots, verändert sich damit auch die mathematische Beschreibung der Lösungsmenge. Das Problem stellt sich wieder neu; es sind Änderungen im mathematischen Optimierungsprogramm erforderlich. Je größer die Anzahl der zu berücksichtigenden Nebenbedingungen ist, desto mehr Variablen entstehen und desto größer wird das ganzzahlige Programm.

Set Partitioning. Während Multi-Commodity Flow durch die Idee des Flusses von einer Quelle zu einer Senke natürlicherweise Bustouren von den Depots aus plant, stellt Set Partitioning genau die andere Sichtweise auf das Problem dar. Es geht darum, von den Bestellungen ausgehend eine Fahrtenfolge festzulegen, die zunächst unabhängig von einem Bus oder einem Depot gedacht ist. Alle möglichen Fahrtenfolgen (Touren) werden betrachtet und durch die Bewertung jeder Tour miteinander verglichen. Damit teilt sich das Problem in zwei Teile: Zunächst werden mit Hilfe eines *Spaltengenerators* zulässige und „fahrbare“ Fahrtenfolgen (Touren) erzeugt, und zwar eine so gute Auswahl aller möglichen Touren, daß eine hohe Wahrscheinlichkeit besteht, das Problem durch die Kombination einiger der erzeugten Tourenvorschläge optimal zu lösen. In der nächsten Phase wird dann aus den erzeugten Touren versucht, genau diese „optimale“ oder beste Kombination zu finden.

Angenommen, wir haben für 1.000 Fahrtwünsche mit dem Spaltengenerator 1.000.000 Touren erzeugt. Mathematisch gesehen ist das eine Matrix A mit den Fahrtwünschen als Zeilen und den erzeugten Touren als Spalten, in der $a_{ij} = 1$ als Eintrag bedeutet: ein Fahrtwunsch F_i wird von einer Tour T_j erfüllt. Ein Eintrag $a_{ij} = 0$ bedeutet: ein Fahrtwunsch F_i wird von einer Tour T_j nicht abgedeckt.

		1	2	3	...	j	...	n	TOUREN
1	0					1			
2						0		1	
3						1			
...									
i	0	1	0			1			
...									
m	1	0				0		1	
FAHRT- WÜNSCHE									

Ein Tourenplan x ist zulässig genau dann, wenn alle Fahrtwünsche von mindestens einer Tour abgedeckt werden. Sei A eine $m \times n$ Matrix, x ein n -Vektor, der mit 0 oder 1 gefüllt ist. 1 an der Stelle j bedeutet: die Tour T_j ist im Plan; 0 bedeutet: sie ist nicht im Plan. Dann folgt aus $Ax \geq \mathbf{1}$: der Tourenplan der Touren in x ist zulässig.

		1	2	3	...	j	...	n	TOUREN
1	0					1			1
2						0		1	1
3						1			1
...									1
i	0	1	0			1			1
...									1
m	1	0				0		1	1
FAHRT- WÜNSCHE									

 $=$

1	1
2	1
3	1
...	1
i	1
...	1
m	1
1-VEKTOR	

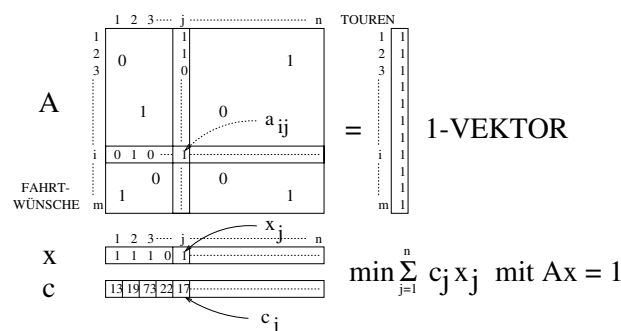
	1	2	3	...	j	...	n
1	1	1	0		1		
2							
3							
...							
i							
...							
m							
x							

Da in der Summe einer Zeile mindestens einmal ein Produkt $a_{ij}x_j \neq 0$ vorgekommen sein muß, hat jeder Fahrtwunsch *mindestens* eine Tour im Tourenplan x , die ihn erfüllt. Dieses

Modell heißt *Set-Covering*. Wenn wir $Ax = \mathbf{1}$ fordern, hieße das: jeder Fahrtwunsch hat *genau einen* Platz in einem Fahrzeug erhalten. Dieses Modell heißt *Set-Partitioning*.

Für die automatische Disposition ist Set-Partitioning $Ax = \mathbf{1}$ besser. Sie soll einen eindeutigen Plan ergeben. Es soll schließlich nur *ein* Fahrzeug vor der Haustür stehen. Für eine automatische Vordisposition mit einer endgültigen Disposition per Hand könnte sich Set-Covering $Ax \geq \mathbf{1}$ als hilfreich erweisen, weil den Disponenten automatisch gute Vorschläge präsentiert werden und bis zum Schluß eine Flexibilität erhalten bleibt. Denkbar wäre auch eine Mischung.

Wie ermittelt man die optimalen Lösungen? Die Kosten einer Tour müssen bestimmt werden. Bei der Generierung einer Tour werden Kostenparameter gesetzt und auf noch nicht näher bestimmte Art zu einem Wert, den Kosten einer Tour, zusammengefaßt. Gehen wir zum Beispiel nur von dem Kostenparameter Leerstand bzw. Leerfahrt aus, lassen sich diese für jede Tour durch einfaches Aufsummieren eindeutig ermitteln. Wir haben also einen Kostenvektor c der Länge n .



Ein Eintrag an der Stelle c_j enthält die Summe der Leerzeiten einer Tour. Die Linearkombination $\sum_{j=1}^n c_j x_j$ ergibt dann die Leerzeitkosten eines Tourenplanes. Die Zielfunktion für optimale Tourenpläne ist somit: $\min \sum_{j=1}^n c_j x_j$ für alle x , die $Ax \geq \mathbf{1}$ bzw. $Ax = \mathbf{1}$ erfüllen.

Formal können wir das Set-Partitioning-Problem jetzt als ganzzahliges lineares Programm aufschreiben:

$$\min \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

Unter den Nebenbedingungen:

$$Ax = \mathbf{1}$$

$$x_j \in \{0, 1\} \text{ für } j = 1, \dots, n$$

Set Partitioning als Lösungsstrategie wurde vor allem durch die Verwendung in der Crew-Einsatzplanung von Fluggesellschaften bekannt. Zur Zeit werden damit Probleme in der

Größenordnung 90 Zeilen und 10.000 Spalten gelöst (Hoffman und Padberg[1992]), der „Weltrekord“ liegt zur Zeit bei 837 Zeilen und knapp 13 Millionen Spalten (Bixby, Gregory, Lustig, Marsten und Shanno[1991]). Diese Zahl ist aber nicht unbedingt zum Vergleich geeignet, da die Schwierigkeit eines ganzzahligen Programms des Set-Partitioning-Modells ganz wesentlich von der Struktur des zugrundeliegenden Problems abhängt (z.B. Dichte der Matrix).

Der Vorteil dieses Modells ist, daß es eine klare Trennung zwischen dem problemspezifischen Teil des Programms gibt, dem Spaltengenerator, und dem problemunabhängigen Teil, dem Set-Partitioning-Löser. Änderungen der Ziele oder Nebenbedingungen müssen nur im Spaltengenerator berücksichtigt werden.

Ein Nachteil ist, daß, bedingt durch die notwendige *Auswahl* der betrachteten Touren (Spalten), nicht gewährleistet ist, daß die Optimallösung gefunden werden kann, weil sie möglicherweise gar nicht im Lösungsraum enthalten ist. Außerdem löst Set-Partitioning nur das Problem der Tourenplanung. Die Fahrzeugzuteilung ist kein Set-Partitioning-Problem. Nehmen wir an, alle Touren würden mehrmals in die Matrix geschrieben, so daß jede Tour so oft in der Matrix vorkommt, wie sie verschiedenen Fahrzeugen zugeteilt werden kann. Dann würde der Set-Partitioning-Löser vielleicht eine Optimallösung liefern, in der mehrere Spalten den gleichen Bus abbekämen, da Spalten mit gleichen Kosten für ihn äquivalent sind. Ihn interessiert, $Ax = \mathbf{1}$ möglichst billig zu erfüllen. Sollen gleichzeitig noch Fahrzeuge optimal zugeordnet werden, handelt es sich um ein anderes Modell.

2.5 Bisherige Lösungen für Behindertenfahrdienste

Es gibt Veröffentlichungen über mathematische Verfahren für die Lösung von Problemen der Fahrzeugeinsatzplanung. Exakte Algorithmen, die Routen- und Einsatzplanungsprobleme optimal lösen, sind aber nur für einfachere Probleme als das Telebus-Dispositionsproblem bekannt. Für die Routenplanung mit einem einzigen Depot und Zeitfenstern für die Anlieferung von Waren, gibt es optimale Lösungen für etwa 100 Kunden (Desrochers, Desrosiers und Solomon[1992]). „Dial-a-Ride“-Probleme, allerdings nur mit einem Fahrzeug, werden optimal bis zu einer Größe von 40 Kunden gelöst (Desrosier, Dumas und Soumis[1986]). Praktisch eingesetzt wird unseres Wissens noch kein solches Verfahren.

Bisherige Dispositionsprogramme für Behindertenfahrdienste oder ähnliche „Dial-a-Ride“-Probleme sind, soweit dokumentiert, ausschließlich heuristischer Natur. Das Programm von Jaw, Odoni, Psaraftis und Wilson[1986] disponiert alle Fahrzeuge gleichzeitig und geht von morgens nach abends vor. Ähnlich – angeblich – das Verfahren von Roy, Rousseau, Lapalme und Ferland[1984]. Die Prozedur von Bodin und Sexton[1986] teilt die Menge der Bestellungen jeweils Bussen zu und baut dann für jeden Bus die Menge seiner Bestellungen zu Routen zusammen. Cullen, Jarvis und Ratliff[1981] beschreiben ein interaktives System,

das mit heuristischen Set-Partitioning-Algorithmen arbeitet und im Vorgehen ähnlich ist zu unseren Ideen. Beim Behindertenfahrdienst in Wien wird ein heuristisches Dispositionsprogramm verwendet, das die Fahrtwünsche räumlich nur nach Stadtbezirken unterscheidet. Die Fahrtwünsche werden nach Anfangszeiten sortiert und nacheinander auf Busse disponiert, wobei gleichzeitig im gleichen Stadtbezirk beginnende und endende Fahrtwünsche zusammengefaßt werden. (Siehe auch im Anhang A: Behinderten-Fahrdienst Wien.) Auch für den Telebus-Fahrdienst in Berlin ist schon einmal, im Jahr 1986, versucht worden, ein Dispositions-Programm zu schreiben. Die Firma MBB hat dafür die Software geschrieben. Dieses Computerprogramm hat sich aber im täglichen Betrieb als nicht verwendbar herausgestellt, weil es zu viele Fehler enthielt und zu unflexibel war. Ein kurzer Bericht darüber findet sich in RKW[1988], Beilage 34/2.

2.6 Gründe für die Wahl des Set-Partitioning-Modells

Angeichts der Komplexität des Telebus-Dispositionsproblems und aufgrund unserer Entscheidung, von den Fahrtwünschen auszugehen und die Fahrzeuge hinterher zuzuteilen, haben wir uns für die Modellierung als Set-Partitioning-Problem entschieden. Das hat mehrere Gründe:

- Es gibt eine ungeheuer große Anzahl möglicher Touren. Durch die vorherige Erzeugung des Lösungsraums mit Hilfe des Spaltengenerators, läßt sich das Problem auf eine vernünftige Auswahl und damit auf eine lösbare Größe reduzieren.
- Somit kann – wie erwähnt – das Finden einer *Optimallösung* nicht mehr garantiert werden. Darauf kommt es aber auch gar nicht an. Es gibt bei diesem Problem nämlich nicht nur *eine optimale* Lösung, sondern unheimlich *viele gute* Lösungen. Sehr viele gute Spalten sind kostenmäßig äquivalent, da sie sich nur minimal unterscheiden. Wenn wir also ganz viele *unterschiedliche* gute Spalten erzeugen, besteht Hoffnung, daß die Lösung dann auch gut wird.
- Aufgrund der großen Zahl an Nebenbedingungen, die dem Telebus-Dispositionsproblem eigentümlich sind, bietet es sich an, die problemspezifischen Teile der Lösung aus dem mathematischen Optimierungsmodell herauszuhalten. Es würde einen großen Aufwand in der Modellierung erfordern, alle Anforderungen und Bedingungen als Ungleichungen zu formulieren. Die Anzahl der Variablen und damit die Größe des Problems wäre immens.
- Das Set-Partitioning-Modell verkraftet eine Änderung der Nebenbedingungen problemlos, weil sie nicht inhärenter Bestandteil des mathematischen Optimierungsmodells sind, wie es bei allen anderen möglichen Modellierungen der Fall wäre. Set

Partitioning ist robust gegen Änderungen der Anforderungen, während ein ganzzahliges Programm, das die Nebenbedingungen selbst enthält, mit diesen steht und fällt. Ändern sich die Nebenbedingungen, liegt ein ganz anderes, neues Optimierungsproblem vor, über das neu nachgedacht werden muß.

- Die täglichen Veränderungen der Lage (andere Busse angemietet, andere Witterungs- oder Verkehrsverhältnisse) bedeuten, daß jeden Tag eine für diesen Tag ideale Variante des Dispositionsprogramms verlangt wird. Es muß also eine Vielzahl von Parametern eingestellt werden können, die die Nebenbedingungen – ohne Veränderung des Programms selber – verändern und neu zusammenstellen. Leicht kann diese interaktive Komponente in den Spaltengenerator eingebaut werden, der damit von einem Werkzeug zu einer „Werkzeugmaschine“ wird.
- Die Unklarheit des Optimierungsziels erfordert, auch dieses möglichst variabel zu halten. Wenn ein Spaltengenerator der Optimierung vorgeschaltet ist, müssen vom Set-Partitioning-Löser nur die modellierten „Kosten“ optimiert werden. Die Bewertung jeder Tour wird nach leicht veränderbaren Kriterien schon vom Spaltengenerator wahrgenommen. Sollte sich das Optimierungsziel ändern, werden diese Bewertungen einfach geändert; die *Zielfunktion* aber bleibt immer gleich: Minimiere die Summe der Kosten, die an den Spalten stehen, wie immer sie sich auch zusammensetzen mögen.

Mit Set Partitioning können wir den Touren nicht gleichzeitig die Fahrzeuge zuteilen. Dies ist ein neues mathematisches Problem: Ein Zuordnungsproblem. Da genau zwei Mengen, nämlich Touren und Fahrzeuge, einander zugeordnet werden sollen, läßt sich das Problem in einem bipartiten Graphen modellieren. Auf der einen Seite sind die Touren, auf der anderen Seite die verfügbaren Fahrzeuge. Eine Kante zwischen einer Tour und einem Fahrzeug bedeutet die *Möglichkeit*, dieser Tour das Fahrzeug zuzuteilen. Die Aufgabe ist nun, einen Satz von Kanten zu finden, der alle Touren genau einem Fahrzeug zuteilt. Für bipartite Graphen ist dieses Zuordnungsproblem, falls es überhaupt eine Lösung besitzt, einfach zu lösen in höchstens $O(n^3)$. (Jungnickel[1990])

2.7 Anforderungen an den Spaltengenerator

Der Set-Partitioning-Löser kann nur so gut sein wie seine Eingabedaten. Dies sind die Touren (Spalten), die der Spaltengenerator liefert. Welche Anforderungen muß dieser erfüllen?

Einerseits sollen die erzeugten Touren vielfältig, aber dennoch für sich genommen gut sein. Touren, die nicht erzeugt wurden, sollen zu Recht nicht erzeugt worden sein. Die Struktur des Telebus-Dispositionsproblems muß möglichst gut verstanden werden, um zu beurteilen, welche Tour erzeugt werden sollte und welche nicht. Möglicherweise entstehen erst

durch die Kombination „guter“ und „schlechter“ Tourenvorschläge schöne Tourenpläne. Welche „schlechten“ Touren wähle ich aus? Wieviel macht die *Auswahl* überhaupt aus? Welche Rolle soll der Zufall spielen? Das ist die eine Seite: das Aufspannen des „optimalen“ Lösungsraums. Daß dies ein schwieriges Problem ist, zeigt schon eine kleine Rechnung: Wenn nur jeder der etwa 1.000 Fahrtwünsche zwei mögliche Anschlüsse in einer Tour hätte und jede Tour 10 Fahrtwünsche nacheinander erfüllte, so gäbe es schon $1.000 \times 2^{10} = 1.000 \times 1.024 = 1.024.000$ mögliche Touren. In Wirklichkeit besitzt jeder Fahrtwunsch allein innerhalb der nächsten Stunde nach seinem Ende durchschnittlich 20 mögliche Anschlußbestellungen. Das ergibt eine unvorstellbar große Anzahl möglicher Touren.

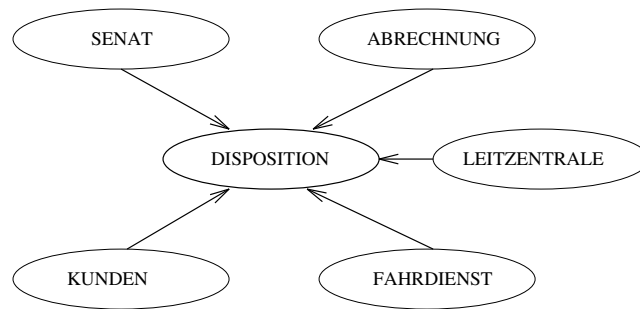
Andererseits muß garantiert werden, daß überhaupt eine zulässige Lösung, also ein Tourenplan, sich aus einer Kombination der erzeugten Touren ableiten läßt. Vielleicht schließen sich alle Tourenvorschläge gegenseitig aus, da jeder Fahrtwunsch genau einmal erfüllt werden muß. Der Spaltengenerator muß also in der Lage sein, nicht nur Spalten zu produzieren, sondern auch fertige Tourenpläne; er soll das Telebus-Dispositionsproblem ohne Zuhilfenahme des Set-Partitioning-Lösers *heuristisch* lösen können.

Diese heuristischen Lösungen alleine sollen zunächst in der Telebus-Zentrale verwendet werden, solange der Set-Partitioning-Löser noch nicht vorhanden ist. Das bedeutet: sie müssen selbst schon eine möglichst hohe Qualität haben. Wir werden in den folgenden Kapiteln diesen heuristischen Tourenplangenerator für die Telebus-Zentrale entwickeln. Dieses Programm kann dann, durch die Erzeugung von Lösungen mit verschiedenen Parametereinstellungen, auch zum Erzeugen von Spalten für den Set-Partitioning-Löser verwendet werden.

Für beide Zwecke gilt natürlich: Alle erzeugten Touren müssen die Nebenbedingungen erfüllen, also „fahrbar“ sein.

Auch für den Set-Partitioning-Löser ist im Übrigen die heuristische Optimierung der in den gelieferten Spalten enthaltenen Lösungen wichtig, denn diese Lösungen stellen obere Schranken dar, denen der Set-Partitioning-Löser untere Schranken gegenüberstellt. Die Kunst der Optimierung ist es dann, die Lücke zwischen der größten unteren Schranke und der kleinsten oberen Schranke immer mehr zu verkleinern, bis eine Lösung gefunden wird, die möglichst nah an der unteren Schranke liegt.

3 Rechnergestütztes Disponieren



Wir wollen nun die Anforderungen analysieren, die von den verschiedenen beteiligten Seiten an die Disposition gestellt werden. Aus diesen Anforderungen leiten wir einen Systementwurf für das rechnergestützte Disponieren ab.

3.1 Anforderungen an die Disposition

Wünsche der Behinderten

- Der Kunde möchte pünktlich mit dem Telebus abgeholt werden. Hat er eine feste Ankunftszeit gewünscht (was bisher nicht von der Fahrtwunschannahme erfaßt wird) oder ergibt sich aus dem Fahrtzweck die Pünktlichkeit (Arbeit, Schule, Arzt, Termin), so soll der Telebus ihn auch pünktlich ans Ziel bringen.
- Es wird eine schnelle Beförderung gewünscht. Der Telebus soll möglichst keine Umwege fahren, keine weitere Fahrgäste aufnehmen oder absetzen, es sei denn, dieses wird explizit gewünscht. Gebuchte Gruppenfahrten oder täglich in der gleichen Gruppe fahrende Sammelfahrten sollen jeden Tag möglichst unverändert disponiert werden.
- Der Rollstuhl muß in den diesem Fahrtwunsch zugeteilten Bus hineinpassen und ohne große Probleme hinein- und herausgerollt werden können.
- Die Service-Wünsche (Treppenhilfe, Abholen aus der Wohnung, Begleitung bis zur Wohnung) sollen erfüllt werden. Das Fahrzeug muß mit der entsprechenden Anzahl an Fahrpersonal ausgestattet sein.

Vorgaben des Senats

- Der Telebus-Fahrdienst soll möglichst billig sein. Deshalb sollen die Telebus-Benutzer keinen Anspruch auf Einzelbeförderung haben. Auf dem Fahrtweg liegende zeitlich passende Fahrtwünsche sollen in andere eingebunden oder an andere angebunden werden. Fahrten vom oder zum gleichen Ziel sollen zu Sammelfahrten zusammengefaßt werden.
- Wechselnd sind die Ziele, an was eigentlich gespart werden soll: Waren es bei Beginn des Projekts die Teletaxen, deren Anzahl verringert werden sollte (so viele Bestellungen wie möglich in die Busse), so soll jetzt (April 93) die Anzahl der Telebusse minimiert werden.

Anforderungen durch den Fahrdienst

- Die Busunternehmen wollen möglichst frühzeitig die genauen Einsatzzeiten ihrer Busse samt erforderlichem Personal kennen.
- Die disponierten Fahrten müssen zeitlich fahrbar sein und auch Baustellen und Staus berücksichtigen.
- Die disponierten Touren sollen „vernünftig“ aussehen. Insbesondere lange Leerfahrten durch die ganze Stadt hindurch sehen „unvernünftig“ aus und sind zu vermeiden.
- Die diesem Bus zugeteilten Fahrtwünsche müssen auch in den Bus hineinpassen. Es dürfen nicht gleichzeitig mehr Rollstuhl- und Sitzplätze vergeben werden als real vorhanden sind. Die Rollstuhltypen, die in der Tour vorkommen, müssen in den Bus passen.
- Es muß innerhalb der Tour nach spätestens der Hälfte der Schicht eine Pause von 30 Minuten eingeplant werden. Ist dies nicht möglich, so sind entsprechend der Arbeitszeitordnung auch 2×20 Minuten oder 3×15 Minuten Pause erlaubt.

Wünsche der Leitzentrale

- Die genauen Einsatzzeiten und die Besatzung der zur Verfügung stehenden Telebusse sollen sich erst aus dem Ergebnis der Disposition ergeben.
- Es muß genug Luft im Tourenplan sein, um unvorhergesehene Situationen abfangen zu können und bei Ausfällen Manövriermasse zu haben.

- Der B-Plot muß leicht zu verändern sein. Eine Umdisposition wegen Absagen oder spontaner Buchungen soll nicht zu einem ganz anderen Tourenplan führen.

Anforderungen durch die Abrechnungsabteilung

- Die Abrechnung braucht das tatsächlich gefahrene Ergebnis der Disposition mit den berechneten Kosten.

3.2 Systementwurf

Aus diesen verschiedenen Anforderungen an die Disposition lassen sich vier verschiedene Gruppen zu lösender Probleme herauslesen, in denen es jeweils die Aufgabe ist, die sich widersprechenden Interessen miteinander in Einklang zu bringen:

1. Welche Fahrtwünsche befördere ich gemeinsam als Sammelbestellung, Ein- oder Anbindung? Hier müssen die Interessen der Behinderten (möglichst jede Fahrt einzeln falls nicht ausdrücklich das Gegenteil gewünscht wird) und des Senats (möglichst billige Beförderung) in ein Gleichgewicht gebracht werden, so daß jede Fahrtwunsch-Verknüpfung für beide Seiten zumutbar ist.
2. Die Bestellungen müssen in eine Abfolge gebracht werden und zu einzelnen Touren disponiert werden. Pünktliche Abholung und pünktliches Ankommen stehen im Widerspruch zu einer möglichst flexiblen und kostenminimierenden Disposition. Gleichzeitig müssen die disponierten Touren fahrbar sein und vernünftig aussehen. Der Plan soll Luft enthalten, um den Telebus-Service am Fahrttag auch bei Ausfällen und Staus aufrecht zu erhalten, andererseits soll er möglichst kostengünstig sein oder sogar Kosten- oder Ressourcenvorgaben einhalten.
3. Die zu einer Tour disponierten Fahrtwünsche müssen von einem „passenden“ Bus gefahren werden. Er darf nicht zu klein sein, sollte aber auch nicht überdimensioniert sein für die Bestellungen seiner Tour. Die An- und Abfahrt vom bzw. zum Depot muß möglich sein. Der eingeplante Bus muß in der disponierten Zeit auch zur Verfügung stehen. Hier steht das Interesse der Anbieter nach frühzeitiger Planungssicherheit zum Einen dem Interesse der Disponenten gegenüber, die Fahrtwünsche eines Tages zur Grundlage der Disposition zu machen und zum Anderen dem Interesse des Senats, nur diejenigen Buskosten bezahlen zu müssen, die auch tatsächlich gebraucht werden.
4. Am Fahrttag muß der Tourenplan leicht veränderbar sein, ohne daß eine große Umorganisation nötig wird. Schließlich muß der tatsächlich gefahrene Tourenplan, aufgegliedert nach Bussen, mit einem Preis versehen werden, der es ermöglicht, die Rechnungen der Anbieter zu kontrollieren.

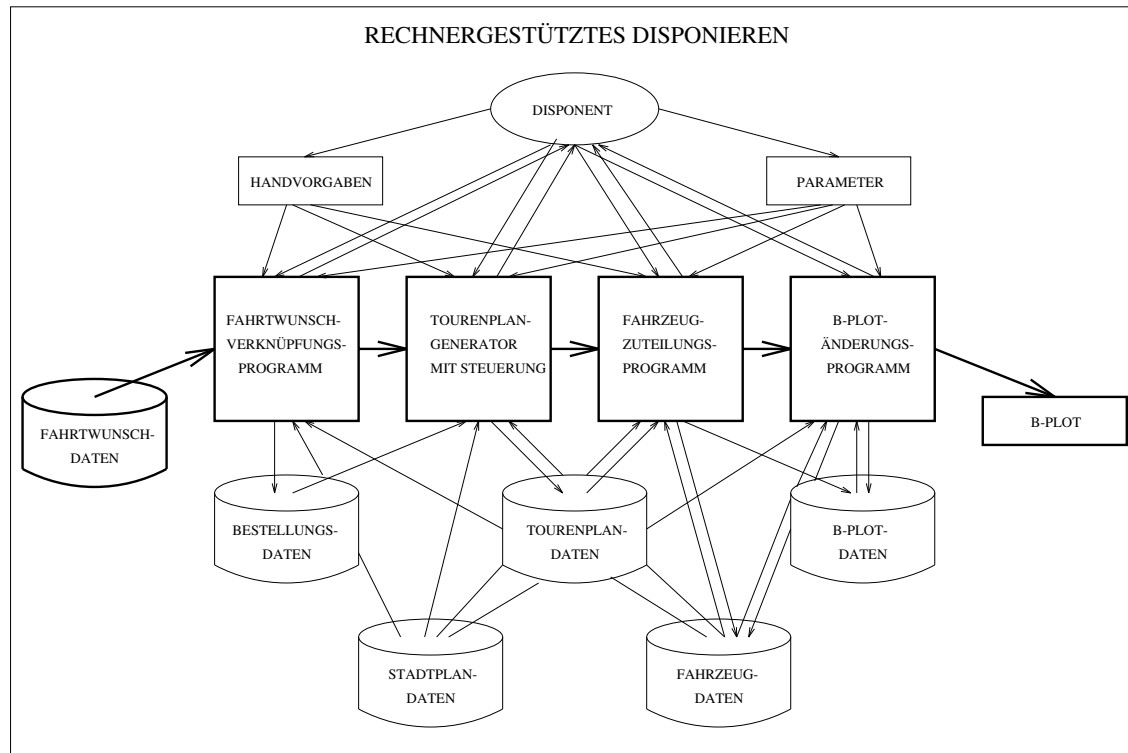
Problem: Alles hängt mit allem zusammen. Für einen kostenoptimalen B-Plot wäre es ideal, wenn man die ersten drei Probleme alle gleichzeitig löste. Die für einen Tourenplan ideale Verknüpfung der Fahrtwünsche (Punkt 1) hängt von der Konstellation ab, in der sie in einem optimalen Tourenplan auftauchen. Diese Konstellation beruht aber wiederum auf den ausgewählten Verknüpfungen. Oft gibt es viele Möglichkeiten, z.B. bei den Ein- und Anbindungen, Verknüpfungen zu wählen. Hat man eine Verknüpfungsmöglichkeit gewählt, schließt sie womöglich andere Verknüpfungsmöglichkeiten aus, die für sich betrachtet schlechter aussehen, im Gesamtplan aber doch eine Verbesserung bewirken.

Für die Zuteilung der Fahrzeuge (Punkt 3) gilt das Gleiche. Ein optimales Austarieren von Touren und verfügbaren Fahrzeugen kann nur gleichzeitig passieren. Im anderen Fall müssen entweder Touren in vorgegebene Fahrzeuge gepreßt werden oder es besteht die Gefahr, daß ein erzeugter Tourenplan nicht gefahren werden kann oder sich signifikant verschlechtert dadurch, daß nun im Nachhinein auf die vorhandenen Fahrzeuge, ihre angemieteten Zeiten und ihre Standorte Rücksicht genommen werden muß, die bei der Erzeugung der Touren noch keine Rolle spielten.

Die drei Probleme „Fahrtwünsche verknüpfen“, „Touren disponieren“ und „Fahrzeuge zuteilen“ sind mathematisch ganz unterschiedliche Optimierungsprobleme. Das Verknüpfungsproblem ist bei den Sammelfahrten die Kombination von Routenplanungsproblemen mit einem Set-Partitioning-Problem, bei den Ein- und Anbindungen geht es um die optimale Auswahl aus allen möglichen Paarungen: ein Set-Partitioning-Problem. Fahrzeuge zuzuteilen, ist ein Zuordnungs- („Assignment-“) Problem. Und schließlich die eigentliche Disposition der Fahrtwünsche ist wieder ein Set-Partitioning-Problem. Alle zusammengekommen bilden ein komplexes Routen- und Einsatzplanungsproblem (s. Kapitel 2).

Entscheidung: Alle Probleme getrennt betrachten. Wir haben uns angesichts der Komplexität des Gesamtproblems entschieden, die drei Probleme wie sie nacheinander auftreten auch nacheinander jedes für sich zu lösen. Zuerst werden die Fahrtwünsche miteinander zu *Bestellungen* verknüpft, dann wird ein *Tourenplan* disponiert, am Schluß werden den Touren die verfügbaren *Fahrzeuge* zugeordnet. Notfalls wird in geringem Umfang der Tourenplan dem Fahrzeugangebot angepaßt.

Die einmal berechnete Verknüpfung der Fahrtwünsche ist dabei jeweils die Grundlage für *einen* Tourenplan. Da die Lösungsstrategie „Set Partitioning“ vorsieht, viele Touren und Tourenpläne zu erzeugen, werden Varianten und Alternativen zu dieser Fahrtwunschverknüpfung durch die Vielfalt der erzeugten Lösungen letztlich doch berücksichtigt. Eine solche Vorgehensweise ist charakteristisch für Set Partitioning. Wir nutzen aus, daß am Ende global über den gesamten erzeugten Lösungsraum optimiert wird. Deshalb können wir uns diesen Lösungsraum *nacheinander* konstruieren, ohne gleich den „großen Gesamtwurf“ zu versuchen.



Beim heuristischen Tourenplangenerator, der zunächst in der Telebus-Zentrale eingesetzt werden wird, besteht die Arbeit des Disponierens aus den im Bild gezeigten vier Arbeitsschritten, die nacheinander ausgeführt werden.

Problem: Alle Teilprobleme liegen im Widerstreit der Interessen. Innerhalb jedes einzelnen Programmteils muß entschieden werden, welche Interessen sich durchsetzen und welche Kompromisse gemacht werden. Zum Beispiel muß entschieden werden, welche Art von Fahrtwunschverknüpfung zumutbar ist, was für Verspätungen toleriert werden sollen, wieviele Fahrgäste gleichzeitig in einem Bus sitzen dürfen, ob möglichst viele Fahrtwünsche durch Busse erledigt werden sollen oder durch Taxis, wieviel Luft im Tourenplan gelassen werden soll, wie hoch Ein- und Ausstiegszeiten angesetzt werden, wie schnell ein Telebus-Fahrer fahren soll, wie lange eine Schicht maximal dauern darf, usw.

Entscheidung: Programmziele über Parameter steuern. Diese Abwägung hängt von vielerlei sich verändernden Rahmenbedingungen ab, zum Beispiel Senatsvorgaben, vorhandene Ressourcen, Menge und Verteilung der Fahrtwünsche eines Tages. Auch die

Zufriedenheit der Nutzer und des Fahrpersonals spielt eine Rolle. Deshalb haben wir diese problemspezifischen Parameter alle leicht veränderbar, eben über einstellbare Parameter, programmiert. Deshalb heißt das Herzstück unseres Programms Tourenplangenerator *mit Steuerung*.

Eine Grundentscheidung haben wir allerdings getroffen: Die Motivation unserer Arbeit ist, den Service für die Behinderten zu verbessern. Die Disposition als das Herzstück der Telebus-Zentrale kann diesen Auftrag nur erfüllen, wenn für sie die Behinderten und ihre Wünsche im Mittelpunkt stehen. Deshalb sind die Fahrtwünsche der Kunden der Ausgangspunkt der Disposition. Sie sind in gute Tourenpläne umzusetzen, und erst daraus ist eine kostengünstige Busanmietung abzuleiten.

Mensch und Computer. Wir wollen in unserem Programmentwurf den Grundsatz verfolgen: so viel Interaktion wie möglich, so viel Formalisierung wie nötig.

Zur Interaktion: Wir wollen die Telebus-Disposition nicht völlig automatisieren. Der Computer soll dem Menschen diejenigen stupiden Arbeiten abnehmen, die ihn Zeit kosten: Rechnen, sortieren, ordnen, suchen und finden. Aber immer noch muß ein Mensch dem Computer vorgeben, nach welchen Paramtereinstellungen disponiert werden soll und nach welcher Strategie. Er muß aus den erzeugten Tourenplänen einen auswählen, muß diesen durchsehen, mit Hilfe des Rechners verbessern und den ganzen Prozeß der rechnergestützten Disposition überwachen. Diese menschliche Arbeit ist auch notwendig, um den disponierten Plan am Fahrtag zu kennen. Jederzeit müssen die in der Telebus-Zentrale beschäftigten Menschen in der Lage sein, einen Plan wie früher, von Hand, zu disponieren, denn Telebusse müssen auch fahren, wenn der Computer versagt.

Zur Formalisierung: Der Einsatz des Computers beim Telebus-Betrieb soll den Menschen die Arbeit erleichtern. Das ist nur dann der Fall, wenn der Computer in den Begriffen der Menschen kommuniziert. Deshalb werden Begriffe und Namen gewählt, die aus der Welt des Problems stammen und nicht aus der des Computers. Begriffe in Zahlen zu codieren, ist Sache der Maschine, nicht des Menschen. Der Computer soll dem Menschen dienen und nicht der Mensch dem Computer.

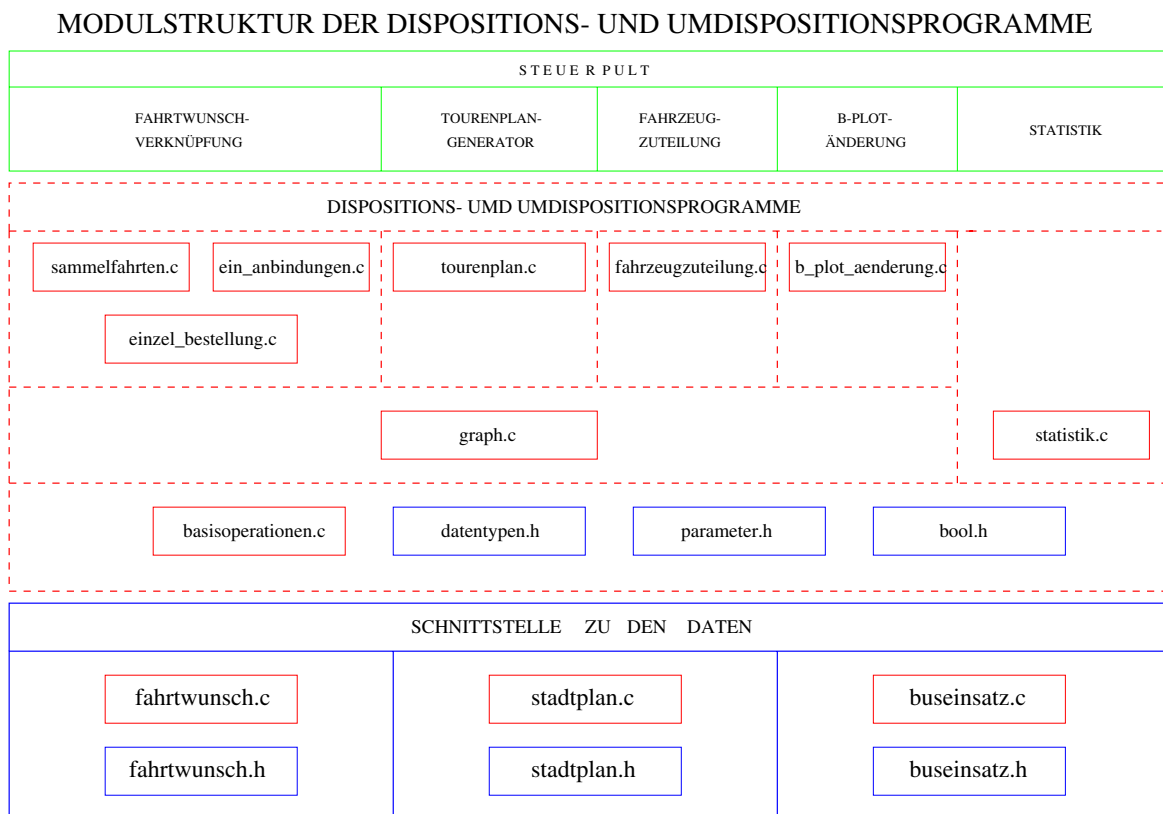
Dazu ein Zitat aus der neuesten Monographie über Routenplanungsprobleme.

A.A. Assad[1988] schreibt optimistisch über den algorithmischen Fortschritt auf diesem Gebiet:

“In most successful implementations, this desirable state of affairs has resulted from a combination of careful modeling, the design of clever heuristics, and an appropriate interactive user interface.”

4 Der Programmwurf und sein Fundament

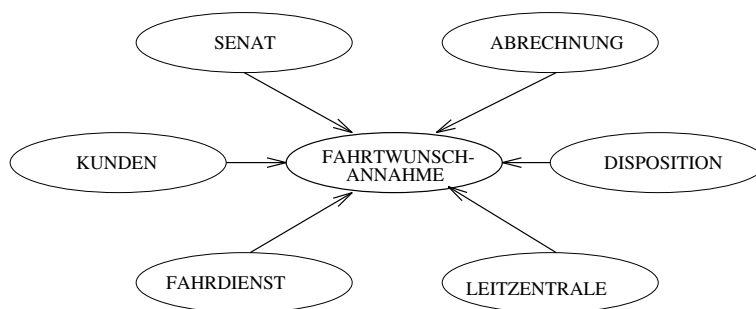
Die Architektur der Dispositionsprogramme folgt den im letzten Kapitel gefällten Entscheidungen. Der Tourenplangenerator mit Steuerung paßt sich in diese Modulstruktur ein:



Wir wollen die Realisierung unseres Programms in diesem und den folgenden Kapiteln Schritt für Schritt vorstellen. Dabei beginnen wir unten mit der Schnittstelle zu den Eingabedaten. Im nächsten Schritt stellen wir die grundlegenden Datenmodelle und ihre Implementierungen vor. Auf gleicher Ebene liegt die Implementierung der Steuerparameter. Dies ist das Fundament des Tourenplangenerators mit Steuerung; wir stellen es in diesem Kapitel vor. Auf diesem Fundament stehen die vier Hauptprogramme Fahrtwunschverknüpfungs-, Tourenplan-, Fahrzeugzuteilungs- und B-Plot-Änderungsprogramm. Für diese Programme werden das jeweilige Modell und die Implementierung in den folgenden vier Kapiteln dokumentiert. In Kapitel 9 stellen wir anhand der ersten Februarwoche 1993 dar, was das Programm leistet und interpretieren die Ergebnisse.

4.1 Die Schnittstelle zu den Eingabe-Daten

4.1.1 Die Fahrtwunschedaten



Die Fahrtwunschannahme nimmt am Telefon die Kundenwünsche entgegen und bucht sie als Fahrtwünsche mit Hilfe des Fahrtwunschannahme-Programmes bzw. storniert eine Buchung. Die drei Kernfragen in der Fahrtwunschannahme sind: Wer ist am Telefon? Wann wollen Sie fahren? Von wo nach wo soll es gehen?

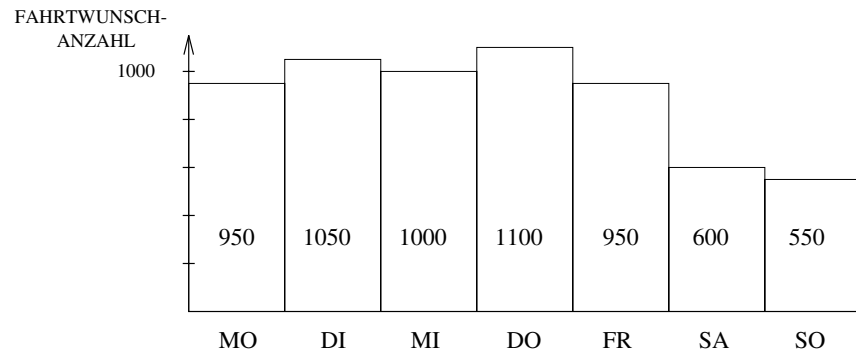
Die Fahrtwunschedaten umfassen aber mehr als die Antworten auf diese drei Fragen. Aus der Analyse der Anforderungen an die Fahrtwunschannahme haben wir einen neuen Fahrtwunschdatensatz (siehe auch im Programm-Listing: `fahrtwunsch.h`) entworfen. Es gibt ein Programm (siehe im Programm-Listing: `fahrtwunsch.c`), das die Fahrtwunschedaten von dem zur Zeit noch benutzten Datenformat in unser neues Format überführt. Aus dem Text wird deutlich, warum dies nur eine vorübergehende Lösung sein kann. Bei der Umstellung auf ein rechnergestütztes Disponieren sollten unserer Ansicht nach der benutzte Fahrtwunschdatensatz und das Fahrtwunschannahmeprogramm unseren Vorschlägen entsprechend geändert werden. Da wir uns in unserer Arbeit auf die Programmentwicklung der Dispositions-Programme konzentriert haben, beschreiben wir an dieser Stelle lediglich die Fahrtwunschedaten, nicht ein Fahrtwunschannahme-Programm.

Anforderungen an die Fahrtwunschannahme

Vorgaben des Senats

- Jeder Fahrtwunsch soll vom Telebus-Service erfüllt werden.
- Falls eine Hin- und Rückfahrt gewünscht wird, soll mit der Hinfahrt auch die Rückfahrt garantiert werden.

- Bis zum Sommer 1992 gab es die Vorgabe: bei 1100 Fahrtwünschen pro Tag ist Schluß. Es gab eine Grobabschätzung nach der Regel: ein Fahrtwunsch pro Stunde pro angemietetes Fahrzeug. Kundenwünsche, für die bei der Grobabschätzung kein Platz vorhanden war, wurden notfalls in Absprache mit dem Kunden zeitlich verschoben oder eben abgelehnt. Zur Zeit ist diese Art der Begrenzung aufgehoben.



1.2. – 7.2. 1993. Gerundete Fahrtwunschanzahl jedes Wochentags.

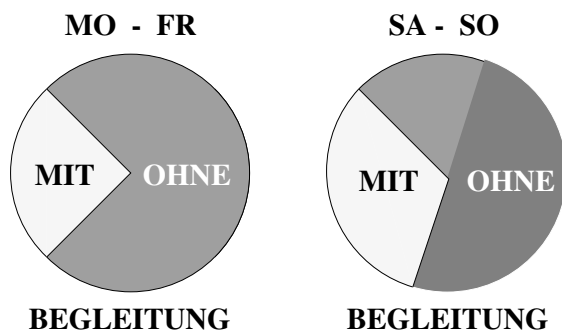
Dies sind Zahlen vom Februar 1993. Seitdem hat sich das Fahrtwunschaufkommen auf bis zu 1.200 erhöht und steigt weiter an.

- Jeder Telebus-Berechtigte hat zur Zeit ein auf 50 Fahrten begrenztes Kontingent an Privatfahrten. Das sind Fahrten, die *nicht* von oder zu der Arbeit, Schule, Therapie oder dem Arzt führen. Aus diversen Gründen ist es Praxis, daß in vielen Fällen der tatsächliche Grund nicht mit dem Buchungsvermerk über den Fahrtzweck übereinstimmt. Weitere Fahrtzwecke, die von der Fahrtwunschannahme aus statistischen Gründen vermerkt werden sollen, sind: Wohnung, Termin, unter 500 Meter.
- Jeder Kunde darf pro Fahrt höchstens eine Begleitperson mitnehmen.

Anforderungen der Behinderten

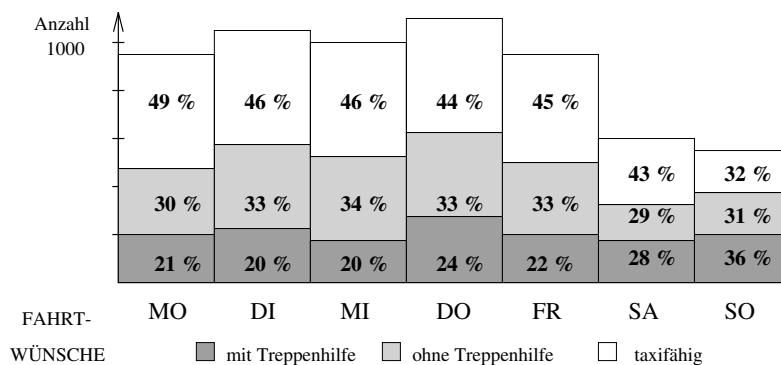
- Fahrtwünsche sind Kundenwünsche. Die Wunschzeit sollte bei der Buchung nicht verändert werden. Aus Sicht der Behinderten wären Wunschzeiten in einem 5-Minuten-Raster optimal, in einem 15-Minuten-Raster vertretbar, größere Raster unannehmbar.
- Wunschzeiten können Abholzeiten aber auch Zielzeiten sein. Bisher ist es üblich, nur Abholzeiten zu erfassen. Bei Fahrten z.B. zur Arbeit, Schule oder zum Arzt geht es den Behinderten aber um die Pünktlichkeit am Ziel. Eine gute Fahrtwunschannahme sollte in solchen Fällen stets die echte Wunschzeit aufnehmen. Ist sie eine Zielzeit, will der Kunde möglichst genau die Abholzeit wissen.

- Behinderte benötigen zuweilen Pflege- oder Hilfspersonal. Sie wollen mit nichtbehinderten Freunden zusammen fahren. Ein Fahrtwunsch kann Begleitpersonen enthalten. Die Vorgabe des Senats beschränkt die Anzahl der Begleitpersonen auf eine einzige. Es kann sich zeigen, daß in bestimmten Fällen Ausnahmen von dieser Regel wünschenswert und sinnvoll sind.



Anteil der Fahrtwünsche mit bzw. ohne Begleitpersonen.

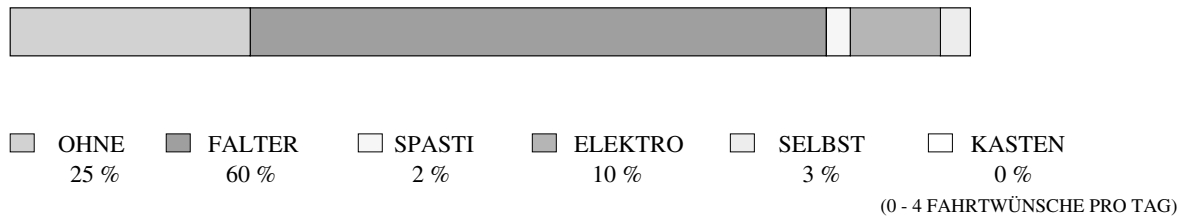
- Der Telebus-Service ist kein reiner Fahrdienst wie der öffentliche Nahverkehr. In vielen Fällen ist ein Zusatzservice nötig oder wird gewünscht. Es geht dabei um Trage- und Hebehilfen oder um Service für die Behinderten durch das Fahrpersonal am Start- oder Zielort. Beispiele dafür sind Treppenhilfen, das Abholen aus der Wohnung oder von Haus- oder Wohnungstüren.



1.2. – 7.2. 1993. Gerundete Fahrtwunschanzahlen in den Anteilen Busbestellungen mit oder ohne Treppenhilfe sowie taxifähige Fahrtwünsche.

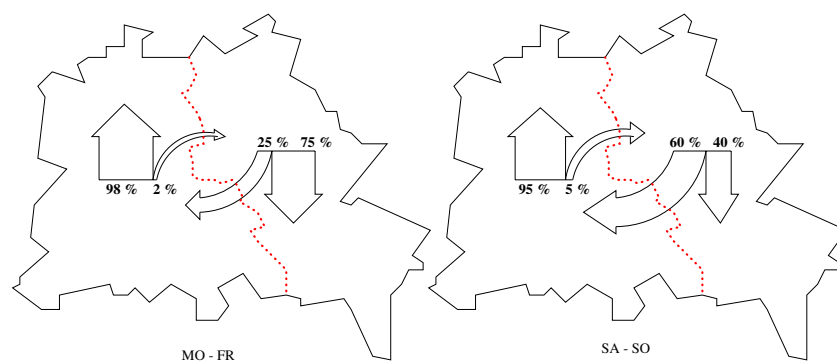
- Die meisten Telebus-Nutzer sind Rollstuhlfahrerinnen und -fahrer. Behinderte verfügen teilweise über mehr als einen Rollstuhl. Es gibt viele verschiedene Rollstuhltypen unterschiedlicher Bauart: Selbstfahrer-, Elektro-, Kasten-, Spastiker- und Faltrollstühle. Einige Behinderte sind außerhalb der Wohnung fest an ihren Rollstuhl

gebunden, sitzen also auch während der Fahrt im Rollstuhl, andere sind umsetzbar. Manche davon können insbesondere im Taxi nur vorne und andere wiederum nur hinten sitzen. Einige müssen unbedingt während der Fahrt liegen.



Anteile der verschiedenen Rollstuhltypen im Gesamtfahrtwunschaufkommen.

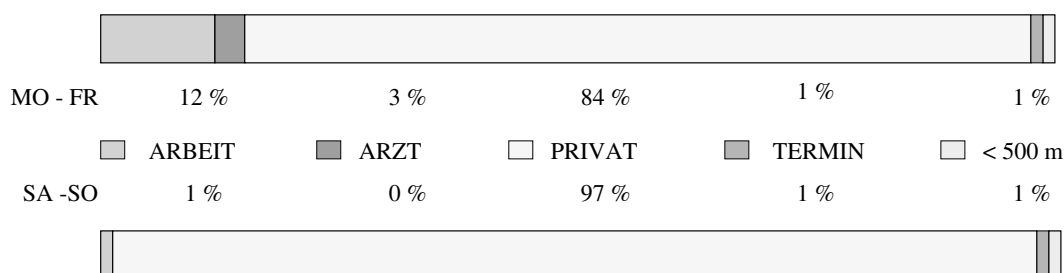
- Der Telebus-Service ist bisher in erster Linie ein Individual-Service. Vereinzelt werden aber auch Gruppen- oder Sammelfahrten gewünscht. Für die Behinderten oder deren Betreuer gibt es dabei zuweilen Gründe, eine feste Konstellation in den Bussen oder eine fest vorgegebene Reihenfolge des Abholens oder Wegbringens zu verlangen.
- Viele Behinderte wollen oder müssen jede Woche oder jeden Monat ähnliche Fahrten machen. Der Telebus bietet dafür als Service die Dauerbuchung an, mit der die festen Fahrten des kommenden Monats beantragt werden. Etwa 30 % (am Wochenende 10 %) der täglichen Fahrtwünsche sind Dauerbuchungen.
- Die meisten Benutzer buchen eine Hin- und Rückfahrt. Diese sind, obwohl es für den Kunden nur *ein* Fahrtwunsch ist, *zwei verschiedene* Fahrten. Ohne die Dauerfahrten sind etwa 60 % der täglichen Fahrtwünsche (am Wochenende 80 %) Hin- und Rückfahrtbuchungen.



Wohnort Ost- und West-Berlin: Anteile der in den anderen Teil der Stadt pendelnden Telebus-Benutzer.

Anforderungen der Abrechnung und Kontrolle

- Um die Abrechnung von Taxifahrten kontrollieren zu können, muß ein Fahrtwunsch die Länge eines guten Fahrtweges vom Start zum Ziel in Kilometern enthalten.
- Arzt- und Arbeitsfahrten werden von der Krankenkasse bzw. den Unternehmen mitfinanziert. Damit die Telebus-Zentrale sich diese Beträge erstatten lassen kann, muß die Fahrtwunschannahme bei entsprechender Buchung diesen Fahrtzweck im Fahrtwunsch vermerken.

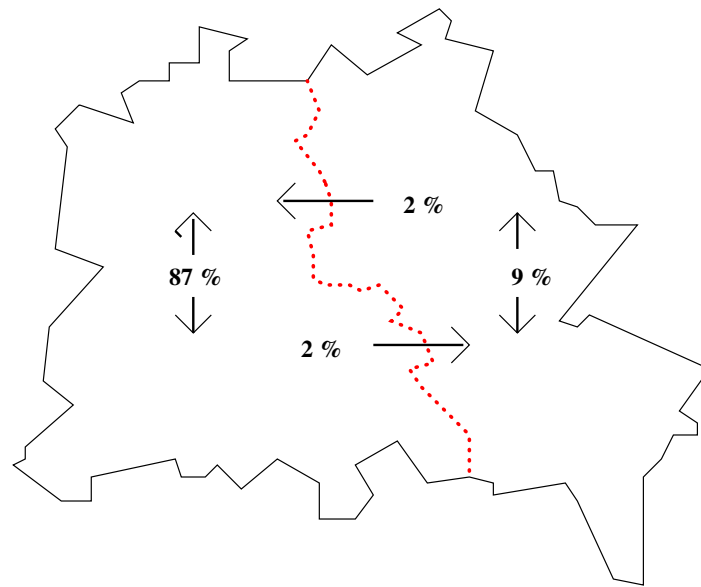


Die Anteile der verschiedenen Fahrtzwecke am Gesamtfahrtwunschaufkommen.

Anforderungen der Disposition

- Weil eine kostengünstige und gleichzeitig kundenfreundliche Disposition nur möglich ist, wenn die vorgegebenen Zeiten leicht variiert werden können, muß aus den Fahrtwünschen für die Disposition ersichtlich sein, welche Zeiten eher termingebunden sind und welche nicht. Der Buchungsvermerk „Fahrtzweck“ ist nicht dazu geeignet, diese Unterscheidung eindeutig zu fällen.
- Die Zeiten für eine Fahrt dürfen aber auch nicht zu stark von den realen Wünschen abweichen. Die große Unbekannte ist die Frage: Ist am Start oder Ziel ein Service notwendig oder gewünscht? Wir wollen, daß neben der Wunschzeit die Zeiten für den Zusatzservice in der Fahrtwunschannahme ermittelt werden. Meist wissen die Behinderten am besten, wie lange der Service in jedem einzelnen Fall dauert. Oft beeinflußt das Wetter die benötigte Zeit. Zum einen beeinflußt es die Möglichkeiten, wo der Behinderte auf den Telebus warten kann, zum anderen leiden viele der Kunden unter Multipler Sklerose und sind erfahrungsgemäß bei Temperaturen über 20° langsamer. Für gut geschultes Telefonpersonal ist es möglich, durch gezielte Fragen die notwendigen Servicezeiten am Start- oder Zielort bis auf 5 Minuten genau zu ermitteln, notfalls unterschieden nach Wetterlage.
- Bei der Tourenplanung und spätestens bei der Fahrzeugzuteilung muß die Disposition wissen, wieviel Fahrpersonal für den jeweiligen Fahrtwunsch benötigt wird.

- Ebenso muß ablesbar sein, welchen Platz in welchem Fahrzeugtyp der Fahrtwunsch beansprucht. Eine kostengünstige Disposition sollte alle Möglichkeiten von Platz- und Fahrzeugkonstellationen für einen Fahrtwunsch berechnen können. Es geht eben nicht nur um eine optimale Zeitausnutzung, sondern auch um die Minimierung von Platz und Fahrzeugkosten.
- Spezielle Anforderungen eines Fahrtwunsches zeitlicher, räumlicher oder personeller Art müssen, wenn sie von der Disposition eine gesonderte Behandlung erfordern, formalisiert vorliegen.



Fahrtwunschströme Ost – West.

Anforderungen der Leitzentrale und des Fahrdienstes

- Neben den zugesagten und geplanten Zeiten und den Orten muß ein Fahrtwunsch für den Fahrdienst und bei Rückfragen für den Funk in der Leitzentrale oftmals genauere Ortsangaben, z.B. Aufgänge, Stockwerke, Kleingartengebiet, enthalten, die am besten als Klartext bei der Fahrtwunschannahme notiert werden. Diese Angaben bilden eine Informationszeile.
- Welche Servicedienste (Trage-, Hebe-, Betreuungshilfen oder Abholen, Begleiten, Wegbringen) genau gewünscht wurden, muß nachvollziehbar sein. Gegebenenfalls sind genauere Ortsangaben und Namen, z.B. auf Klingelschildern oder von bestimmten Treffpunkten, in der Informationszeile zu notieren.

- Die Informationszeile sollte zudem für Hinweise, die den Fahrdienst über die spezielle Behandlung eines Kunden aufklärt, offen sein.
- Für den Fall, daß ein Kunde von der Leitzentrale angerufen werden muß, könnte ebenso an dieser Stelle vermerkt werden, wann und wo er am Vorabend und am laufenden Tag am besten zu erreichen ist.

Die Veränderungen und Neuerungen

Bei der Fahrtwunschannahme geht es neben der Kundenberatung darum, alle wesentlichen Daten der Kundenwünsche gut formalisiert und strukturiert als Fahrtwünsche zu erfassen. Bisher sieht ein Fahrtwunschdatensatz so aus (dies ist die Originaldokumentation der Firma PCDS):

Datentypen :		ch = Character		
		I*2 = Integer (2 Byte)		
		I*4 = Integer (4 Byte)		
Der Offset bezieht sich auf den Offset innerhalb des Datensatzes, bezogen auf den angegebenen Datentyp.				
Name	Offset	Typ	Dim.	Kurzbeschreibung
ODFAWN	1	I*2	1	Fahrtwunsch # (z.Zt. nicht benutzt)
ODFAWZ	2	I*2	1	Zugesagte Abfahrts - Zeit
ODSAKN	3	I*2	1	Startknoten
ODSIKN	4	I*2	1	Startknoten intern
OTSAB	5	I*2	1	Startadresse - Bezirk
OTSAST	40	ch	24	Startadresse - Strasse
OTSAHN	64	ch	8	Startadresse - Hausnr.
ODZIKO	6	I*2	1	Zielknoten
ODZIKN	7	I*2	1	Zielknoten intern
OTSAB	8	I*2	1	Zieladresse - Bezirk
OTSAST	72	ch	24	Zieladresse - Strasse
OTSAHN	96	ch	8	Zieladresse - Hausnr.
ODTENF	9	I*2	1	Theoret. Entfernung
ODFART	104	ch*	1	Fahrtart (HIN,RUECK,EINFACH,STORMO,...)
ODHIZA	105	ch	1	*** reserved ***
OTFARZ	106	ch*	1	Fahrtzweck (Arzt,Arbeit,Schule,...)
OTKOST	107	ch	1	Kostentraeger 1 (z.Zt. nicht benutzt)
OTBGLT	108	ch*	1	Begleitpersonal (Y/N)
OTDIPL	109	ch	1	Disponentenplatz (= TTx:)
OTBUID	10	I*2	3	Buchungsdatum T,M,J
OTBUIZ	110	ch	8	Buchungszeit HH:MM:SS
OTZUSI	118	ch	30	Zusatz - Info
OTCHAN	124	ch	2	Telefon Kanalnummer
OTBENU	13	I*4	1	Berechtigtennr.
OTTELN	15	I*4	1	Telefonnr.

OTBENA	150	ch	24	Berechtigten - Name
OTWOKN	18	I*2	1	Wohnknoten
OTWOKI	19	I*2	1	Wohnknoten intern
OTWOBE	17	I*2	1	Wohnadresse - Bezirk
OTSAST	174	ch	24	Wohnadresse - Strasse
OTSAHN	198	ch	8	Wohnadresse - Hausnr.
OTROST	206	ch*	1	Rollstuhltype
OTHILF	207	ch*	1	Hilfe benoetigt (Y/N)
OBEDAT	210	ch	6	Datum Ber. eingetragen (fuer Wertmarke)
OTCPLD	39	ch*	1	Taxi-Service Benutzer
ODDABZ	115	I*2	1	reserved
ODDANZ	116	I*2	1	reserved
ODDEAZ	117	I*2	1	reserved
ODBUW	118	I*2	1	reserved

Die ch* gekennzeichneten Datenformate sind nicht, wie dokumentiert, Character, sondern Integer.

Es fällt auf, daß viele der Anforderungen nicht formalisiert sind und die wichtigsten Daten für eine gute rechnergestützte Disposition nur geschätzt, aus einer unformalisierten Infozeile gelesen oder gar nicht ermittelt werden können.

Unser Entwurf (siehe nächste Seite) folgt dagegen dem Gedankengang: Der Kunde ist König — Die Disposition muß die echten Kundenwünsche als formalisierte Daten haben — Strukturiere die Daten nach dem Sinnzusammenhang: Disposition – Abrechnung – Funk und Fahrdienst.

Die Informationszeile heißt bei uns „Klartext-Hinweise für Fahrer und Funk“. Dort sollen keine Informationen für die Abrechnung oder die Disposition stehen. Rechnergestütztes Disponieren und Abrechnen sind Rechenaufgaben und keine Lese- und Schreibübungen. Die Abrechnung benötigt direkt aus den Fahrtwünschen nur den Hinweis, ob es eine Arzt- oder Arbeitsfahrt war. Die Information über die Länge des Fahrtweges für die Kontrolle von Taxirechnungen kann genauso wie bei der Disposition von Fall zu Fall ohne Aufwand berechnet werden. Die restlichen Daten im rechten Feld sind für die Statistik. Uns interessiert die linke Seite.

Eine Veränderung bei der Fahrtwunschannahme soll sein, daß Wunschzeiten nicht nur Start- sondern auch Zielzeiten sein können. Das gab es schon einmal. Es wurde nach kurzer Zeit wieder aufgegeben, weil angeblich die Fahrtwunschannahme damit überfordert war und die Behinderten durcheinanderkamen mit den Zeiten. Wir glauben, daß ein qualifiziertes Telefonpersonal das problemlos schafft. Bei der Bahn oder im Reisebüro geht es doch auch. Die meisten Kunden beim Telebus sind geistig wach genug, um sich auch zwei Zeiten, die Abholzeit am Start und die Ankunftszeit am Ziel, merken oder notieren zu können.

Die entscheidende Neuerung in der Fahrtwunschannahme soll die Erfassung der benötigten Servicezeiten sein. Nur durch diese Formalisierung ist unserer Ansicht nach eine ko-

FAHRTWUNSCHDATEN					
KUNDE	Name Berechtigten-Nummer Telefon-Nummer(n)			DATUM	Tag.Monat.Jahr
FW-NUMMER	4stellige Zahl			BUCHUNGS-ART	Einfach Hinfahrt Rückfahrt Dauer
STARTZEIT	Uhrzeit	ZIELZEIT	Uhrzeit	FAHRTZWECK	AM START AM ZIEL
STARTADRESSE	Bezirk Knoten Strasse Hausnummer	ZIELADRESSE	Bezirk Knoten Strasse Hausnummer	Wohnung Arbeit Therapie Schule Arzt Freizeit unter 500 m Termin	
PÜNKTLICHKEIT				FAHRT-ART	Einzelfahrt Sammelfahrt Gruppenfahrt
AM START	nicht früher	pünktlich	nicht später		
AM ZIEL	nicht früher	pünktlich	nicht später		
SERVICEZEIT					
AM START	Zeit				
AM ZIEL	Zeit				
BEGLEITER-ANZAHL	1stellige Zahl				
FAHRER-ANZAHL	1stellige Zahl				
ROLLSTUHLTYP	ohne mit	Rollstuhl Falt-Rollstuhl Spastiker-Rollstuhl Elektro-Rollstuhl Selbstfahrer-Rollstuhl Kasten-Rollstuhl		KLARTEXT-HINWEISE FÜR FAHRER UND FUNK	
FAHRZEUGTYP	Taxi Bus Taxi oder Bus				
SPEZIALFALL-NR	3stellige Zahl				

stengünstige Disposition rechnergestützt möglich, wenn sie gleichzeitig den Kunden gerecht werden will. Ohne sie wird mit Schätzwerten gearbeitet, die von einer guten Disposition immer leicht variiert werden, dann aber schnell in ihrer Aufsummierung innerhalb einer Tour zu Ungenauigkeiten führen, die entweder unnötige Kosten oder unverantwortbare Verspätungen und Bereithaltezeiten für die Behinderten bedeuten. Unser Konzept und Programmmentwurf sieht vor, daß ein Fahrzeug pünktlich ist, wenn es höchstens ± 5 Minuten verspätet oder zu früh vor Ort ist. Zur Zeit ist die Bereithaltezeit bis zu einer Stunde lang. Wir sehen die Chance, durch das explizite Erfassen der sonst schwer abschätzbaren Servicezeiten mehr Pünktlichkeit und weniger Kosten bei gleicher Leistung miteinander zu vereinbaren.

Die Frage, ob Pünktlichkeit am Start oder Ziel erforderlich ist oder gewünscht wird, ist bisher Ermessenssache der Disponenten. Wir wollen diese Frage in der Fahrtwunschannahme

klären, weil sie entscheidend für einen guten Kundenservice ist. Die Antwort soll aber nicht nur lauten: Ja oder Nein. Alle Ja-Antworten würden bei der Disposition ein Herumspielen mit Zeiten verhindern, obwohl der Kunde mit seinem Wunsch z.B. nach Pünktlichkeit am Ziel nur sagen wollte: Ich darf nicht zu spät kommen. Es soll vier Möglichkeiten geben:

1. pünktlich wie gewünscht,
2. nicht früher,
3. nicht später als gewünscht,
4. egal.

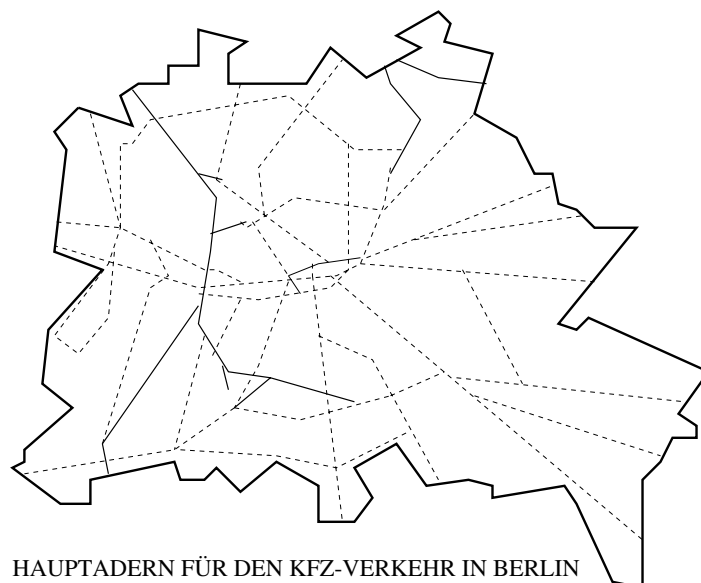
Wenn wir sagen, „Pünktlich“ bedeutet höchstens ± 5 Minuten verspätet oder zu früh vor Ort, „Nicht früher“ bedeutet, das Fahrzeug ist zur Wunschzeit oder höchstens 10 Minuten zu spät vor Ort, „Nicht später“ bedeutet, das Fahrzeug ist zur Wunschzeit oder höchstens 10 Minuten zu früh vor Ort, und „egal“ bedeutet, auf ± 15 Minuten genau, dann kann die Telebus-Zentrale kostengünstiger disponieren, ohne die Kundenwünsche zu mißachten.

An unserem Fahrtwunschdatensatz ist ansonsten die strukturierte Auflistung der möglichen Anforderungen, inklusive möglicher Spezialfälle, neu. Bisher werden diese von der Disposition aus Erfahrung, aus der Kombination verschiedener Daten im Wechselspiel mit den Informationen aus der Informationszeile oder gar nicht berücksichtigt.

4.1.2 Der Stadtplan

Die Disposition in der Telebus-Zentrale läuft bisher per Hand. Der Stadtplan hängt an der Wand, und die meisten Disponenten haben aus langjähriger Fahrpraxis und durch die täglichen Rückmeldungen am Funk ein Bild vom Straßennetz Berlins im Kopf.

Die Telebus-Zentrale besitzt für den Westteil Berlins einen von der Studiengesellschaft für Nahverkehr (SNV) entwickelten digitalisierten Stadtplan (521 Knoten). Für den Ostteil ist bis heute nur eine Minimal-Version installiert (87 Knoten). Die komplette Version des SNV enthält 828 Knoten für ganz Berlin. Ein Knoten steht jeweils für eine Menge von Straßenzügen. Jeder Knoten hat zwei Nummern: eine laufende Nummer und eine Knotennummer, die begrenzt über die Lage eines Knotens Auskunft geben kann. Die Knotennummer setzt sich zusammen aus einer Sektornummer und einer zweistelligen Endnummer. Die Stadtmitte ist der Sektor 0. Von ihm gehen im Modell Strahlen aus, die Berlin sternförmig aufteilen: im Westen in die Sektoren 1 bis 9, im Osten in die Sektoren 10 bis 17. Die Endnummern im Sektor 0 sind ohne Ordnung, die in den Sektoren 1 bis 17 von der Stadtmitte aus zum Stadtrand hin aufsteigend geordnet. Die Knoten sind mit Kanten verbunden. Sie



entsprechen Wegen, die dem Kraftfahrzeugverkehr offen stehen. Jede Kante hat als Bewertung eine Länge (Wegstrecke in Meter), eine Geschwindigkeit (3/25/32/40/60/65 km/h) und die daraus errechnete Fahrzeit (Zeit in 1/10 Minute).

Für unsere Arbeit standen uns leider nicht das Programm und die Datei zur Verfügung, die jeder Adresse einen der 828 Knoten eindeutig zuordnet. So konnten wir bisher nur mit der Entfernungs- und der Fahrzeitentabelle des im Osten noch ungenauen Stadtplans arbeiten (siehe im Programm-Listing: `netz.h` und `netz.c`). Als Zugriffsoperationen haben wir dementsprechend lediglich die Funktionen `entfernung(Startknoten,Zielknoten)`, `fahrzeit(Startknoten,Zielknoten)` und `fahrzeit_aufgerundet(Startknoten,Zielknoten)` implementiert. Die letzte Funktion ist parametergesteuert. Ein Parameter `FAHRZEIT_RUNDUNG`¹ kann gesetzt werden (z.B. auf 10 Minuten) und rundet dementsprechend die eingetragene Fahrzeit auf. Diese Aufrundung ist für eine realistische Disposition notwendig, weil der digitalisierte Stadtplan bisher nicht gewartet, d.h. stets aktuell gehalten, wird und viele der eingetragenen Fahrzeiten nach Aussage der Disponenten kleiner als die realen Fahrzeiten sind.

Ein digitaler Stadtplan muß nicht nur gewartet werden. Für eine rechnergestützte Disposition in der Telebus-Zentrale wäre es gut, z.B. auf Grundlage des kompletten SNV-Stadtplanes eine problemspezifische Erweiterung zu modellieren. Unsere Ideen dafür sind:

1. Es lohnt sich, Spezialorte, z.B. Einrichtungen für und Treffs von Behinderten, die häufig angefahren werden, als zusätzliche Knoten in das Netz einzufügen. Dies ist

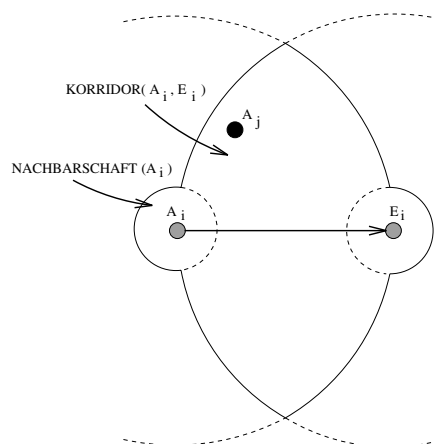
¹Alle Parameter, die wir erwähnen, sind in der Datei `parameter.h` definiert, s. Listing im Anhang B

hilfreich für spezielle Zeitabschätzungen, die vom Ort abhängig sind, und ermöglicht bessere Methoden, um Sammelfahrten zu disponieren.

2. Es gibt Orte in Berlin, die für den Fahrdienst ein Problem darstellen, z.B. Kleingartengebiete, enge Straßen und Sackgassen. Für die Disposition schränken diese Orte die Möglichkeiten der Fahrzeugeinsatzplanung ein. Es lohnt sich, auch diese als Zusatzknoten ins Modell aufzunehmen oder vorhandene entsprechend zu markieren.
3. Die Kantenwerte *Geschwindigkeit* und *Fahrzeit* sollten verfeinert werden. Die beste Variante ist, bezogen auf Wochentage und Uhrzeiten verschiedene Geschwindigkeiten einzutragen, die bei der Abfrage der Fahrzeit berücksichtigt werden können. Eine zweite Idee kommt aus Wien: Dort hat jeder Bus ein Lesegerät, das die Fahrdauer zwischen Ein- und Ausstieg einer Person festhält. Dies sind Meßdaten von echten Fahrzeiten, die nicht nur für die Abrechnung und Kontrolle gut sind. Es könnte ein Programm entwickelt werden, das mit Hilfe dieser Meßdaten in regelmäßigen Abständen den digitalen Stadtplan auf den neuesten Stand bringt.
4. Eine andere Variante wäre, sich nach den Angaben des Verkehrsfunks und den Rückmeldungen in der Leitzentrale einige Kanten als Staustrecken für bestimmte Wochentage und Uhrzeiten zu markieren. Diese Variante ist leichter zu verwirklichen als die vorherige. Sie löst das Problem, in der Fahrzeitabschätzung realistisch zu sein, durch das Hineinnehmen der Sonderfälle in den Stadtplan. Die normale Varianz der Fahrzeiten bezüglich der Wochentage und Tageszeiten würde man in diesem Fall über eine Faktorisierung der durchschnittlichen Fahrzeiten, also über eine Parametersteuerung, modellieren, ohne das Stadtplanmodell verfeinern zu müssen. Diese Variante hat einen guten Nebeneffekt: Eine ständige Wartung des Stadtplans durch die Leitzentrale oder die Disposition.
5. Das System der Knotennumerierung gibt über die geographische Lage eines Knotens nicht zuverlässig Auskunft. Man könnte sich viele Rechnungen sparen, wenn das der Fall wäre. Unser Vorschlag dafür ist: Das Sternsystem der Sektoren sollte zu einem Spinnennetzsystem umgearbeitet werden. Die meisten großen Verkehrsadern verlaufen in Berlin schon sternenförmig von der Mitte nach außen. Es gibt aber auch einige Hauptadern die quer dazu verlaufen. Optimal wäre eine Knotennumerierung im Spinnennetzsystem, die die geographische Nähe zweier oder mehrerer Knoten einfach aus der Differenzbildung zwischen ihren Knotennummern preisgeben würde. Zudem erscheint es uns sinnvoll, die gewachsenen Zusammenhänge (Stadtbezirke) als zusätzliche Knotenmarkierung zu speichern. Viele Grobabschätzungen ließen sich über diese zusätzliche Knotenbewertung bewerkstelligen. Das Netz der Bezirke könnte man auch als gesonderten Meta-Stadtplan für viele Teilprobleme oder schnelle Grobabschätzungen auf dem Graphen benutzen.

6. Eine andere Art Meta-Stadtplan oder eine problemspezifische Modellierung des gesamten Stadtplans läßt sich aus einer gründlichen Analyse der geographischen Verteilung des Fahrtwunschaufkommens ableiten. Eine Möglichkeit ist: Nimm den Stadtplangraphen und markiere darin alle Knoten und Kanten, die an einem Tag nach Vorgabe eines guten Tourenplans an- bzw. abgefahren werden. Jeder Besuch eines Knotens und jedes Befahren einer Kante erhöht deren Wert um 1. Man erhält ein Teilnetz des Stadtplans, das die problemspezifischen Strukturen preisgibt. Je feiner die Vorgabe ist, z.B. nur 2 Stunden eines Tages, desto besser läßt sich eine Nutzungsstruktur erkennen. Analysen dieser Art können zu der Entwicklung eines Telebus-Stadtplans führen. Wenn man nicht so weit gehen will, wären diese Analysen zumindest ein wichtiges Hilfsmittel für eine gute Verfeinerung des vorgegebenen Modells.

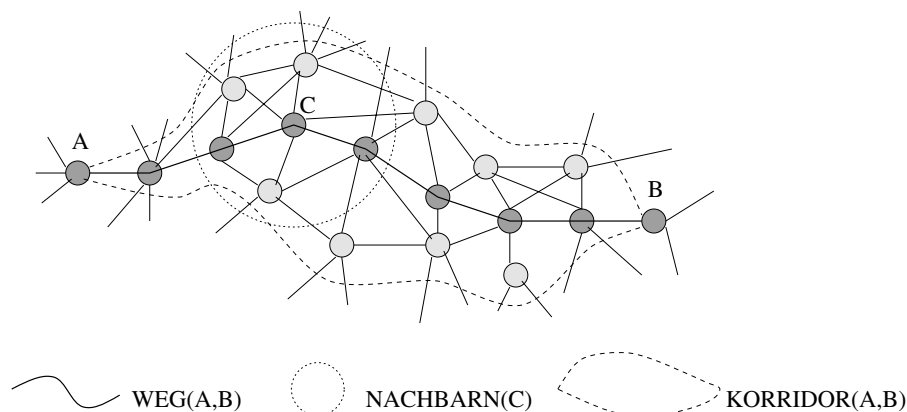
Eine gute Stadtplanmodellierung steht noch aus. Zwei Dinge haben wir für die Fahrtwunschverknüpfungsprogramme provisorisch entwickelt. Für eine regionale Aufteilung großer Sammelfahrten, die mehr als einen Bus benötigen, haben wir uns einen einfachen Meta-Stadtplan mit 8 Regionen definiert (siehe Kapitel 5.2. und `einzel_bestellung.c`). Damit bei den Ein- und Anbindungen zumindest beschränkt geographische Kriterien berücksichtigt werden, haben wir in `netz.c` zwei Prädikate `benachbart` und `liegt_im_korridor` implementiert. Durch den Zirkelschlag der Fahrzeiten haben wir versucht, etwas Geometrie ins Programm zu bringen.



In der Hoffnung, daß entweder alle Fahrtwünsche, auch die im Osten, bald die Knotennummern des kompletten SNV-Stadtplans enthalten oder uns zumindest die Straßen-Knoten-Tabelle (`strass.dat`) zur Verfügung steht, haben wir einen abstrakten Datentyp Stadtplan (siehe `stadtplan.h`) und Operationen darauf (siehe `stadtplan.c`) bereits implementiert. Wenn wir in unserem Entwurf von Stadtplan reden, sind das zur Zeit die Module

`netz.h` und `netz.c`; so schnell wie möglich sollten diese ersetzt werden durch die Module `stadtplan.h` und `stadtplan.c`. Wir wollen an dieser Stelle nicht die einzelnen Operationen vorstellen, die im neuen Stadtplanmodul bereits implementiert sind. Wir wollen sie aber nennen und aufzeigen, welche Qualitätsverbesserung dieser Modulwechsel mit sich bringen wird.

Der entscheidende Unterschied zwischen dem Disponieren auf Grundlage einer Entfernungstabelle einerseits und andererseits dem Disponieren auf einem Graphen, ist: Im Graphen kennen wir die Kanten und Zwischenknoten. Es lohnt sich, für die Disposition alle kürzesten Wege, bezogen auf die Fahrzeit und auf die Entfernung, vorab zu berechnen (Algorithmus von Floyd). Dies sind auch Matrizen, aber aus ihnen lassen sich alle Knoten und Kanten auf einem Weg zwischen zwei anderen Knoten direkt ablesen und nicht nur die Entfernung und Zeit zwischen ihnen. Wir haben Operationen implementiert, die Nachbarn, Umkreise, Wege und Korridore zwischen zwei gegebenen Knoten im Stadtplan-Graph markieren. Gerade zum Finden von guten Ein- und Anbindungen ist eine Frage zentral: was liegt geographisch in der Nähe des Weges, der von einem Knoten A zu einem Knoten B führt.



Auf ein Problem muß an dieser Stelle noch hingewiesen werden: Das Postleitzahl-Problem. Seit dem 1. Juli 1993 gelten die neuen Postleitzahlen. Dies bedeutet technisch, daß alle Dateien und Programme in der Telebus-Zentrale, die mit Postleitzahlen arbeiten, geändert werden müssen. Für die Menschen in der Telebus-Zentrale und im Fahrdienst stellt sich dabei die Frage: Umlernen oder Ignorieren? Die Disponenten denken in den Namen der Stadtbezirke aber auch viel in den alten Zustellnummern der Bezirke. Bei unserer Programmentwicklung lernten wir auch darin denken. Auf dem B-Plot stehen zur Zeit als Kürzel in jeder Tour die bald ungültigen Postzustellnummern. Wir wollen nicht die neuen dort eintragen, weil sie für die Leitzentrale keinerlei Orientierungshilfe bedeuten. Über Monate würde in der Zentrale und am Funk ein Zahlenwirrwarr herrschen. Wir meinen, Menschen sollten miteinander in Worten und nicht in Zahlen reden. Unser Vorschlag ist: In allen Aus-

drucken und Anzeigeprogrammen auf dem Bildschirm steht der Bezirksname. Im Rechner wird mit den Postleitzahlen gerechnet.

4.1.3 Die Fahrzeugdaten

Die Angaben über die zur Verfügung stehenden Fahrzeuge verteilen sich bisher auf verschiedene Zettel, Tabellen und Datensätze in der Disposition, der Abrechnung und bei der Geschäftsführung. Sie besitzen unterschiedliche Verschlüsselungssysteme, die allesamt Ausnahmen von der jeweiligen Regel enthalten. Entschlüsselt man die verschiedenen Tabellen, Zettel und Datensätze, so tauchen widersprüchliche Angaben auf. Es gibt in diesem Wirrwarr nur eine Zahl, auf die man sich verlassen kann: die Fahrzeugnummer. Seit es den Telebus-Service gibt, teilt er jedem Fahrzeug vor seinem ersten Einsatz eine eindeutige Fahrzeugnummer zu, um am Funk jedes Fahrzeug eindeutig rufen zu können.

Ausgehend von den Fahrzeugnummern, haben wir uns aus den widersprüchlichen Tabellen, aus Abrechnungsdaten und Gesprächsnotizen eine provisorische *Fahrzeug-Stammdatei* zusammengestellt, die alle derzeit zur Verfügung stehenden Busse enthält. Die Taxis haben wir zunächst vernachlässigt, weil wir bei unserer Disposition die Taxitouren keinen festen Fahrzeugen zuteilen wollen. Taxidisposition ist ein anderes Problem als Busdisposition. Unsere Fahrzeug-Stammdatei ist provisorisch, weil wir bisher nur die für die Disposition wichtigen Daten aufgearbeitet haben. Sie ist ein Novum, weil in ihr alle Daten über das vollständige Fahrzeugangebot für den Telebus-Betrieb zusammengefaßt werden sollen.

FAHRZEUG-STAMMDATEN					
NAME	Name des Anbieters Anschrift Telefon-Nummer	BEZIRK	Bezirksname	DEPOTKNOTEN	laufende Nummer Knotennummer
FAHRZEUGNUMMER	3stellige Zahl			MIT DEPOTANFAHRT	Ja/Nein
FABRIKAT	Name			BEVORZUGTE	
BAUJAHR	3stellige Zahl			EINSATZART	2 Fahrer 1 Fahrer Ersatz
KM-STAND	6stellige Zahl			SCHICHTART	1 x 10 1 x 8 2 x 8
EIN-/AUSSTIEGS-ART	Hebebühne Rampe Heck absenkbar			FLEXIBILITÄT	
KAPAZITÄT	6 Varianten			BEI DEN RAHMENZEITEN	Zeit
				BEI DER SCHICHTLÄNGE	Ja/Nein
				BEI DER FAHRERANZAHL	Ja/Nein
				PREIS PRO STUNDE	1 Fahrer 2 Fahrer
				Wochentag	
				Feiertag	
				Vorfesttag	

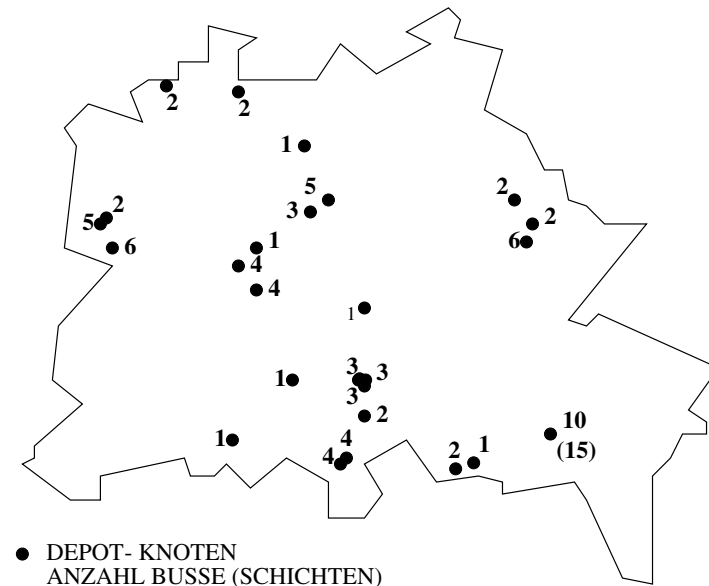
Unsere Fahrzeug-Stammdatei enthält alle zur Zeit beim Telebus-Fahrdienst unter Vertrag

stehenden Bus-Anbieter und deren Fahrzeuge. Sie ist alphabetisch nach den Anbieternamen und pro Anbieter nach Fahrzeugen geordnet. Anbieterdaten sind Name, Bezirk und Depot. Fahrzeuggebundene Daten sind die Fahrzeugnummer, das Fabrikat, Baujahr, Kilometerstand, die Ein- und Ausstiegsart und die Kapazität. Die restlichen Angaben sind Daten, die bisherige Gewohnheiten widerspiegeln und später alle Informationen über ausgehandelte Flexibilitätsszusagen enthalten.

Für eine kostengünstige Disposition, die vom Kunden ausgeht, ist die Flexibilität bei den Einsatzformen und -zeiten eine Grundvoraussetzung. Bei einem starren Fahrzeugangebot wird der billigste Tourenplan am Ende doch wieder teuer, wenn an dem Tag nicht zufällig Angebot und Nachfrage identisch sind. Zu den einzelnen für die Disposition wichtigen Posten in dem Fahrzeug-Stammdatensatz ist folgendes anzumerken:

Die Kapazität eines Fahrzeugs ist nicht einfach die Anzahl an Sitz- und Rollstuhlplätzen, die es bereithält. Es müssen die Varianten der Rollstuhlkombinationen, die jeweils ein Maximum darstellen, vermerkt werden. Nach den uns vorliegenden Tabellen reichen sechs solcher Varianten aus, um alle Möglichkeiten anzugeben.

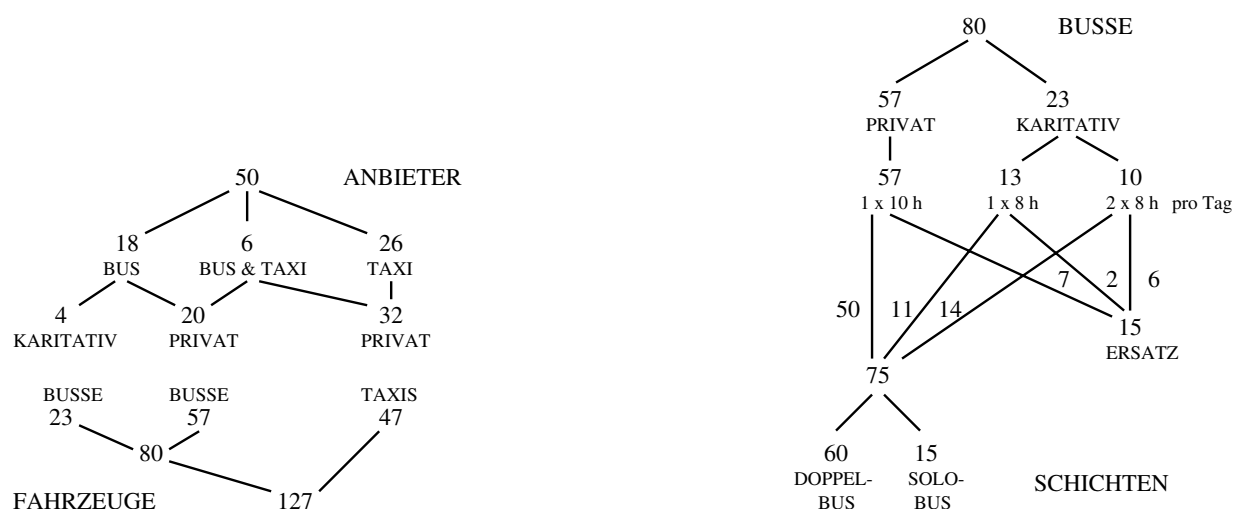
Die Depotfahrten zu Beginn und Ende einer Tour werden bisher bezahlt. Die Handdisposition richtet ihre Touren nach den Depotorten aus. Geht man aber wie wir von den Touren aus, denen Fahrzeuge zugeordnet werden sollen, fällt auf, wie ungünstig viele Depots liegen.



Verteilung der Busdepots in Berlin.

Für uns sind die Fahrzeug-Stammdaten lediglich Eckdaten, die den Rahmen dafür vorgeben, wie ein Fahrzeug eingesetzt werden *kann*. Deshalb sehen wir vor, daß es auch Fahrzeuge geben kann, deren Depotfahrten nicht zur Schicht hinzugerechnet werden sollen.

Bei der Einsatzart unterscheiden wir zwischen regelmäßig genutzten Fahrzeugen und deren gewöhnlicher Besatzung mit einem oder zwei Fahrern und Ersatzfahrzeugen. Die Schichtform bei den privaten Anbietern ist meist eine Zehnstunden-Schicht. Bei den karitativen Anbietern sind es Achtstunden-Schichten, wobei einige Fahrzeuge an einem Tag zweimal, früh und spät, eingesetzt werden.



Zahl der Anbieter und ihrer Fahrzeuge. Zahl der verfügbaren Busse, umgerechnet auf Schichten.

Wesentlich für eine optimale Zuordnung ist eine gewisse Flexibilität bei den Einsatzformen und -zeiten. Wir unterscheiden an dieser Stelle zwei Arten der zeitlichen Flexibilität: Wie weit kann die bevorzugte Schichtart als Ganzes verschoben werden? Ist die Schichtlänge fest oder kann die Schicht gestaucht oder erweitert werden? Die Fahrzeugzuteilung sollte einen Tourenplan nur unerheblich verteuern. Dazu gehört, daß neben der Flexibilität bei den Schichtformen und konkreten Einsatzzeiten auch die Anzahl der Fahrer auf dem jeweiligen Fahrzeug variieren kann. Bisher herrscht die Mentalität vor, daß Fahrer und Beifahrer mit einem Fahrzeug eine feste Einheit bilden. Die Anbieter beim Telebus sind bisher kein Markt, sondern ein Traditionsverein.

Bezogen auf einen konkreten Tag, gibt es als Vorgabe bisher eine Buseinsatzdatei (**be.dat**). Ihre Informationen werden lediglich für den B-Plot-Vordruck in den Rechner eingegeben. Die verwertbaren Daten in dieser Datei sind aber für jedes angemietete Fahrzeug nur die Fahrzeugnummer, die Fahrer-Anzahl und die für diesen Tag vereinbarte Schicht-Anfangszeit und Schicht-Endzeit.

Wir wollen für jeden Tag eine Fahrzeug-*Tagesdatei* besitzen, die nach der Tourenplanung eine optimierte Fahrzeugzuteilung ermöglicht. Wir müssen also in einer Datei neben den Daten Fahrzeugnummer, Fahrer-Anzahl und Anfangs- und Endzeit auch Daten über die

Ein- und Ausstiegsart und die Kapazitätsvarianten speichern. Vor allem aber müssen wir den Preis pro Stunde wissen, den das Fahrzeug an diesem Tag kostet.

FAHRZEUG-TAGESDATEN					
FAHRZEUGNUMMER	3stellige Zahl		ANGEMIETET	Ja/Nein	
EIN-/AUSSTIEGS-ART	Hebebühne Rampe Heck absenkbar		MIT DEPOTFAHRTEN	Ja/Nein	
FAHRER-ANZAHL	1stellige Zahl		FLEXIBILITÄT		
			BEI DEN RAHMENZEITEN	Zeit	
			BEI DER SCHICHTLÄNGE	Ja/Nein	
KAPAZITÄT	6 Varianten		BEI DER FAHRERANZAHL	Ja/Nein	
PREIS PRO STUNDE	1 Fahrer	2 Fahrer	SCHICHT-ANFANGSZEIT	Uhrzeit	
	5stellige Zahl	5stellige Zahl	SCHICHT-ENDZEIT	Uhrzeit	
			SCHICHT-DAUER	Zeit	
			SCHICHT-ANFANGSDEPOT	Knotennummer	
			SCHICHT-ENDEPOT	Knotennummer	

Ein *angemietetes* Fahrzeug wird bei einer Zuteilung anders behandelt und bewertet werden müssen, als ein an diesem Tag *nicht* angemietetes, aber zur Verfügung stehendes Fahrzeug. Wie flexibel das Fahrzeug nicht nur gewöhnlich, sondern an diesem konkreten Tag zuteilbar ist, sollte in der Fahrzeug-Tagesdatei für jedes Fahrzeug vermerkt sein.

BUS- Anzahl	gesamt = 90					
	gross = 69			klein = 21		
	47	8	14	13	7	1
	Doppel	Solo	Ersatz	Doppel	Solo	Ersatz
Preis pro Stunde	74,80	55,40		65,70	46,30	

Anzahl und Stundenpreise der einzelnen Bustypen.

Zur Zeit stellt das Modul `buseinsatz.c` eine Prozedur `erzeuge_fahrzeug_angebot` zur Verfügung. Darin erzeugen wir aus *unserer* Fahrzeug-Stammdatei ein flexibles Fahrzeugangebot für einen Tag. Anschließend werden aus der bisher für den B-Plot-Ausdruck verwendeten Buseinsatzdatei `be.dat` des entsprechenden Tages die verwertbaren Daten gelesen. Die Fahrzeuge der Buseinsatzdatei werden in dem Fahrzeugangebot als angemietet gekennzeichnet und deren Fahreranzahl und Einsatzzeiten übernommen. Diesen zweiten Schritt kann man aber auch weglassen, z.B. wenn man Modellrechnungen für verschiedene Fahrzeugangebote erhalten will.

Wir haben uns aus zwei Gründen die Arbeit gemacht, einen *Fahrzeug-Stammdatensatz* und einen *Fahrzeug-Tagesdatensatz* zu entwickeln. Einerseits, um Modellrechnungen machen zu können. Wir wollen ja gerade erst herausbekommen, wie eine Anmietung aussehen kann, die sich nach den Kundenwünschen richtet. Andererseits benötigt eine gute Disposition jederzeit die komplette Marktübersicht und nicht nur das Tagesangebot.

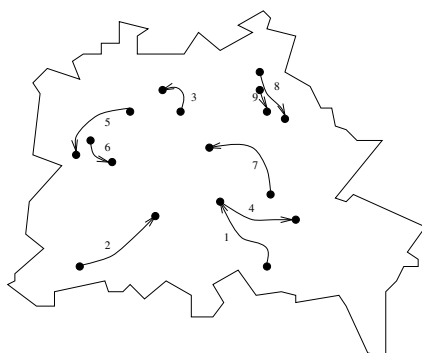
Der Tagesdatensatz ist in unserem Programm keine Datei, sondern ein Vektor (Feld), der bei der Fahrzeugzuteilung erzeugt wird. Dies ist nur eine behelfsmäßige Lösung, denn die Fahrzeugdaten eines Tages sind nicht nur für die Disposition wichtig, sondern auch für den Funk, für die Abrechnung und die Geschäftsführung. Unser Vorschlag ist, das Datenwarrwarr beim Telebus gerade bei den Anbieter- und Fahrzeugdaten zu entwirren und, basierend auf unseren Entwürfen, einen gut strukturierten *Anbieterdatensatz* zu entwickeln, der vor allem die kaufmännische Seite enthält, und die *Fahrzeugdaten* zweifach zu speichern: Als Stammdatensatz und als Tagesdatensatz. Die *Fahrzeugdatei* enthält in unserem Entwurf also zwei Dateien.

4.2 Die beiden grundlegenden Datenmodelle und ihre Implementierung

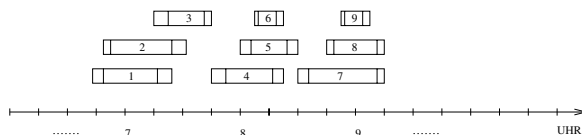
4.2.1 Das Modell für das Disponieren

Die hauptsächlichen Eingabedaten für das Dispositionsprogramm sind die Fahrtwünsche. Sie enthalten unter anderem die für die Disposition wichtigen Informationen; einige Informationen fehlen aber, z.B. die Ein- und Ausstiegszeiten, die entsprechend der Parametereinstellung berechnet werden, und damit die genaue Zielzeit. Andere Informationen im Fahrtwunschdatensatz hingegen interessieren die Dispositionsprogramme nicht, z.B. die persönlichen Daten des Kunden, die abrechnungstechnischen Informationen oder die Klartext-Hinweise. Aus jedem Fahrtwunschdatensatz werden deshalb zunächst die für die Disposition wichtigen Informationen extrahiert, und es werden fehlende Informationen neu berechnet. Aus den Fahrtwünschen werden *Bestellungen*, und zwar zunächst *Einzelbestellungen*: Jede Bestellung entspricht genau einem Fahrtwunsch.

Wie können wir uns diese Einzelbestellungen nun vorstellen? Es gibt zwei Sichtweisen. Die eine Sichtweise ist die Vogelperspektive: Berlin von oben. Die Bestellungen haben jeweils einen Anfangsort, einen kürzesten Fahrtweg und einen Endort.



Die zweite Sichtweise ist die Anordnung der Bestellungen nach ihren Anfangszeiten. Entlang einer Zeitachse von 5 Uhr morgens bis 1 Uhr nachts reihen sich die Bestellungen mit ihren von den Kunden gewünschten Anfangs- und Endzeiten auf.



Es gibt also die *örtliche Sicht* auf die Bestellungen und die *zeitliche Sicht*. Für das mathematische Modell brauchen wir beide Sichtweisen. Die Bestellungen ordnen wir aber nach

ihren Anfangszeiten an, da diese Ordnung linear ist. Die zeitliche Beziehung zwischen den einzelnen Bestellungen stellt sich durch diese Ordnung her. Die Nähe zweier Bestellungen spielt erst dann eine Rolle, wenn sie auch zeitlich „in der Nähe“ liegen. Örtliche Nähe ist nur als Beziehung zwischen je zwei Bestellungen ein sinnvoller Begriff, während die zeitliche Abfolge ein globales Ordnungskriterium ist.

Aus diesen Gedanken ergibt sich – wenn wir im Auge behalten, daß wir die örtliche *und* die zeitliche Sichtweise brauchen – als Modell für die Repräsentation der Bestellungen in natürlicher Weise ein Graph. Wir haben Objekte, nämlich die Bestellungen, wir haben sogar eine Ordnung auf den Objekten gegeben, nämlich die Anfangszeiten, und wir haben Beziehungen, nämlich die Nähe je zweier Bestellungen zueinander. Aber was heißt überhaupt „Nähe zweier Bestellungen“? Schließlich enthalten sie beide doch je zwei ganz unterschiedliche Orte, und dazwischen muß man sich den Fahrtweg denken, der vom jeweiligen Anfangsort zum Endort führt. Was ist da nah und was fern? Auch die *Struktur* der Objekte ist ziemlich komplex und dynamisch. Die Frage ist: Was sind die Ecken des Graphen, und welcher Art ist die Beziehung zwischen ihnen? Was sind also seine Kanten?

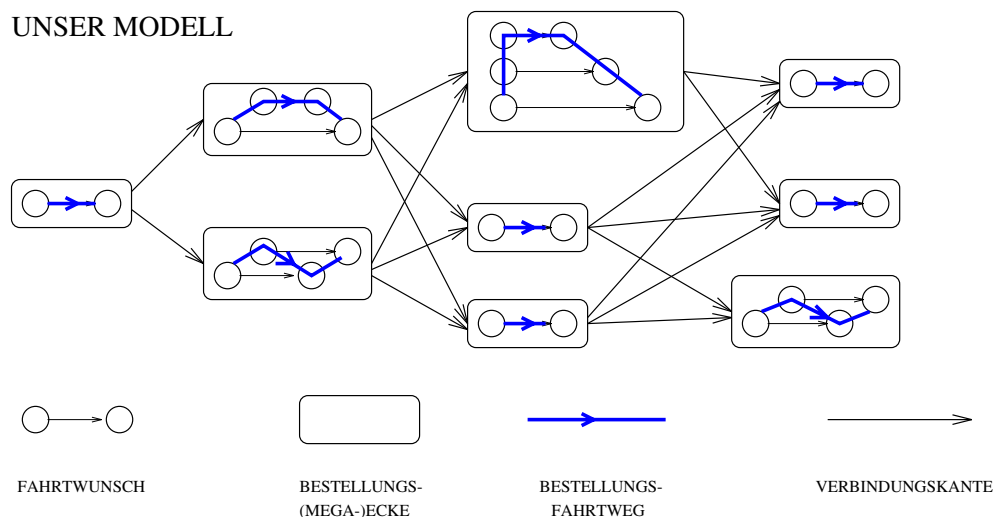
Die Ecken. Als Ecken wollen wir die Bestellungen nehmen. Das scheint zunächst merkwürdig, kann man sich doch die einzelnen Fahrtwünsche rudimentär vorstellen als je *zwei* Ecken, Anfangs- und Endort (oder -zeit), mit einer Kante dazwischen, dem Fahrtweg (siehe Bild „Berlin von oben“).

In unserem Modell *Bestellung* wird allerdings der Fahrtweg gar nicht gespeichert. Aus dem Anfangsknoten und dem Endknoten der Bestellung im digitalisierten Stadtplan läßt sich jederzeit ein Fahrtweg berechnen, wenn man ihn braucht. Eine Bestellung ist ein Atom. Sie enthält feste Zeiten und Orte und wird nur als Gesamtheit betrachtet.

Die Kanten. Hier soll in geeigneter Weise die örtliche Nähe mit hineinkommen. Was interessiert uns an der Nähe zweier Bestellungen? Wir wollen wissen, ob eine Bestellung *B* nach einer Bestellung *A* in einer Tour bedient werden kann, ob *A* und *B* also in einem Tourenplan *verbunden* werden können. Dazu muß ein Fahrzeug es zeitlich schaffen, vom Endpunkt von *A* pünktlich zum Anfangspunkt von *B* zu gelangen. Wir sagen dann, *B* ist von *A* aus *erreichbar* und legen eine Kante von *A* nach *B*. Die Kanten zwischen den Bestellungen stellen bei uns also die *Möglichkeit* dar, zwei Bestellungen *nacheinander* zu erfüllen. Durch eine Ordnung auf den auslaufenden Kanten jeder Ecke, kann die Qualität der Nachfolgemöglichkeit ausgedrückt werden, und damit solche Parameter wie örtliche Nähe oder Leerstehzeit (durch zu frühes Ankommen).

Es gibt aber nicht nur die Möglichkeit, zwei Einzelbestellungen *nacheinander* in einer Tour zu bedienen, sondern es sollen, um Kosten zu sparen, auch mehrere Bestellungen *gleichzeitig* erfüllt werden. Wie werden diese Möglichkeiten in den Kanten ausgedrückt? Gar nicht.

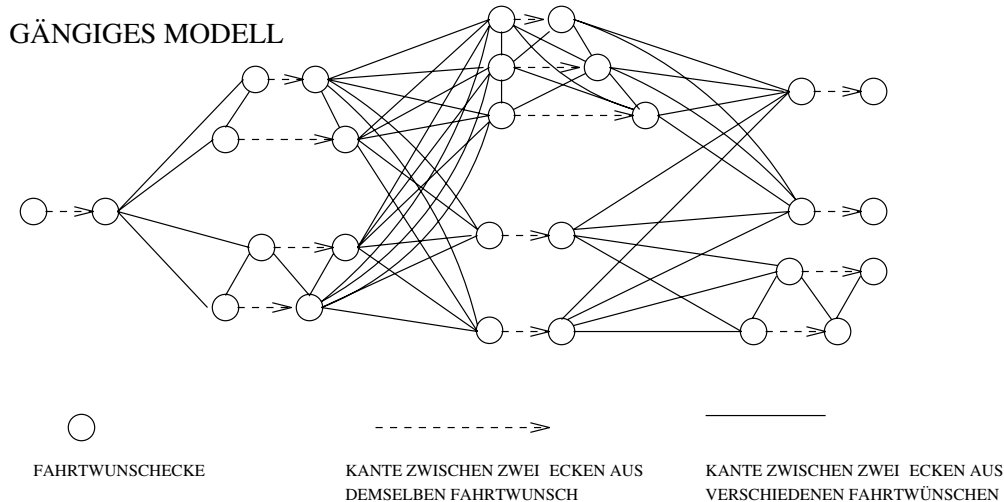
Mega-Ecken. Nachdem die Einzelbestellungen aus den Fahrtwünschen erzeugt und nach Anfangszeiten sortiert sind, werden Verknüpfungsmöglichkeiten zwischen den Bestellungen gesucht: Sammelfahrten, Ein- und Anbindungen. Die Verknüpfungen, die ausgewählt werden (welche das sind, hängt ab von der Einstellung der Parameter), werden zu Sammelfahrt-Bestellungen, Einbindungen oder Anbindungen zusammengefaßt. Jede solche Verknüpfung von Einzelbestellungen wird damit zu *einer* Bestellung und damit im Graphen zu *einer* Ecke, einer *Mega-Ecke*. Ihr Startort ist nun der Startort des zuerst bedienten Fahrtwunsches in der Mega-Ecke und ihr Zielort ist der Zielort des zuletzt erfüllten Fahrtwunsches in der Mega-Ecke. Anfangs- und Endzeiten sind neu berechnet. So stellt jede Mega-Ecke eine Mini-Tour dar, die bei der Tourenplanung als Atom betrachtet werden kann, da sie genau so gefahren werden soll, wie sie beim Verknüpfen disponiert wurde.



Diskussion. Unser Modell bedarf der Erläuterung. Ein gängiges Modell ist, die Fahrtwünsche nicht zu Ecken zusammenzuziehen, sondern die Fahrtwunschmenge so zu modellieren, daß jede Bestellung eine Anfangs- und eine Endecke ergibt, die durch eine Kante verbunden sind. Kanten zwischen Anfangs- oder Endecken *verschiedener* Bestellungen müssen dann von den Kanten *innerhalb* einer Bestellung unterschieden werden.

Unser Modell entstand aus zwei Gründen: Erstens sparen wir Kanten, ohne Informationen zu verlieren.

Zweitens haben wir uns, wie anfangs beschrieben, entschieden, die auftretenden Probleme bei der Disposition getrennt und nacheinander zu lösen. Daraus ergibt sich, daß die verknüpften Fahrtwünsche zum Zeitpunkt des Kantenlegens bereits unveränderbar festgelegt sind. Bestellungen haben nichts dynamisches mehr, sondern sie sind Atome, die nur noch untereinander zu Touren verbunden werden.



Der Bestellungsgraph. Wir haben bisher gesagt: die Ecken und Mega-Ecken des Graphen, also die Bestellungen, sollen nach Anfangszeiten aufsteigend sortiert sein. Dem liegt der Gedanke zugrunde, daß viele Algorithmen, die die Bestellungen systematisch durchlaufen, dies von früh nach spät tun werden. Mit der gleichen Berechtigung kann man aber auch auf die Idee kommen, die Bestellungen in der umgekehrten Reihenfolge, von spät nach früh, zu durchlaufen. Warum soll man nicht Fahrwunschverknüpfungen oder den Tourenplan von abends nach morgens erzeugen? Deshalb wollen wir eine zweite Sortierung der Ecken in den Graphen aufnehmen, die nach der Endzeit absteigende Sortierung. Dies ist nicht einfach die Umkehrung der ersten Sortierung. Diese beiden Eckenordnungen sind *nicht* symmetrisch zueinander, weil einmal nach Anfangszeiten und einmal nach Endzeiten sortiert wurde. Die Rückwärtssortierung nach den *Endzeiten* vorzunehmen, ist aber sinnvoll, weil beim Denken in der rückwärts laufenden Zeit die Endzeiten genau die Rolle der Anfangszeiten einnehmen. Die beiden Ordnungen auf der Eckenmenge E sind also $(E, \preceq)$ und $(E, \supseteq)$ mit:

(Vorwärtsordnung) $B_i \preceq B_j \iff \text{Anfangszeit}(B_i) \leq \text{Anfangszeit}(B_j)$ und
 (Rückwärtsordnung) $B_i \supseteq B_j \iff \text{Endzeit}(B_i) \geq \text{Endzeit}(B_j)$.

Der so zweifach geordnete Graph, dessen Ecken die Bestellungen sind, soll – solange er keine Kanten besitzt – *Bestellungsgraph* heißen.

Der Dispo-Graph. Um bei der Disposition die zweifache Ordnung der Ecken auszunutzen, müssen die Kanten des Graphen nicht nur mögliche *Nachfolger*bestellungen, sondern auch mögliche *Vorgänger*bestellungen speichern. Man könnte dann bei der letzten Bestellung des Abends beginnen und zurück zur ersten Bestellung des Morgens disponieren. Zwei Bestellungsecken wären genau dann durch eine *Rückwärtskante* verbunden, wenn die zweite

(frühere) Bestellung *vor* der ersten (späteren) Bestellung in einer Tour disponiert werden kann. Wir wollen beide Relationen (Vorwärtskanten und Rückwärtskanten) in das Modell aufnehmen. Anders als bei den Eckenrelationen $\preceq$ und $\succeq$ sind die beiden *Kanten*relationen symmetrisch zueinander, d.h., jede Kante $B_i \rightarrow B_j$ impliziert eine Kante $B_i \leftarrow B_j$. Das liegt an der Symmetrie der Erreichbarkeitsrelation. Sobald der Bestellungsgraph durch die Kanten zum „Graph der Möglichkeiten“ wird, heißt er *Dispo-Graph*.

4.2.2 Implementierung des Datentyps Dispo-Graph

Objekte. Der Dispo-Graph wird im Rechner als zweifach verkettete Liste von Bestellungen repräsentiert, wobei die beiden Verkettungen den beiden Eckenordnungen des Bestellungs-Graphen entsprechen. Jede Ecke enthält sodann die Bestellungsdaten, sowie einen Satz Vorwärtskanten und einen Satz Rückwärtskanten als Verkettung je zweier Bestellungen mit der oben beschriebenen Interpretation.

```
struct graph_ecke {
    bestellung_t      bestellung;
    struct graph_ecke **_b_plot_zeiger;
    struct graph_kante *_vorwaerts_kanten;
    struct graph_kante *_rueckwaerts_kanten;
    struct graph_ecke *_nachfolger_vorwaerts;
    struct graph_ecke *_nachfolger_rueckwaerts;
};

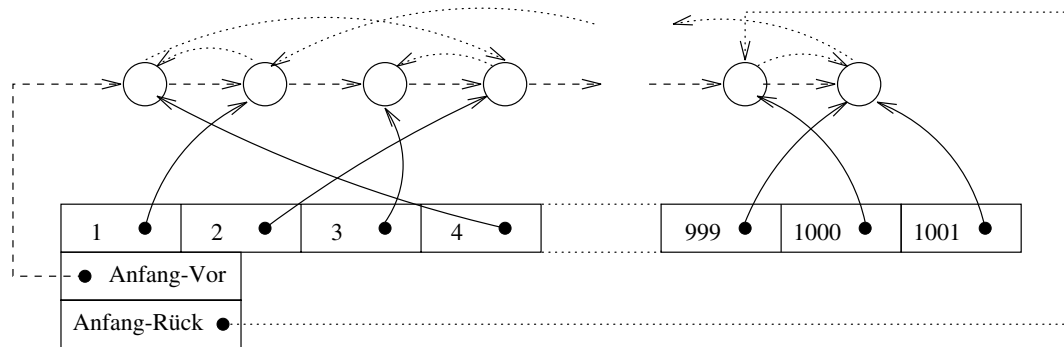
struct graph_kante {
    int      _kosten;
    struct graph_ecke *_ziel;
    struct graph_kante *_nachfolger_kante;
};

typedef struct graph_ecke  ecke_t;
typedef struct graph_kante kante_t;
```

Das Feld `_b_plot_zeiger` in der Graph-Ecke ist ein Verweis in den Tourenplan hinein, und es zeigt auf die Stelle im Tourenplan, auf die diese Bestellung bei der Disposition gesetzt wurde. Wurde die Ecke noch nicht disponiert, ist der Zeiger `NULL`.

Der Datentyp *Dispo-Graph* selbst ist nun ein Verbund aus drei Variablen: Ein Zeiger auf die erste Graph-Ecke der Vorwärts-Sortierung, ein Zeiger auf die erste Graph-Ecke der Rückwärts-Sortierung und ein Feld (Vektor), in dem der Index jedes Feldelements einer Fahrtwunschnummer entspricht. Jedes Feldelement enthält Zeiger auf diejenigen Ecken im

Graphen, in denen dieser Fahrtwunsch in einer Bestellung vorkommt. Diese Implementierung erleichtert den direkten Zugriff auf eine Bestellung im Graphen, wenn die Fahrtwunschnummer bekannt ist. Sie vereinfacht auch die Erzeugung des Graphen.



FW-NR:	1	2	3	4	...	999	1000	1001
ANFANGSZEIT:	5.15	5.45	5.30	5.15		23.30	0.00	0.00
ENDZEIT:	6.10	6.00	5.50	6.05		0.30	0.20	0.25

```
struct dispo_graph {
    ecke_t    *fw_feld[MAX_FW_ANZAHL];
    ecke_t    *_anf_vor;
    ecke_t    *_anf_rueck;
};
```

Folgende Operationen sind auf dem Dispo-Graph erklärt und in der Datei `graph.c` implementiert und kommentiert (s. Listing, `graph.c`):

Konstrukturen

init_graph. Diese Operation öffnet die Fahrtwunschdatei und schreibt die nicht stornierten Fahrtwünsche als Einzelbestellungen in einen binären Baum, nach Anfangszeiten sortiert. Dieser Baum ist die Grundlage aller (Teil-)Graphen, die im Verlauf des Programms erzeugt werden.

erzeuge_graph. Aus dem binären Baum wird ein Graph erzeugt. Zuerst wird aus dem Baum ein Bestellungsgraph in Vorwärtsverkettung erzeugt, wofür man nur den binären Baum traversieren muß; sodann wird die Rückwärtsverkettung den Ecken hinzugefügt, indem die Fahrtwunschnummern der Ecken des vorwärts verketteten Graphen in einem Feld (Vektor) absteigend nach der Endzeit sortiert (mit Quicksort) und dann in der Reihenfolge ihrer Sortierung verkettet werden.

erzeuge_param_graph. Dies entspricht **erzeuge_graph**, mit dem Unterschied, daß hier nur eine *Teilmenge* aller Fahrtwünsche betrachtet wird. Die Auswahl der Teilmenge wird in einer Variablen **params** bitweise codiert, so daß Kombinationen möglich werden (z.B. alle nicht-taxifähigen Fahrtwünsche, die Treppenhilfe benötigen). Die möglichen Teilmengenparameter sind zur Zeit: **nur_taxifaehige**, **nicht_taxifaehige**, **nur_treppenhilfe**, **nicht_treppenhilfe**, **nur_sternbestellungen**, **nicht_sternbestellungen**. „Sternbestellungen“ nennen wir die Bestellungen, die von oder zu einem Behinderten-Treffpunkt oder einem markanten Ort gehen. Sie haben im Fahrtwunsch als Adresse ein Kürzel, das mit einem Stern (*) beginnt.

loesche_graph. Löscht den Dispo-Graphen. Zurück bleibt ein leerer Graph.

loesche_alle_kanten. Alle Verbindungskanten des Graphen werden gelöscht, so daß ein unabhängiger Graph übrig bleibt.

dispo_init_graph. Der Graph wird für eine neue Disposition initialisiert, indem der **b_plot_zeiger** jeder Ecke auf NULL gesetzt wird. Der **b_plot_zeiger** gibt die Position jeder Ecke im Tourenplan oder B-Plot an. Außerdem werden die disponierten Anfangs- und Endzeiten jeder Ecke wieder auf die ursprünglichen Anfangs- und Endzeiten gesetzt.

lege_ecke. Eine Ecke wird in den Graphen in beiden Eckenordnungen eingefügt. Die in ihr enthaltenen Fahrtwünsche sind jetzt genau einmal im Graphen vorhanden, nämlich in dieser Ecke. Wenn es gewünscht wird (Parameter **ANFANGS_ENDZEIT_RUNDEN**), wird an dieser Stelle die Endzeit der neu eingefügten Bestellung aufgerundet, die Anfangszeit abgerundet. Bei einer Einzelbestellung auf **ANFANGS_ENDZEIT_RUNDUNG**, derzeit 5 Minuten, bei einer Sammelbestellung auf **ANFANGS_ENDZEIT_RUNDUNG_SAMMEL**, derzeit 5 Minuten, bei einer Ein- oder Anbindung auf **ANFANGS_ENDZEIT_RUNDUNG_EIN_AN**, derzeit 5 Minuten.

loesche_ecke. Eine unabhängige Ecke wird aus dem Graphen gelöscht. Die in ihr enthaltenen Fahrtwünsche sind nun nicht mehr im Graph vorhanden.

lege_kante. Zwei Ecken B_i und B_j werden durch zwei Verbindungskanten $B_i \rightarrow B_j$ und $B_i \leftarrow B_j$ verbunden. Jede dieser beiden Kanten enthält ein Kantengewicht (Kosten). Beide gerichtete Kanten sind in der jeweiligen Liste der auslaufenden Kanten gemäß ihrer Kosten einsortiert (beste Kanten zuerst). Diese Güte setzt sich zusammen aus der Fahrzeit, der Leerzeit, der Anzahl der Fahrtwünsche in der Zielbestellung, der geographischen Nähe und der Anzahl der benötigten Fahrer der Zielbestellung. Diese Parameter werden unterschiedlich gewichtig behandelt, je nach den Wichtungsfaktoren, die als Parameter der Operation **lege_kante** mitgegeben wurden (s. Kapitel 6.1.3).

`loesche_kante`. Die Verbindungskante $B_i \leftrightarrow B_j$ wird aus dem Graphen entfernt.

`lege_gerichtete_kante`, `loesche_gerichtete_kante`. Die beiden eben beschriebenen Operationen stellt das Modul `graph.c` auch für eine gerichtete Kante $B_i \rightarrow B_j$ einzeln zur Verfügung. Der Grund ist allein, daß bei den Sammelfahrt-Verknüpfungen die Ecken der Sammelfahrtkandidaten mit Hilfe je einer Kante von einer „Merkecke“ aus fixiert werden, wobei auch diese Kandidaten einer Reihenfolge unterliegen sollen, die durch ein Kantengewicht entsprechend der Sammelfahrten-Heuristik festgelegt wird. (s. Kapitel 5.2.)

`verbinde`. Alle Verbindungskanten im Graphen werden gelegt. Eine Kante $B_i \leftrightarrow B_j$ wird gelegt, wenn B_j von B_i aus *gut erreichbar* ist (s. Kapitel 6 für eine genaue Definition). Die Güte der Verbindungskanten wird mit Hilfe der Wichtungsfaktoren (siehe `lege_kante`) berechnet.

Selektoren für eine Ecke oder Kante. Alle Felder der Bestellung in der Graph-Ecke können selektiert werden mit Operationen, die in der Datei `datentypen.h` als Makros definiert sind. Genauso sind die Zugriffsoperationen auf die anderen Felder einer Graph-Ecke (Nachfolger, Kantenmenge) oder einer Graph-Kante (Ziel, Nachfolgerkante) definiert. Die Operationen heißen wie die Felder, bloß der Unterstrich vor dem Namen fehlt. Sie bekommen eine Ecke (bzw. Kante) als Parameter.

`finde_ecke`. Selektiert für eine gegebene Fahrtwunschnummer die zugehörige Ecke im Graphen.

`vorgaenger_vorwaerts`, `vorgaenger_rueckwaerts`. Berechnet für eine Ecke ihren Vorgänger in der Vorwärtssortierung bzw. Rückwärtssortierung der Ecken.

Selektoren für den Gesamtgraphen. Zwei Selektoren stehen für den Gesamtgraphen zur Verfügung: `anf_vor` liefert die erste Ecke der Vorwärtssortierung, `anf_rueck` liefert die erste Ecke der Rückwärtssortierung. Diese beiden Operationen sind in der Datei `datentypen.h` als Makros definiert, da sie Zugriffsoperationen auf die entsprechenden Felder im Datentyp `graph_t` sind.

Prädikate, Berechnungen, Ausgaben. Das Modul `graph.c` stellt weiterhin zur Verfügung: Die Berechnung der *Leerzeit* zwischen zwei Ecken (`leerzeit`) und das Prädikat `erreichbar`. Außerdem gibt es die Funktion `drucke_graph`, um den Dispo-Graph auszugeben.

4.2.3 Das Modell für den Tourenplan

Als Ausgabe soll der Tourenplangenerator einen Tourenplan liefern. In diesem Tourenplan sind den einzelnen Touren noch nicht die konkreten Fahrzeuge zugeordnet. Später, im Fahrzeugzuteilungs-Programm, geschieht genau diese Zuordnung. Der Tourenplan wird zum B-Plot. Der Begriff B-Plot kommt aus der Telebus-Zentrale. Dort hängen in der Leitzentrale große Papierbögen, auf denen in Tabellenform für jeden Bus die disponierte Tour skizziert ist. Die Spalten der Tabelle entsprechen dabei den Bussen, die Zeilen folgen einem Zeitraster von 5 Uhr morgens bis 1 Uhr nachts.

Tour \ Uhrzeit	1 118	2 127	3 113		32 212	33 246	34 212		49 777	50 768	
5											
8											
11											
14											
17											
20											
23											
2											

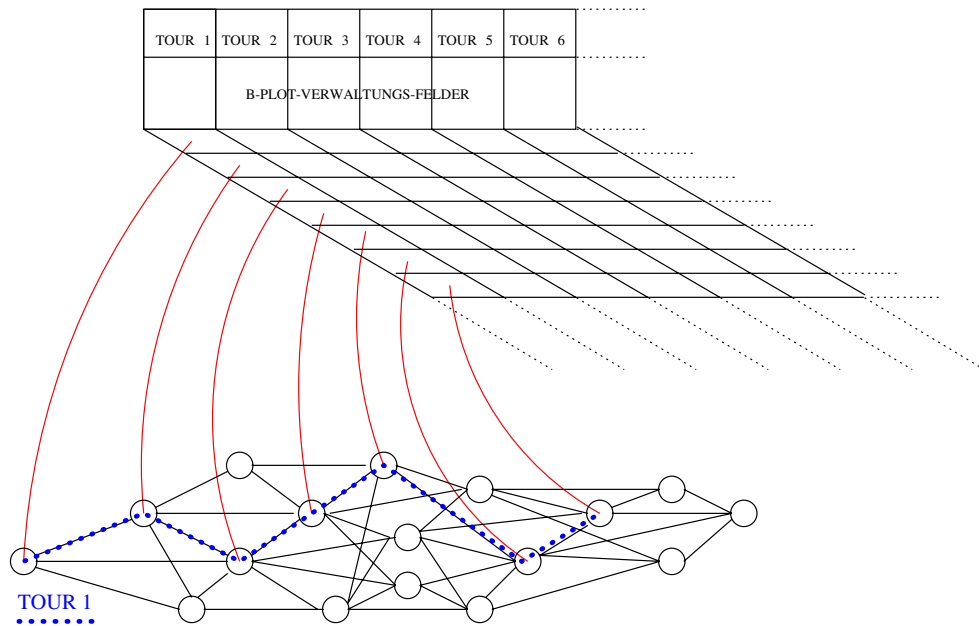
Unser Modell für Tourenplan und B-Plot folgt zum Teil diesem Gedanken. Es ist eine große Tabelle, in der die disponierten Touren als Spalten eingetragen sind. Die Elemente einer Spalte sind die Bestellungen, die zu der Tour gehören, in der Reihenfolge ihrer Bedienung. Am Kopf der Tabelle steht über jeder Tour schließlich der zugewiesene Bus. Zunächst stehen dort aber nur mögliche Bustypen, notwendige Kapazitäten, etc. Diese Tabelle läßt sich mathematisch als Matrix beschreiben. Anders als in der Telebus-Zentrale haben die Zeilen bei uns keine besondere Interpretation, außer daß sie eine laufende Nummer, die Reihenfolge der Bestellungen in der Tour, darstellen. Wir beginnen jede Tour in der ersten Zeile, unabhängig von ihrer Anfangszeit.

4.2.4 Implementierung des Datentyps B-Plot

Es gibt drei Stadien der Existenz eines B-Plots. Zunächst als Tourenplan im Rechner, dann als B-Plot im Rechner und schließlich abgespeichert, als Datei.

B-Plot und Tourenplan im Rechner. Im Rechner haben wir den Tourenplan als zweidimensionales Feld (Matrix) implementiert, also mit einer vorher festgelegten Größe.

Diese muß so groß gewählt werden, daß jeder erzeugbare Tourenplan hineinpaßt. Zwar sind im Regelfall viele Spalten der Matrix unbenutzt, aber die unproblematische programmiertechnische Handhabung wiegt diese „Speicherplatzverschwendung“ leicht wieder auf. Die Größe der Matrix ist festgelegt in den Parametern **BUSMAX** für die maximale Spalten(=Touren)anzahl (derzeit 500) und **BESTMAX** für die maximale Zeilen(=Bestellungs)anzahl, derzeit 30. Die Elemente der Matrix sind Bestellungen. Nun steht aber während des Disponierens der Dispo-Graph zur Verfügung, der ebenfalls, als Ecken, die Bestellungen enthält. Wir wollten diese nicht doppelt speichern. Deshalb ist ein Element der Matrix nicht eine *Bestellung*, sondern nur ein *Zeiger* auf die entsprechende Ecke im Graphen. Umgekehrt gibt es in jeder Graph-Ecke einen Zeiger auf dasjenige Feld im Tourenplan, in das diese Ecke hineindisponiert wurde (**b_plot_zeiger**). Als zweite Struktur gibt es ein eindimensionales Verwaltungsfeld (Vektor), das für jede Spalte der Matrix Verwaltungsinformationen enthält.



Das Verwaltungsfeld enthält drei Gruppen von Informationen: Im Tourenplan enthält es Informationen über die disponierte Tour (Güte und Zeiten) und über das *benötigte* Fahrzeug. Später, im B-Plot, werden Informationen über das *ausgewählte und zugeteilte* Fahrzeug hinzugefügt.

```
typedef struct {
    b_plot_v _b_plot_verwaltung[BUSMAX];
    ecke_t *_b_plot[BESTMAX][BUSMAX];
} tourenplan_t;
```

B-PLOT-VERWALTUNGSDATEN EINER TOUR					
GÜTE	6stellige Zahl			FAHRZEUGNUMMER	3stellige Zahl
FAHRTWUNSCHANZAHL	2stellige Zahl			ZUGETEILTER	
SCHICHTANFANG	Uhrzeit	FAHRZEUGTYP	1stellige Zahl	FAHRZEUGTYP	1stellige Zahl
SCHICHTENDE	Uhrzeit	MAX-PLATZBEDARF	1 Kapa-Variante	KAPAZITÄTSTYP	1 Kapa-Variante
SCHICHTLÄNGE	Zeit	NUR RAMPE	Ja / Nein	MIT DEPOTFAHRTEN	Ja / Nein
KERN-ANFANGSZEIT	Uhrzeit			DEPOT	Knoten-Nummer
KERN-ENDZEIT	Uhrzeit			DEPOTBEZIRK	Bezirk

Der B-Plot als Datei. Um am Fahrtag Umdispositionen vornehmen zu können, muß der B-Plot auch nachdem er für die Anbieter und die Leitzentrale ausgedruckt wurde, verfügbar sein. Deshalb wird er nach der Fahrzeugzuteilung auf Magnetplatte abgespeichert. Hier reicht es nicht mehr, in die einzelnen Felder nur *Verweise* auf Bestellungen hineinzuschreiben. Der abgespeicherte B-Plot braucht die vollständigen Bestellungen und ihre jeweilige Position im Tourenplan. Deshalb werden die Bestellungen in disponierter Form Spalte für Spalte in eine Datei geschrieben, mit dem jeweiligen Verwaltungsfeld vorneweg.

4.3 Das Steuerpult für die Disposition

Die Anforderungen an die Disposition sind einem stetigen Wandel unterzogen. Eine rechnergestützte Disposition muß diesem Anspruch gerecht werden. Der Schlüssel zur Lösung dieses Problems heißt: Interaktion an den geeigneten Stellen im richtigen Maß.

Bei der Entwicklung unserer Dispositionsprogramme haben wir von Anfang an versucht, Interaktion einzuplanen. Das Ergebnis ist ein „Steuerpult“ für das rechnergestützte Disponieren. Das Wort Steuerpult ist eine Metapher, um sich die Parametersteuerung besser vorstellen zu können: Es gibt oben auf dem Pult Ein-/Aus-Schalter für alle Programme. Jedes der vier Hauptprogramme kann einzeln „gefahren“ werden. An allen Schnittstellen befindet sich ein Hebel, der die Wahl zwischen Automatik- und Handbetrieb ermöglicht. Genau an den Schnittstellen kann es sinnvoll sein, die vorhandenen oder automatisch erzeugten Eingabedaten durch gezielte Handvorgaben zu verändern oder Ausgabedaten nach einer Sichtprüfung durch Korrekturen zu verbessern. Unter diesen Hauptschaltern und Handvorgabehebeln befinden sich für jedes Programm Taster, Schalter, kleine Schiebe- und Drehregler, die es ermöglichen, die verschiedenen Programme über Parameter zu steuern.

Um bei den vielen Tasten und Knöpfen die Übersicht zu behalten, haben wir uns gefragt: in welche Klassen lassen sich die verschiedenen Vorgaben und Anforderungen bei der Disposition einteilen? Unsere Antwort ist: Die wesentlichen Parameterklassen sind die *Zeiten*, die *Orte*, die *Kapazitäten*, die *Kosten* und die *Strategien*. Die ersten vier Klassen beschreiben die Gebiete, in denen optimiert werden soll. Ihre Maße sind: Zeiteinheiten, geographische Einheiten, Kapazitätseinheiten und die Deutsche Mark. Die letzte Klasse beschreibt, nach welchen Regeln und Methoden optimiert werden soll.

Eine wichtige Entscheidung wird sein, welche dieser vielen Parameter lediglich zum Experimentieren und als Steuerpult für den Spaltengenerator von Bedeutung sind, also für die Forschung, und welche in der Praxis beim rechnergestützten Disponieren als Steuerparameter genutzt werden sollen. In unserem Programmmentwurf haben wir alle Steuerparameter in einer Datei `parameter.h` zusammengefaßt. Sie werden also vor der Übersetzung des Programmpakets als globale Konstanten gesetzt. Diese Art der Parametersteuerung erwies sich während der Entwicklungsphase als die unkomplizierteste. Beim rechnergestützten Disponieren kann diese Art der Steuerung für alle *Vorgabeparameter* beibehalten werden. Alle anderen müssen dann als variable Ein-/Ausgabeparameter an den entsprechenden Stellen im Programm deklariert werden.

Wie komplex das Problem der Telebus-Disposition ist, wie vielfältig die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten dabei sein können, wird bei der Betrachtung des Steuerpultes `parameter.h` mit seinen etwa 100 Parametern deutlich. Im Detail werden alle diese Parameter in der Dokumentation der jeweiligen Programme Fahrtwunschverknüpfung, Tourenplanerzeugung, Fahrzeugzuteilung und UmDisposition erläutert.

4.4 Die Maßeinheiten

4.4.1 Zeiten

Zeit bedeutet in unseren Programmen meistens *Telebus-Zeit*. Die Telebus-Zeit rechnet für jeden Tag von Mitternacht (= 0) an pro Minute in 10er Schritten. Die Arbeit beginnt um 5 Uhr, in Telebus-Zeit also bei 3000. Eine Stunde sind 600 Telebus-Zeiteinheiten. Der Tag endet nicht um 24 Uhr, also 14.400 Telebus-Zeiteinheiten, sondern geht bis 1 Uhr und in Ausnahmen auch noch länger. Diese Uhrzeiten werden auf den Vortag bezogen weitergerechnet: 1.30 Uhr entspricht beispielsweise 15.300 Telebus-Zeiteinheiten.

Der Vorteil dieser Codierung ist: Wir können ohne Umrechnungen Uhrzeiten und Zeiten aufeinander addieren und voneinander subtrahieren. Um bei Ausgaben die richtige Uhrzeit als Uhrzeit lesen zu können, gibt es in dem Modul `basisoperationen.c` eine Funktion `uhrzeit`, die eine Zahl in Telebus-Zeiteinheiten erwartet und die entsprechende Uhrzeit liefert.

4.4.2 Orte

Geographische Punkte sind bei uns im wesentlichen die *Knoten* des digitalisierten Stadtplans. Nur bei den Ein- und Ausgabedaten begeben wir uns auf das Niveau der genauen *Adresse*. Wir benutzen bisher zwei Ungenauigkeitsebenen über den Knoten: Bezirke und Regionen. Ein *Bezirk* wird von uns abgeleitet aus den alten Postzustellbezirken. Eine *Region* faßt etwa 10 solcher Bezirke zusammen. Regionen und Bezirke sind einander eindeutig zugeordnet. Dies ist beim Schritt von den Knoten zu den Bezirken und umgekehrt *nicht* der Fall. Beispielsweise gibt es Adressen, die dem gleichen Knoten zugeordnet sind, aber in verschiedenen Bezirken liegen. Deshalb lesen wir alle Knoten und Bezirksangaben nur ein; wir rechnen damit nicht herum. Bei einer guten Stadtplanmodellierung ist dieser Punkt aber zu beachten. Man kann sich bei den Telebusdaten nicht vollständig darauf verlassen, daß Bezirksnummern eindeutig Postzustellbezirken entsprechen: Es gibt Mehrdeutigkeiten und erfundene Spezialbezirke.

Wege sind Knotenfolgen. Wir können sie, wie gesagt, noch nicht berechnen. Wir arbeiten bisher nur mit Entfernungen. In einer Entfernungstabelle (in `netz.h`) stehen alle Entfernungen zwischen je zwei Knoten in 10-Meter-Einheiten. Im Modul `netz.c` gibt es dann eine Funktion `entfernung`, die zwei Knoten erwartet und die Entfernung in Kilometern (auf 10 Meter genau hinterm Komma) berechnet. Die entsprechende Funktion auf dem Stadtplan in `stadtplan.c` heißt genauso. Bei der Umstellung von den Tabellen auf das Stadtplanmodell muß bei allen vorhandenen Funktionsnamen nichts geändert werden.

4.4.3 Kapazitäten

Wie schon bei der Vorstellung der Fahrzeugdaten erwähnt, reicht es nicht aus, den Platzbedarf und das Kapazitätsangebot auf zwei Zahlen, Sitz- und Rollstuhlplätze, zu reduzieren. Wir haben eine Codierung als 7-stellige Zahl gewählt, die für die Überschlagsrechnungen diese beiden Anzahlen als erste zwei Ziffern enthält. Danach steht jede Stelle für einen Rollstuhltyp, jede Ziffer also für die jeweilige Anzahl von Rollstühlen eines Typs, vom flexiblen Faltrollstuhl bis zum sperrigen Kastenrollstuhl.

Angenommen, eine Sammelfahrt setzt sich zusammen aus 2 Telebusberechtigten ohne Rollstuhl, zwei Faltern, einem Selbstfahrer-Rollstuhl und einer Begleitperson. Da vorausgesetzt wird, daß Begleitpersonen stets ohne Rollstuhl mitfahren, ergibt sich folgende Zahlenkombination: 3320010 (Platzbedarf: 3 Roll, 3 Sitz. Aufgegliedert nach Rollstühlen: 2 Falter, 0 Spasti, 0 Elektro, 1 Selbst, 0 Kasten). Wir berechnen bei der Überschlagsrechnung zur Zeit alle Rollstühle einfach, bis auf den Kastenrollstuhl, der dreifach zählt. 1 Kastenrollstuhl und 1 Falter ergeben bei uns also einen Rollstuhlplatzbedarf von 4 Rollstuhlplätzen.

VERSCHLÜSSELUNG VON PLATZBEDARF BZW. PLATZANGEBOT

	ÜBERSCHLAGSZAHLN		PRO ROLLSTUHLTYP				
7stellige Zahl	3	3	2	0	0	1	0
	ROLLSTÜHLE	SITZPLÄTZE	FALTER	SPASTI	ELEKTRO	SELBST	KASTEN

Bei den Fahrzeugen haben wir bis zu sechs Varianten solcher Zahlenkombinationen vorgesehen, die jeweils maximale Kapazitätsvarianten darstellen. In unserem Programm rechnen wir bisher nur mit den Überschlagszahlen, weil die beim Telebus existierenden Verschlüsselungstabellen für die verschiedenen Varianten zu widersprüchlich sind.

Von dem Modul `einzel_bestellung.c` werden Funktionen bereitgestellt, die einerseits jede einzelne Zahl eines Kapazitätscodes zurückliefern (z.B. `rollstuhl_plaetze` oder `falter_anzahl`), andererseits die Summe oder Differenz zweier Kapazitätsangaben dieses Codes bilden (`add_platz`, `sub_platz`).

4.4.4 Kosten

Es geht um eine kostengünstige Disposition. Überall, wo wir echte Preise kennen, haben wir diese in Mark und Pfennig in das Programm eingerechnet. Die Kosten eines Fahrtwunsches, einer Bestellung, einer Tour, eines Tourenplanes und eines B-Plots werden von uns entsprechend in DM berechnet. An vielen Stellen geht es aber nicht um Geld, sondern um Qualität oder Anzahlen. Beispielsweise hängt die Güte einer Tour nicht nur von den

Kosten ab, sondern auch davon, wieviele Fahrtwünsche von ihr erfüllt werden. Die Güte der Disposition richtet sich neben dem Kostengesichtspunkt vor allem nach der Service- und Fahrqualität: wieviel Verspätung ist eingeplant, wie gut liegen die Pausen, wieviele „schöne“ Touren sind dabei? Bei der Fahrtwunschverknüpfung, der Tourenplanung und der Fahrzeugzuteilung rechnen wir meist mit Güten, die aus einer Summe von echten Kosten und skalierten Werten bestehen, die über Parameter verschieden gewichtet werden können.

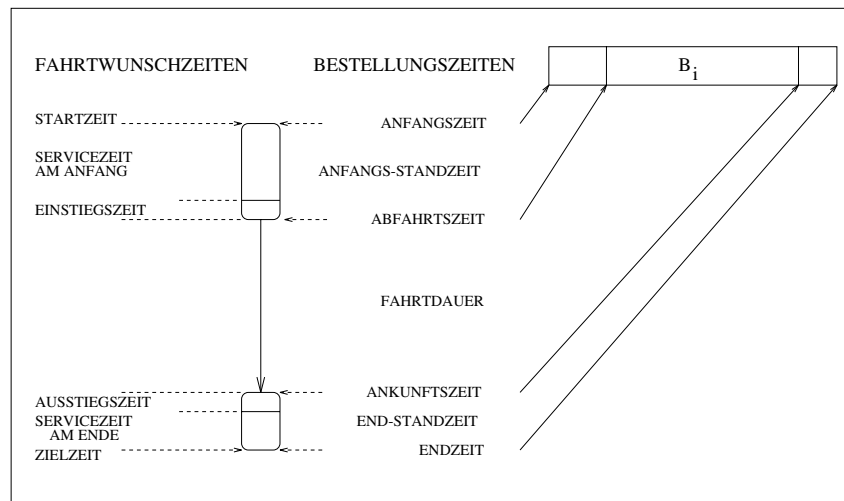
5 Das Fahrtwunschverknüpfungsprogramm

Jeden Fahrtwunsch formen wir für die Disposition in eine Einzelbestellung um. Alle Einzelbestellungen sind zunächst unabhängig voneinander, sie sind lediglich zeitlich vorwärts und rückwärts geordnet. Zusammen bilden die Einzelbestellungen den Bestellungsgraph. Bevor Touren erzeugt werden, versuchen wir Fahrtwünsche zu verknüpfen. Durch eine gute Auslastung der Buskapazität spart man Zeiten und Wege und damit Kosten. Unsere Verknüpfungsformen sind Sammelfahrten, Einbindungen und Anbindungen. Im Bestellungsgraph werden von uns dabei die entsprechenden Einzelbestellungen in Mega-Ecken zusammengefaßt.

5.1 Einzelbestellungen

5.1.1 Bestellungsdaten mit Zeitvarianz

Für jeden Fahrtwunsch erzeugen wir eine Einzelbestellungsecke. Wir ziehen uns die für die Disposition wichtigen Daten aus dem Fahrtwunsch heraus und formen daraus den Datensatz einer Einzelbestellung. Diese Umwandlung eines Fahrtwunsches in eine Einzelbestellung wird von der Prozedur `erzeuge_bestellung` im Modul `einzel_bestellung.c` erledigt. Wie die Zeiten einer Bestellung im Unterschied zu denen eines Fahrtwunsches von uns benannt und wie sie berechnet werden, macht folgendes Bild anschaulich:



Start- oder Zielzeit sowie die Servicezeiten sind durch den Fahrtwunsch vorgegeben. Die jeweilige Ein- und Ausstiegszeit ist abhängig vom Rollstuhltyp des Fahrtwunsches und

den entsprechenden Parametereinstellungen; zusammen mit den angegebenen Servicezeiten ergeben sie in der Bestellung eine Anfangs- und Endstandzeit. Weil Servicezeiten noch nicht erfaßt werden, haben wir uns drei Servicezeitparameter definiert. Ihre Belegung und die derzeitigen Durchschnittswerte der Ein- und Ausstiegszeiten sind in `parameter.h` wie folgt vereinbart:

```
#define OHNE_SERVICEZEIT          0          /* 0 Min */
#define BEGLEIT_SERVICEZEIT      50          /* 5 Min */
#define TREPPEN_SERVICEZEIT      50          /* 5 Min */

#define MAX_EIN_AUSSTIEGS_ZEIT    150        /* 15 Minuten */
#define EINSTIEGS_ZEIT_TAXI_OHNE_ROLL 10      /* 1 Min */
#define AUSSTIEGS_ZEIT_TAXI_OHNE_ROLL 10      /* 1 Min */
#define EINSTIEGS_ZEIT_TAXI_MIT_ROLL 30       /* 3 Min */
#define AUSSTIEGS_ZEIT_TAXI_MIT_ROLL 30       /* 3 Min */
#define EINSTIEGS_ZEIT_BUS_OHNE_ROLL 10       /* 1 Min */
#define AUSSTIEGS_ZEIT_BUS_OHNE_ROLL 10       /* 1 Min */
#define EINSTIEGS_ZEIT_DOPPELBUS_MIT_ROLL 30  /* 3 Min */
#define AUSSTIEGS_ZEIT_DOPPELBUS_MIT_ROLL 30  /* 3 Min */
#define EINSTIEGS_ZEIT_SOLOBUS_MIT_ROLL 50    /* 5 Min */
#define AUSSTIEGS_ZEIT_SOLOBUS_MIT_ROLL 50    /* 5 Min */
```

Die Fahrtdauer wird mit Hilfe des digitalisierten Stadtplans berechnet. Von den exakten Orten abstrahieren wir in einer Bestellung; sie werden zu Knoten- und Bezirksnummern.

Weil die Fahrzeiten im bisher benutzten Stadtplan oft zu klein sind und weil zusammen mit den Anfangs- und Endstandzeiten Bestellzeiten entstehen, die auf die Minute genau sind, was aus Sicht des Menschen aber eine übertriebene Genauigkeit ist, haben wir einen Ja-Nein-Schalter `ANFANGS_ENDZEIT_RUNDEN` eingeführt. Steht er auf Ja, kommen die Parameter `ANFANGS_ENDZEIT_RUNDUNG`, `ANFANGS_ENDZEIT_RUNDUNG_EIN_AN` und `ANFANGS_ENDZEIT_RUNDUNG_SAMMEL` zum Tragen. Derzeit ist der erste auf 5 Minuten eingestellt und rundet die Anfangszeit jeder *Einzelbestellung* ab, die Endzeit auf. Die beiden anderen Parameter sind zur Zeit ebenfalls auf 5 Minuten eingestellt und bewirken analog die Ab- und Aufrundung der Anfangs- und Endzeiten nach der jeweiligen Fahrtwunschverknüpfung.

Eine neue Größe ist die Berechnung der Anfangs- und Endregion einer Bestellung. Die Regionen sind ein Meta-Stadtplan. Wir haben dafür Berlin in eine Mitte-Region und sternförmig in sieben weitere Regionen aufgeteilt. Diese Information wird bei der Zusammenfassung zu Sammelfahrten benötigt.

Bei der Berechnung des Platzbedarfs einer Bestellung haben wir uns entschieden, die verschiedenen Rollstuhltypen explizit aufzuführen. Für die Fahrzeugzuteilung ist es besser, mit

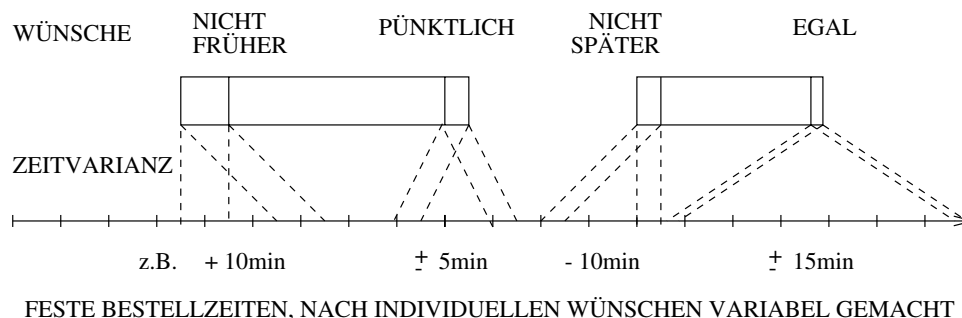
den echten Daten zu rechnen, als mit Werten wie 3,5 Rollstuhlplätze. Für jedes Fahrzeug gibt es eine Tabelle für die Konstellationen an z.B. falt-, Elektro- und Kastenrollstühlen, die in ihm Platz finden. Das Modul `einzel_bestellung.c` stellt allen anderen Programmen für Platzbedarfs- bzw. -angebotsrechnungen die Operationen `add_platz` und `sub_platz` zur Verfügung. Über Selektoren kann jede Zahl im Kapazitätscode entschlüsselt werden. Die Selektoren `sitz_plaetze`, `rollstuhl_plaetze`, `falter_anzahl`, `spasti_anzahl`, `elektro_anzahl`, `selbst_anzahl` und `kasten_anzahl` stellt ebenfalls `einzel_bestellung.c` allen anderen Programmen zur Verfügung.

DATENSATZ EINER BESTELLUNG													
FW-DATEN-GLOBAL					FW-DATEN-LOKAL								
FW-NUMMER		4stellige Zahl			1. FW-NUMMER		2. FW-NUMMER						
ANFANGSZEIT	Uhrzeit	ENDZEIT	Uhrzeit		dito		dito	...					
ANFANGSSTANDZEIT	Zeit	ENDSTANDZEIT	Zeit										
ANFANGSREGION	Region	ENDREGION	Region										
ANFANGSBEZIRK	Bezirk	ENDBEZIRK	Bezirk										
ANFANGSORT	Knoten	ENDORT	Knoten										
WEGLÄNGE	km												
FAHRTWUNSCHANZAHL 2stellige Zahl													
FAHRTART	Einzel	Gruppe	Sammel	Einbindung	Anbindung								
FAHRERBEDARF	1stellige Zahl												
PLATZBEDARF	Anzahl:	Ohne	Falter	Spasti	Elektro	Selbst	Kasten						
FAHRZEUGBEDARF	Nur Taxi	Taxi oder Bus	Nur Bus										
SPEZIALFALL-NR	1stellige Zahl												
PÜNKTLICH AM ANFANG	nicht früher	pünktlich	nicht später	egal									
PÜNKTLICH AM ENDE	nicht früher	pünktlich	nicht später	egal									
STERNBESTELLUNG	Ja	Nein											
HITS	1stellige Zahl												

Der Datensatz einer Bestellung hat folgende Struktur: Es gibt ein globales Fahrtwunschdatenfeld, das eine Fahrtwunschnummer, die Zeiten, Orte und die Weglänge der jeweiligen Bestellungsecke enthält. Dies sind die Bestellungsinformationen, die im Bestellungsgraph nach außen sichtbar sind. Weil eine Bestellungsecke auch mehrere Fahrtwünsche umfassen, also eine Mega-Ecke sein kann, gibt es daneben **MEGAMAX** lokale Fahrtwunschdatenfelder (siehe `parameter.h`, zur Zeit ist `MEGAMAX = 10`). In diesen lokalen Datenfeldern wer-

den die entsprechenden Fahrtwunschnummern, Zeiten, Orte und Weglängen der einzelnen Fahrtwünsche gespeichert. Das untere Datenfeld enthält alle telebusspezifischen Informationen, die wir für die Disposition brauchen.

Eine automatische Tourengenerierung scheitert meist an der Starrheit der Zeitdaten. Irgendwie müssen die Stand- und Fahrzeiten festgelegt und berechnet werden. Macht man diese Zeitdaten weich, d.h., behandelt man sie nicht als feste Daten sondern variiert sie in bestimmten Grenzen, ergeben sich auf einmal Touren, die mit starren Zeiten unmöglich wären. Wir haben diesen Gedanken auf zweifache Weise in unser Programm eingebaut. Zum einen kann durch ein Spielen mit den Zeitparametern Varianz erzeugt werden. Dies ist eine Art globaler Steuerungsmöglichkeit. Die zweite Form, feste Zeitdaten weich zu machen, ist lokaler Natur. In jedem Fahrtwunsch und damit in jeder Bestellung haben wir vermerkt, was der individuelle Wunsch des Kunden ist: ob oder wie pünktlich er am Start- oder Zielort sein muß oder will. Damit ist jede Bestellung nicht mehr eingezwängt zwischen zwei feste Zeiten, Anfangs- und Endzeit, sondern ist beweglich im Rahmen einer frühesten Anfangszeit und einer spätesten Endzeit.



Den Pünktlichkeitsparametern haben wir die Werte `EGAL_ZEIT` = 15 Minuten, `FRUEHER_ODER_SPAETER_ZEIT` = 10 Minuten und `PUEKTLICHKEIT` = 5 Minuten gegeben. Eine Bedingung ist beim Verschieben von Zeiten selbstverständlich zu berücksichtigen: Es muß die *Pünktlichkeit* und *Fahrbarkeit* einer Bestellung und die einer Tour erhalten bleiben. Es muß aber auch noch auf eine andere Tatsache hingewiesen werden: Der Kunde hat nur eine begrenzte *Geduldstoleranz*. Er will in der Regel nicht länger als nötig im Wagen sitzen. An allen Stellen, wo mit Zeitvarianz gearbeitet wird, werden im Sinne der Pünktlichkeit Zeitverschiebungen von uns nur dann vorgenommen, wenn dabei die entsprechend gesetzten Geduldsgrenzen (siehe Kapitel 5.2, 5.3 und `parameter.h`) nicht überschritten werden. Das Modul `einzel_bestellung.c` stellt die Funktionen `fruehester_anfang`, `spaetester_anfang`, `fruehste_abfahrt`, `spaeteste_abfahrt`, `fruehste_ankunft`, `spaeteste_ankunft`, `fruehestes_ende` und `spaehtestes_ende` allen anderen Programmen zur Verfügung. Die beiden Nebenbedingungen Pünktlichkeit und Geduldstoleranz müssen bei deren Verwendung berücksichtigt werden.

Bei den Daten, die sich auf Orte, Kapazitäten und Kosten beziehen, können wir die Idee, feste Daten weich zu machen, ebenso ausnutzen. Knoten, Bezirke und Regionen sind beispielsweise weiche Ortsdaten. Den Tourenplangenerator mit einem Steuerpult zu versehen, rührt letztlich von der Idee her, Zeitdaten variieren zu wollen.

5.1.2 Statistiken

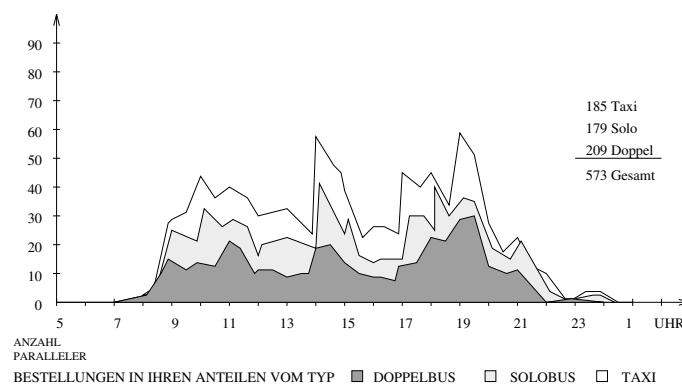
ANZAHL DER EINZELBESTELLUNGEN VOM 1.2. 1993 - 7.2.1993

TYP \ TAG	MO	DI	MI	DO	FR	SA	SO
GESAMT	956	1052	1015	1084	944	595	573
DOPPELBUS	200	214	203	255	209	166	209
SOLOBUS	286	350	341	354	313	173	179
TAXI	470	488	471	475	422	256	185

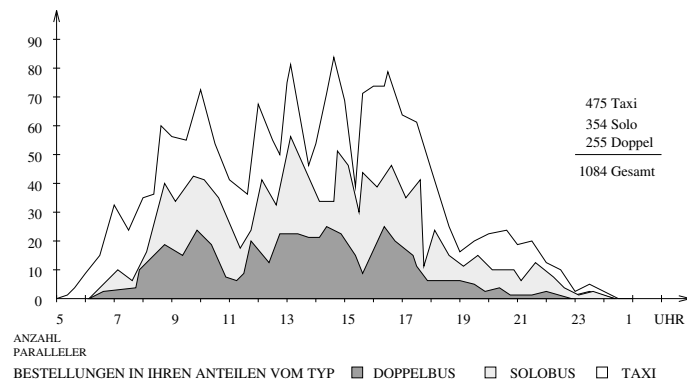
1.2. – 7.2. 1993. Anzahl der Einzelbestellungen.

TYP in MIN	DOPPELBUS		SOLOBUS		TAXI	
	MO - FR	SA - SO	MO - FR	SA - SO	MO - FR	SA - SO
STAND-DAUER	20	20	15	15	7,25	7,25
FAHRT-DAUER	18 (5 - 25)	23 (5 - 35)	25 (5, 25, 40)	29 (15 - 45)	23 (10 - 35)	27 (10 - 45)
GESAMT-DAUER	38	43	40	44	30,25	34,25

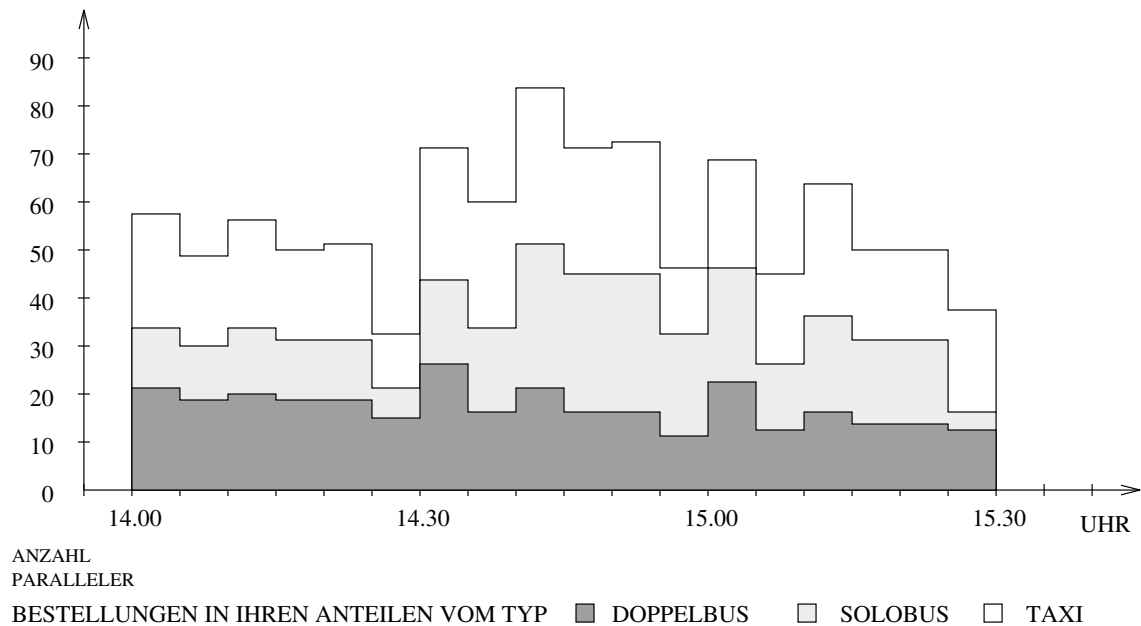
Gesamtdauer, Fahrtdauer und Standdauer der Einzelbestellungen.



Sonntag, 7.2.1993. Die Anzahl paralleler Einzelbestellungen.



Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Einzelbestellungen.

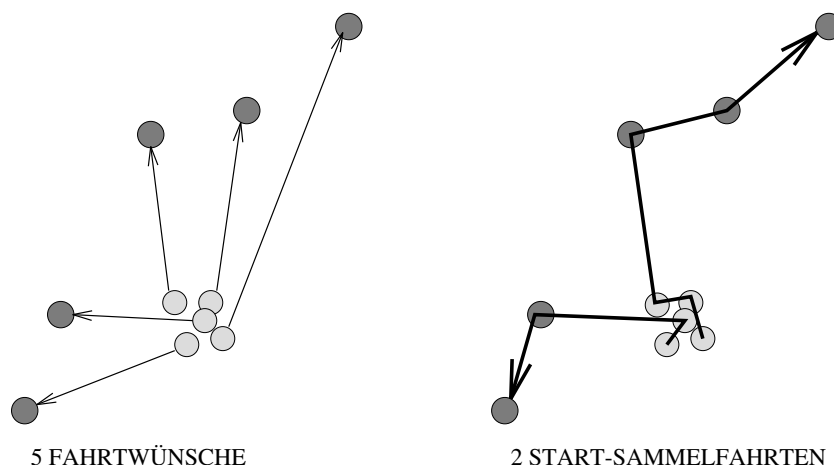


Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Einzelbestellungen zwischen 14 Uhr und 15.30 Uhr.

5.2 Sammelfahrten

5.2.1 Definition

Eine *Sammelfahrt* ist eine gemeinsame Fahrt mehrerer Fahrtwünsche von einem *gemeinsamen Startpunkt* aus zu verschiedenen Zielen (Start-Sammelfahrt) oder von verschiedenen Startpunkten aus zu einem *gemeinsamen Ziel* (Ziel-Sammelfahrt). Ein Spezialfall sind Sammelfahrten mit gleichem Start- und Zielpunkt (Gruppenfahrten). Sammelfahrten können geplant sein, als gebuchte Gruppenfahrt oder immer wiederkehrende Dauerfahrt, sie können sich aber auch zufällig aus den vorliegenden Fahrtwünschen ergeben.



5.2.2 Problemanalyse

Auswahl der Kandidaten. Welche Einzelbestellungen kommen für eine gemeinsame Beförderung als Sammelfahrt in Frage? Zunächst müssen die Kandidaten für eine Start-Sammelfahrt alle den gleichen Anfangsort, für eine Ziel-Sammelfahrt den gleichen Endort besitzen. Die zweite Voraussetzung ist bei den Start-Sammelfahrten die gleiche Anfangszeit aller Kandidaten. Analog fordert man bei den Ziel-Sammelfahrten gleiche Endzeiten aller Kandidaten. Dem gemeinsamen Abfahren entspricht hier das gemeinsame Ankommen. Die dritte Voraussetzung für einen Sammelfahrt-Kandidaten ist, daß der Fahrtwunsch nicht durch das Hineinnehmen in eine Sammelbestellung so unpünktlich ankommt oder abfährt, daß der vom Kunden gewünschte Pünktlichkeitsgrad verletzt wird.

Fahrzeugaufteilung. Wenn die Anzahl der Kandidaten oder der von ihnen benötigten Rollstuhl- oder Sitzplätze größer ist als die Kapazität eines Busses, müssen die Kandidaten

auf mehrere Busse aufgeteilt werden. Dies kann auch einer Kandidatenmenge passieren, die eigentlich in einen Bus hineinpaßt, aber in so unterschiedliche Richtungen fahren will, daß es unsinnig wäre, daraus eine einzige Tour zu machen. Wenn die Sammelfahrtkandidaten auf mehrere Busse disponiert werden, werden daraus mehrere Sammelfahrten. Die optimale Aufteilung der Kandidatenmenge einer Sammelfahrt hängt zusammen mit der Bestimmung der optimalen Ausstiegs- oder Einstiegsreihenfolge jeder Aufteilungsmöglichkeit. Gesucht ist lokal für eine Sammelfahrt die Aufteilung mit den geringsten Kosten bei einer vorgegebenen Qualitätszusicherung. Dabei kann die Minimierung des Fahrtwegs oder der Fahrzeit der dafür benötigten Busse eine Rolle spielen, aber auch die Minimierung der Busanzahl.

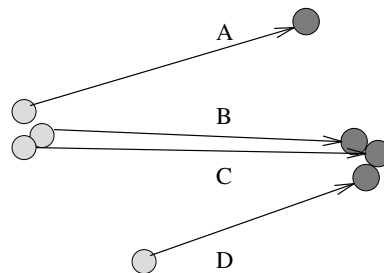
Aus- oder Einstiegsreihenfolge. Des weiteren muß für jeden Bus die optimale Ausstiegsreihenfolge (bei einer Start-Sammelfahrt) oder Einstiegsreihenfolge (bei einer Ziel-Sammelfahrt) berechnet werden. Was heißt optimal? Entweder soll die Fahrzeit der Sammelbestellung möglichst klein sein, das ist das Interesse der Fahrgäste, oder es sollen die Fahrtkilometer minimiert werden im Interesse des Busbetreibers.

Zumutbarkeit. Die Fahrzeit einer Sammelfahrt muß nicht nur möglichst klein sein, sondern es soll auch niemand zu lange in einem Bus herumsitzen. Allzu große Abweichungen von der gewünschten oder berechneten Zielzeit oder Startzeit sollen vermieden werden. Die Geduldstoleranz und der gewünschte Pünktlichkeitsgrad des Kunden soll beachtet werden.

Das Optimierungsproblem. Das Sammelfahrten-Optimierungsproblem muß unter Berücksichtigung all dieser Fragen formuliert werden. Man könnte es lokal, für jede Sammelfahrt-Kandidatenmenge, als m -Salesmen-Problem (m -TSP) modellieren: von einem Depot – dem Sammelpunkt – aus (oder zu einem Depot hin) muß eine optimale Aufteilung von Touren auf die m Handlungsreisenden (die Busse) erfolgen, wobei m auch noch variabel ist und möglichst klein gehalten werden soll; gleichzeitig darf eine Tour nicht zu lang werden; jede einzelne Tour muß in der optimalen Reihenfolge gefahren werden. Das allein ist schon ein komplexes Routenplanungsproblem (s. Kapitel 2).

Global muß aber auch noch die beste Kombination möglicher Sammelfahrten ausgewählt werden. Dies wäre nicht nötig, wenn alle Sammmelfahrtmöglichkeiten disjunkt wären. Dies ist aber nicht der Fall. Erstens beeinflussen sich Start-Sammelfahrt- und Ziel-Sammelfahrtmöglichkeiten. Wenn A, B, und C vom gleichen Punkt losfahren und gleichzeitig B, C, und D zum selben Zielpunkt wollen, sind folgende Start-Sammelfahrten möglich: AB, AC, BC oder ABC; als Ziel-Sammelfahrt wären möglich: BC, BD, CD oder BCD. Insgesamt also, neben diesen einzelnen Lösungen, die Kombinationen AB und CD oder AC und BD.

Zweitens ergeben sich Zweideutigkeiten, wenn nicht die *exakten* Anfangs- oder Endzeiten als Zeitkriterium genommen werden, sondern nur die ungefähren Zeiten. Wenn sich die



Vorausschau-Intervalle, innerhalb derer die Anfangs- oder Endzeit als gleich gelten soll, überlappen, dann ergibt sich bei je zwei sich überlappenden Intervallen die Frage, ob Bestellungen, die in beiden Zeitintervallen liegen, zu den Sammelfahrt-Kandidaten der ersten Sammelfahrt oder zu denjenigen der zweiten Sammelfahrt gehören sollen.

Die global beste Sammelfahrtenlösung ergibt sich also nicht schon, wenn nur jede einzelne Sammelfahrt für sich kostenoptimal disponiert ist. Aus der Menge aller kostenoptimalen Sammelfahrt*möglichkeiten* muß noch die kostengünstigste und schönste *Kombination* ausgewählt werden. Das ist wiederum ein Set-Partitioning-Problem.

Noch eine Stufe höher betrachtet, ergeben sich natürlich auch noch Wechselwirkungen mit den anderen Möglichkeiten der Fahrtwunschverknüpfung: den Ein- und Anbindungen. Um diese nicht durch schon vorher disponierte Sammelfahrten einzuschränken, bedarf es eigentlich einer globalen Optimierung über alle Fahrtwunschverknüpfungs-Möglichkeiten. Die gesamte Fahrtwunschverknüpfung ist ein Set-Partitioning-Problem für sich. Aber auch diese Idee, alle Fahrtwunschverknüpfungs-Möglichkeiten gleichberechtigt zu betrachten und über sie zu optimieren, muß nicht unbedingt zu dem besten Tourenplan führen. Auf der noch höheren Ebene des Tourenplans sind für einen guten Tourenplan vielleicht schon wieder Fahrtwunschverknüpfungs-Varianten gefragt, die aus guten *und* schlechten Anteilen bestehen. Die billigsten Sammelfahrten sind letztlich nicht unbedingt die besten.

5.2.3 Heuristiken

Wir haben das Sammelfahrt-Optimierungsproblem heuristisch gelöst, weil uns kein m -Salesmen-Algorithmus, der jede einzelne Sammelfahrt optimal disponieren könnte, bekannt ist und auch noch kein Set-Partitioning-Löser zur Verfügung stand. Wir wollen im Folgenden die Heuristiken vorstellen und begründen. Die zentrale Entscheidung ist, bei den Sammelfahrten genauso vorzugehen wie im Großen auch: Die einzelnen, eigentlich miteinander verwobenen Probleme werden voneinander getrennt und nacheinander gelöst.

Die Kandidatenauswahl-Heuristik. Jede Einzelbestellung aus der vorher festgelegten Grundmenge wird einmal als Vergleichsobjekt genommen, um zu schauen, ob es noch

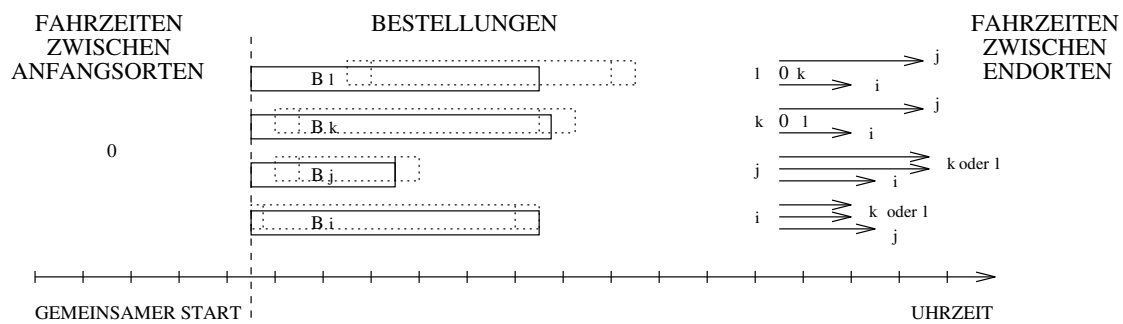
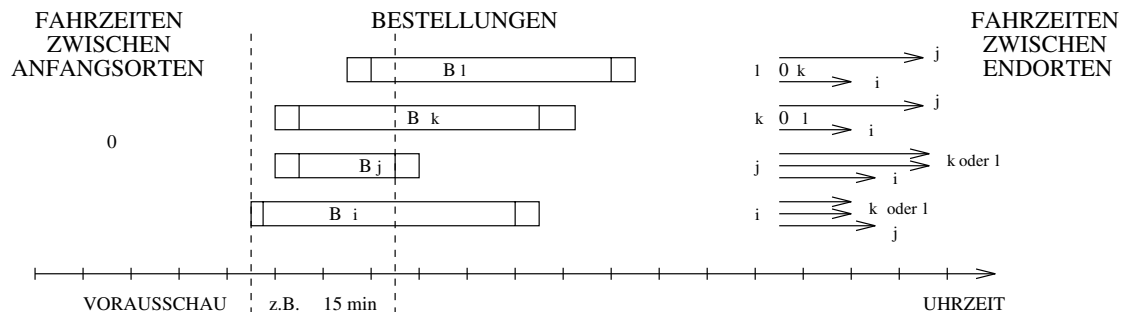
weitere Einzelbestellungen aus der Grundmenge gibt, die den gleichen Sammelpunkt haben und gleichzeitig beginnen oder enden. Diese bilden dann jeweils eine *Kandidatenmenge*.

1. *Start-Sammelfahrten*. Um die Kandidatenmenge zu vergrößern und dem menschlichen Empfinden von Zeit und Gleichzeitigkeit gerecht zu werden, wird das Kriterium „gleichzeitig beginnen“ aufgeweicht. „Gleiche Anfangszeit“ soll nicht mehr einen exakten Zeitpunkt meinen, sondern ein *Zeitfenster*, das z.B. 15 Minuten beträgt und das in dem Parameter *S_VORAUSSCHAU* festgelegt ist. Alle Bestellungen, die innerhalb dieses Zeitfensters beginnen, gelten als gleichzeitig. Für die Bildung jeder Kandidatenmenge wird von der Vergleichsbestellung aus der Bestellungsgraph nach Anfangszeiten aufsteigend durchgegangen. Deshalb muß man nur so weit schauen, bis die erste Bestellung mit einer späteren Anfangszeit als die der Vergleichsbestellung + *S_VORAUSSCHAU* an die Reihe kommt. Es reicht, nur in eine Richtung, nämlich voraus, zu schauen, weil die Vergleichsbestellung immer die früheste Bestellung in dem Zeitfenster ist.

Unter den innerhalb des Zeitfensters liegenden Bestellungen werden diejenigen gesucht, die an demselben Ort beginnen wie die Vergleichsbestellung. „Derselbe Ort“ meint bei uns: dieselbe Knotennummer. Hierbei kann es passieren, daß der Sammelpunkt tatsächlich eine Reihe verschiedener Orte ist, die allerdings alle nah beieinander liegen. Wir haben uns entschieden, auch diese „Sammelfahrten“ zuzulassen; es wird also nicht auch noch die Gleichheit der Adresse geprüft. Bei solchen Sammelfahrten ignorieren wir die zusätzlichen Wege zwischen den Abholpunkten, denn innerhalb desselben Stadtplan-Knotens ist die Fahrzeit gleich Null; das ist die Folge der Nivellierung der Stadt auf ein Knotennetz. Der Vorteil ist aber, daß so auch Sammelfahrten gefunden werden, die der Mensch nur bei genauer Ortskenntnis als solche erkennen würde. Die Größe der Kandidatenmenge hängt von der Feinheit des Ortsmaßstabs ab. Die Kandidatenanzahl erhöht sich, wenn man die Ortsgleichheit auf Nachbarschaften oder Umkreise von Knoten ausdehnt, sie verringert sich, wenn man wirklich auf die Adressen schaut und nur das gleiche Haus zuläßt.

Findet sich außer der Vergleichsbestellung ein weiterer Kandidat, haben wir es mit mindestens zwei Sammelfahrt-Kandidaten zu tun; eine Sammelfahrt ist möglich.

Die Kandidaten haben möglicherweise unterschiedliche Anfangszeiten. Diese Anfangszeiten werden nivelliert und der frühesten Anfangszeit in der Kandidatenmenge, also der Anfangszeit der Vergleichsbestellung, angeglichen, um der Bestellung eine einheitliche Anfangszeit zu geben. Das bedeutet, daß eine Bestellung maximal *S_VORAUSSCHAU* Minuten vorverlegt werden kann. Dadurch, daß am Sammelpunkt mehrere Fahrgäste einsteigen, liegt aber eh eine Einsteigezeitspanne vor. Durch eine geschickte Einstiegsreihenfolge kann versucht werden, die jeweilige Anfangszeit wieder derjenigen des Originalfahrtwunsches anzunähern.



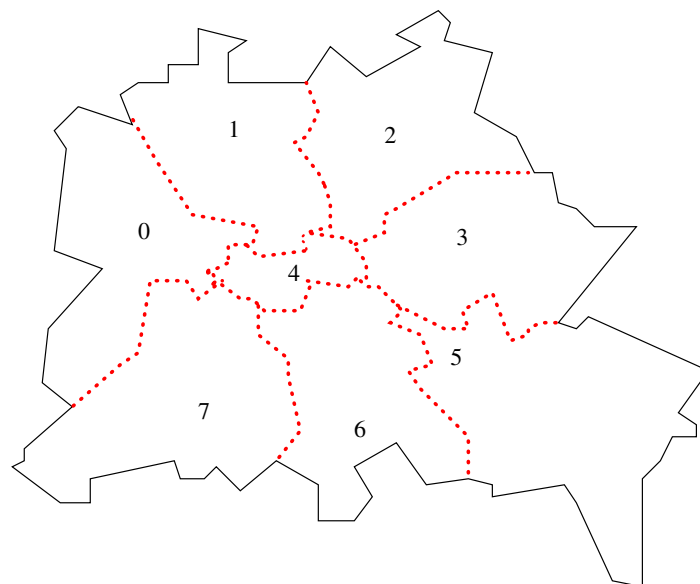
2. *Ziel-Sammelfahrten.* Bei den Ziel-Sammelfahrten dreht sich alles um. Nicht mehr gleiche Startorte sind gefragt, sondern gleiche Zielorte, nicht gleiche Anfangszeiten, sondern gleiche Endzeiten. Entsprechend wird vorgegangen. Es werden gemäß der zweiten Graphordnung (von spät nach früh) gleichzeitig oder im Rahmen eines Zeitfensters (*S.VORAUSSCHAU*) früher endende Einzelbestellungen als Kandidaten ausgewählt, wenn sie an demselben Stadtplan-Knoten enden wie die Vergleichsbestellung. Bei mehr als zwei gefundenen Kandidaten werden die *Endzeiten* der Kandidaten als gleich betrachtet und auf die Endzeit der Vergleichsbestellung, das ist diejenige mit der spätesten Endzeit, nivelliert.

Im Falle, daß sich außer der Vergleichsbestellung kein weiterer Kandidat findet, wird eine andere Einzelbestellung aus der Grundmenge als neue Vergleichsbestellung betrachtet und die Kandidatensuche wiederholt sich.

Die Fahrzeugaufteilung-Heuristik. Eine Sammelfahrt ist immer eine *Busbestellung*, auch wenn sie nur Fahrgäste befördert, die auch im Taxi fahren könnten. Sonst würden wir in die Disposition der Taxis eingreifen, was wir nicht wollen. Eine Frage der Parameterein-

stellung ist es, den Fall, daß alle Sammelfahrerkandidaten taxifähig sind, als Sammelfahrt zuzulassen oder nicht.

Für die Festlegung der Fahrzeugaufteilung wird die Kandidatenmenge sortiert. Die Sortierung soll zwei Zwecken dienen. Erstens soll sie ungefähr die Reihenfolge angeben, in der die Fahrtwünsche in der Sammelfahrt erfüllt werden. Zweitens soll sie die Kandidaten in die Gruppen einteilen, die, wenn nötig, die einzelnen Busse bilden. Bei den Start-Sammelfahrten erscheint es sinnvoll, von dem Sammelpunkt aus sich zunehmend zu entfernen, also erst Bestellungen im gleichen Bezirk zu bedienen und dann die Bestellungen nach Richtungen aufzuteilen. Diese „Richtungen“ haben wir in der Abstraktion der „Regionen“ Berlins zu modellieren versucht. Wir haben Berlin in acht Regionen aufgeteilt, indem wir Postzustellbezirke zusammengefaßt haben nach dem Kriterium der geographischen und der infrastrukturellen Zusammengehörigkeit (Einkaufszentren, Verkehrsströme, Zusammengehörigkeitsgefühl, etc.).



Diese Aufteilung ist anfechtbar und legitimiert sich allein daraus, daß sie allem Anschein nach gut funktioniert. Sie entstand aus der Not, denn es stand und steht uns bis heute der digitalisierte Stadtplan Berlins, den die Telebus-Zentrale benutzt, nicht zur Verfügung, sondern nur die Fahrzeiten- und Entfernungstabelle.

Die *Start-Sammelfahrt-Kandidaten* werden so sortiert: Erstens nach Regionen und dabei nach zunehmender Entfernung der Zielpunkte vom Sammelpunkt. Bei Bestellungen in der gleichen Zielregion wird nach Bezirken sortiert, und zwar nach der Unterschiedlichkeit der Postzustellnummer des Sammelpunktes von der der Zielpunkte. Je unterschiedlicher, desto später werden die Bestellungen einsortiert. Dies ist die Aufteilung in Richtungen.

Die nächsten beiden Feingliederungen sorgen dafür, daß Gruppen (gleicher Start- und Zielpunkt) nicht auseinander gerissen werden. Bei gleichen Ziel-Postzustellnummern wird nämlich der Unterschied in den Knotennummern des Sammelpunktes und der Zielpunkte zum Kriterium genommen. So wird erreicht, daß Gruppenfahrten aufeinanderfolgend einsortiert sind. Dadurch wird es bei einer Aufteilung auf mehrere Busse wahrscheinlich, daß eine Gruppe nicht durch die Aufteilung auf die Busse zerrissen wird. Schließlich wird unter gleichen Zielknotennummern nach dem benötigten Fahrzeugtyp der Kandidaten sortiert, in der Reihenfolge Doppelbus, Solobus, Taxi. Das hat den Vorteil, daß bei großen Gruppenfahrten die Anzahl der Doppelbusse minimiert wird, da die einen Doppelbus benötigenden Fahrtwünsche zusammenhängend auftauchen und nicht einzeln auf die Busse verstreut. Das minimiert die Kosten, da Doppelbusse teurer sind als Solobusse.

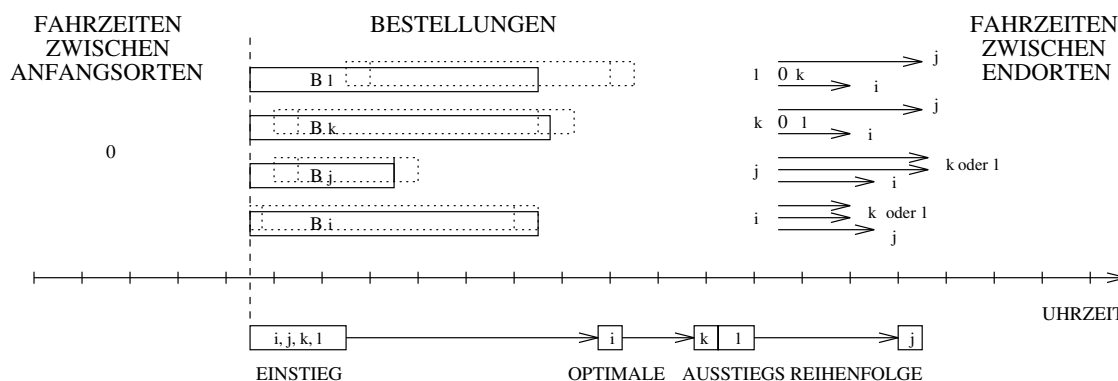
Die *Ziel-Sammelfahrt-Kandidaten* sollen sich, umgekehrt, immer mehr dem Sammelpunkt annähern. Deshalb wird die eben beschriebene Sortierung umgedreht. Außerdem ist jetzt nicht mehr das Ziel das Kriterium sondern *Startregion*, -bezirk, und -knoten des Kandidaten, ins Verhältnis gesetzt zum Sammelpunkt, der sich ja selbst am Ziel befindet.

Die Fahrzeugaufteilung funktioniert jetzt so: Nimm die Kandidaten in der Reihenfolge ihrer Anordnung und fülle damit einen Bus, bis er voll ist. Zwei Parameter `maxroll` und `maxsitz` geben an, was „voll“ bedeuten soll. Der zur Zeit gängigste Telebus-Fahrzeugtyp hat Platz für vier Rollstühle und drei Fahrgäste ohne Rollstuhl.

Die Reihenfolgebestimmung. Für die Bestellungen einer *Start-Sammelfahrt* muß die *optimale Ausstiegsreihenfolge*, also die Reihenfolge der Bedienung jeder einzelnen Bestellung, festgelegt werden. Die Einstiegsreihenfolge ist im Prinzip egal, da sich alle Beteiligten am selben Ort befinden, dem Sammelpunkt. Sie kann sich aber aus der Ausstiegsreihenfolge ergeben, falls die Rollstühle im Bus sich gegenseitig blockieren, so daß sie in der umgedrehten Ausstiegsreihenfolge eingeladen werden müssen. Auch kann die Einstiegsreihenfolge eine Rolle spielen, wenn der Sammelpunkt sich auf mehrere benachbarte Orte erstreckt. Hier sollte der Fahrer so entscheiden, daß die ursprünglich gewünschten Anfangszeiten möglichst gut eingehalten werden oder daß es für ihn günstig ist. Bei der *Ziel-Sammelfahrt* wird analog die *Einstiegsreihenfolge* festgelegt, die Ausstiegsreihenfolge bleibt freigestellt. Die Reihenfolge der einzelnen Bestellungen in der Sammelfahrt ist für uns dann optimal, wenn die Gesamtfahrzeit minimal ist. Das ist eine Optimierung im Interesse der Kunden. Die Reihenfolge ist unabhängig von den konkreten Anfangs- oder Endzeiten. Die minimale Bestellungsreihenfolge verändert sich nicht mit der Tageszeit.

Wir haben uns entschieden, bei der Berechnung der Reihenfolge zur Abwechslung einmal genau zu sein und sie wirklich optimal auszurechnen, indem alle möglichen Reihenfolgen aufgezählt werden. Für jede Permutation der Bestellungen (entsprechend jeder Aus-

oder Einstiegsreihenfolge) wird die Gesamtfahrzeit berechnet und mit der bisherigen Minimalfahrzeit verglichen. Der Aufwand dafür ist theoretisch immens hoch ($n!$), aber im Telebus-Fall mit, im Normalfall, maximal sieben Fahrtwünschen pro Bus (vier Rollstuhlplätze, drei Sitzplätze) erträglich ($7! = 5040$). Bei größeren Bussen und Sammelfahrten, die den gesamten Platz ausnutzen, kostet dieses Verfahren viel Zeit. Solche Sammelfahrten (und solche Busse) sind aber selten.

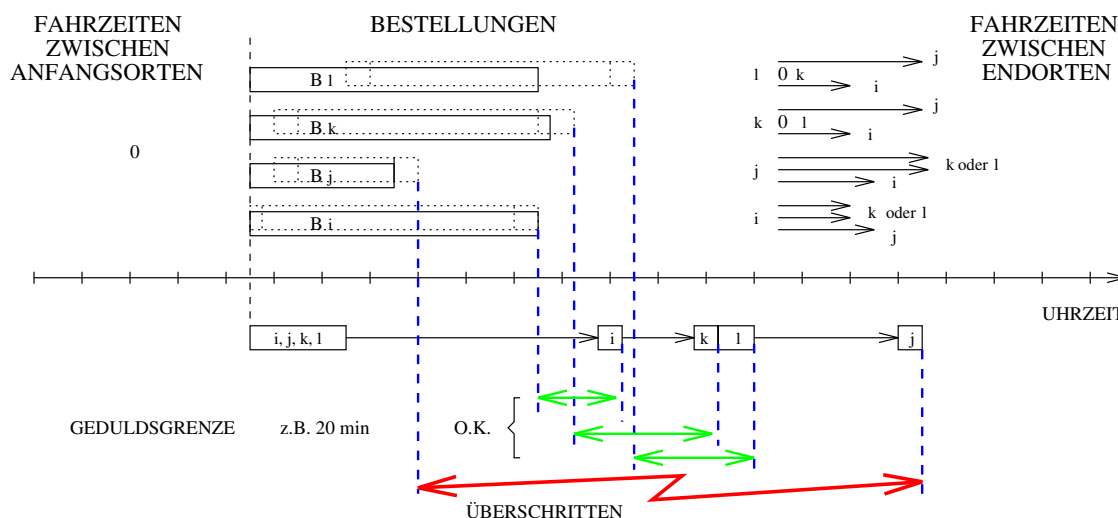


Die Zumutbarkeit-Heuristik. Niemand soll allzulange im Bus sitzen müssen. „Allzulange“ meint bei der *Start-Sammelfahrt* die Abweichung der neuen Endzeit jeder Bestellung in der Sammelfahrt von der ursprünglich gewünschten Zielzeit; bei der *Ziel-Sammelfahrt* darf die neue Anfangszeit nicht allzusehr von der gewünschten Startzeit abweichen. Um festzustellen, ob dieser Grundsatz verletzt wird, müssen zunächst die Ankunfts- oder Abfahrtszeiten der einzelnen Bestellungen in der Sammelfahrt neu berechnet werden, um sie mit ihren alten Zeiten, die sie bei individueller Beförderung eingehalten hätten, zu vergleichen.

Bei den *Start-Sammelfahrten* geht die Berechnung der neuen Endzeiten der einzelnen Bestellungen in der Sammelfahrt so: Die Einsteigezeitspanne am Anfang (Standzeit) ist nicht einfach die Summe der Anfangs-Standzeiten der einzelnen Bestellungen, denn das gemeinsame Zustiegen an einem Ort kann zum Teil gleichzeitig passieren, und es entfällt die wiederholte Suche nach der Adresse und der Wohnung. Wir rechnen zur Zeit so: Die Einstiegszeit wird durch die Anzahl der Rollstühle bestimmt. Jeder Rollstuhl benötigt `S_STANDZEIT_PRO_ROLLSTUHL` Minuten (derzeit 5 Minuten). Die Höchstgrenze der Einstiegszeit beträgt dabei `MAX_EIN_AUSSTIEGS_ZEIT`, derzeit 15 Minuten. Eigentlich stimmt diese Argumentation nur dann, wenn der Sammelpunkt wirklich nur ein Ort ist. Wir rechnen trotzdem in jedem Fall so, weil in der Sammelfahrt so viele Zeitberechnungen zusammenkommen, daß die Zeiten am Ende ziemlich realistisch sind.

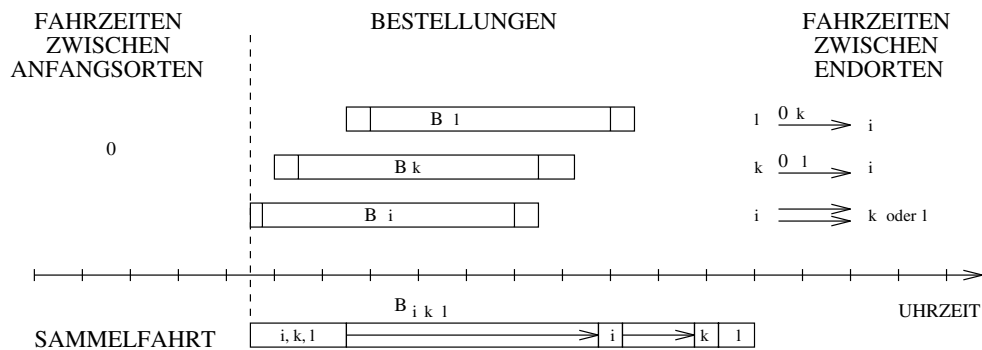
Nun müssen die neuen Endzeiten der einzelnen Fahrtwünsche in der Sammelfahrt berechnet werden. Die Endzeit der ersten Bestellung ergibt sich aus der Addition der nivellierten neuen Anfangszeit, der neu berechneten Standzeit am Sammelpunkt, der Fahrzeit vom Sammelpunkt zum eigenen Zielpunkt und der Standzeit dort. Die neue Endzeit jeder weiteren Bestellung in der Sammelfahrt ist die Summe aus der Endzeit der vorher ans Ziel gebrachten Bestellung, der Fahrzeit von dem vorherigen Zielpunkt zum eigenen Zielpunkt und der eigenen Standzeit am Ziel, die unverändert bleibt.

Die erste Bestellung ist immer die pünktlichste; aber je später eine Bestellung in der Sammelfahrt-Reihenfolge drankommt, desto mehr Geduld muß der Kunde haben. Deshalb wird die letzte, verspätetste Bestellung in der Sammelecke als erstes betrachtet. Die Zumutbarkeit für diesen Fahrgast wird so überprüft: Die ursprüngliche Endzeit seiner Bestellung wird verglichen mit der neu ausgerechneten Endzeit in der Sammelbestellung, und es wird geschaut, ob die Verspätung nicht mehr als `S_START_GEDULDSGRENZE` beträgt (derzeit 20 Minuten).



Ist das der Fall, wird die Bestellung aus der Sammelfahrt entfernt. Die Endzeiten der restlichen Bestellungen in der Sammelfahrt werden neu berechnet, denn die Standzeit am Sammelpunkt könnte sich durch den Hinauswurf der einen Bestellung verringert haben, und die neue letzte Bestellung in der Sammelfahrt wird auf eine unzumutbare Verspätung untersucht. Ist zum erstenmal die jeweils letzte Bestellung nicht zu verspätet, so endet dieses Verschiebungsverfahren (Verschiebung nämlich in den nächsten, noch nicht zusammengestellten Bus hinein). Wurden Bestellungen aus der Sammelfahrt entfernt, wird die Ausstiegsreihenfolge nochmals optimiert; dann ist die Start-Sammelfahrt fertig.

Die *Ziel-Sammelfahrten* werden analog überprüft. Hier werden nicht die Endzeiten neu



ausgerechnet, sondern die Anfangszeiten der einzelnen Bestellungen in der Sammelfahrt, analog der oben beschriebenen Rechnung. Am Sammelpunkt gilt wieder die Berechnung der Standzeit nach der Anzahl der Rollstühle. Entsprechend der obigen Strategie wird die Ziel-Sammelfahrt auf Unzumutbarkeit überprüft. Hier sind es die *Anfangszeiten* der einzelnen Bestellungen, die gegenüber den ursprünglichen Anfangszeiten zu verfrüht sein können, nämlich mehr als $S_ZIEL_GEDULDSGRENZE$ Minuten (derzeit 20 Minuten). Hier geht die Argumentation und die Strategie genau andersherum: Die letzte Bestellung fährt nie zu früh von ihrem Anfangsort ab; die erste Bestellung ist die potentiell verfrühteste. Deshalb wird hier jeweils die *erste* Bestellung aus der Sammelfahrt betrachtet und gegebenenfalls hinausgeworfen.

Kann es passieren, daß zwar die jeweils verspätetste oder verfrühteste Bestellung hinausgeworfen wurde, aber eine andere Bestellung, die die große Unpünktlichkeit ihrer Nachfolger bzw. Vorgänger verursacht hat, unbehelligt bleibt, somit also die falsche Bestellung hinausgeworfen wird? Dieser Gefahr wird durch die Sortierung der Kandidaten vorgebeugt. Zunächst kommen bei der Start-Sammelfahrt die nahen Bestellungen. Sie können nicht schlecht sein. Die Vorsortierung sollte idealerweise eine *Vorgruppierung* sein. Dazu benötigte man aber geographische Kenntnisse aus dem Stadtplan, der, wie gesagt, bis heute nicht geliefert wurde. Und so kann es kommen, daß eine oder mehrere Bestellungen der nächsten Gruppe in den Bus der vorherigen Gruppe hineinkommen und die Sammelfahrt nun in zwei getrennte Richtungen gehen soll. Dann wird aber genau diese zweite, unpassende Richtung wieder hinausgeworfen, da sie sich zusammenhängend am Ende der Sammelfahrt finden wird. Analog gilt diese Argumentation für die Ziel-Sammelfahrten.

Wir haben uns bei den Sammelfahrten entschlossen, nicht die in den Fahrtwünschen vereinbarte Pünktlichkeitsgrenze zum Maßstab zu nehmen, sondern die Gedulds- und Pünktlichkeitsgrenzen zu erhöhen, weil die Sammelfahrten ein wichtiges Instrument sind, um die Anzahl der Bestellungen zu reduzieren. Dadurch, daß von oder zu einem gemeinsamen Sammelpunkt gefahren wird, ist die Einsicht der Kunden in den Sinn der gemeinsamen Beförderung sicherlich höher als bei einer zwischendurch auf dem Weg stattfindenden Ein-

oder Anbindung. Beim konkreten Test im Telebus-Betrieb wird sich zeigen, ob diese Vermutung stimmt.

Sind nach der Überprüfung der Zumutbarkeit noch mindestens zwei Fahrtwünsche in der Sammelfahrt verblieben, so werden die in der Sammelfahrt enthaltenen Einzelbestellungen im Original aus dem Graphen gelöscht und dafür die Sammelfahrt als Ecke in den Graph eingefügt. Ist nur noch ein Fahrtwunsch in der Sammelfahrt übrig, wird die Sammelfahrt nicht in den Graphen übernommen, sondern wieder aufgelöst. Der übriggebliebene Fahrtwunsch bleibt im Bestellungsgraph als Einzelbestellung bestehen. Er wird aber aus der gerade betrachteten Kandidatenmenge gestrichen.

Sind nach dieser Disposition *einer* Sammelfahrt mindestens zwei noch nicht in eine Sammelfahrt hineindisponierte Kandidaten übrig, so wird die nächste Gruppe aus der Kandidatenmenge – wieder in der Reihenfolge der Kandidatensortierung – als Sammelfahrt disponiert. Aus der Sammelfahrt der vorherigen Gruppe hinausgeworfene Kandidaten sind nun die ersten in der Ordnung der Kandidatenmenge. So werden sie in den nächsten Bus verschoben. Das gesamte Verfahren wiederholt sich.

5.2.4 Implementierung

Die Sammelfahrt-Algorithmen sind in dem Modul `sammelfahrten.c` implementiert.

Der Permutationsgenerator. Für die Bestimmung der optimalen Ausstiegs- bzw. Einstiegsserienfolge werden alle möglichen Reihenfolgen, also alle Permutationen, der für je eine Sammelfahrt ausgewählten Kandidaten erzeugt. Diese Aufgabe erledigt ein *Permutationsgenerator*, der bei gegebener Permutation die nachfolgende Permutation ausrechnet. Wir haben den Algorithmus von Dijkstra[1976] implementiert. Dieser erwartet einen Vektor (Feld) der Länge n , der die Zahlen 1 bis n enthält (sinnvollerweise am Anfang in der Reihenfolge $1, \dots, n$), die dann permutiert werden. Wir haben einen Typ `perm_array_t` vereinbart, ein Feld, das sowohl die gewünschten Zahlen enthält als auch in jedem Feld-element einen Zeiger auf je einen der Kandidaten, die eine Sammelfahrt ergeben sollen. Die Zahlen werden permutiert, um die Permutationen in einer geordneten Reihenfolge zu erzeugen. Wichtig für unsere Zwecke ist aber, daß gleichzeitig die Zeiger permutiert werden und damit die Reihenfolge der Sammelfahrt-Kandidaten. In der Reihenfolge der Feld-elementzeiger im Kandidatenfeld `minimal_perm` können die Bestellungen sodann in die Sammelfahrt übernommen werden. In der Sammelfahrt-Ecke `Sammel` werden die Bestellungen verändert, indem die Zeiten neu ausgerechnet werden, während das Kandidatenfeld `minimal_perm` weiterhin auf die unveränderten Originalbestellungen zeigt.

Die Kandidatensortierung. Die Kandidaten für eine Sammelfahrt (inklusive der Vergleichsbestellung) merken wir uns als die auslaufenden Kanten einer Ecke namens **Merkecke**. Diese Ecke ist nicht Bestandteil des Graphen, sondern sie wird einmal am Anfang der Sammelfahrten-Generierung erzeugt. Zu jedem Kandidaten legen wir eine gerichtete Kante und nutzen die Möglichkeit der Kantengewichtung für die Sortierung aus. Die in dem Abschnitt über die Fahrzeugaufteilung beschriebene Sortierung der Kandidaten erhalten wir, indem wir die Kantenkosten aus den dort beschriebenen Anteilen, entsprechend gewichtet, zusammensetzen. Die umgekehrte Sortierung bei den Ziel-Sammelfahrten wird durch das Umdrehen des Vorzeichens jedes Kantengewichts erreicht. Die Kanten zu denjenigen Bestellungen, die bereits zu einer Sammelfahrt disponiert wurden, werden gelöscht. Dadurch verkleinert sich die Kandidatenmenge, die ursprüngliche Sortierung bleibt aber wegen der Transitivität der Ordnung erhalten. Nach der Disposition jeder Sammelfahrt-Kandidatenmenge (die aus mehreren Sammelfahrtbestellungen bestehen kann), sind *alle Kanten* der Merkecke gelöscht.

5.2.5 Strategien

Festlegung der Grundmenge. Die Grundmenge für die Sammelfahrten ist die Menge aller Einzelbestellungen, die „busfähig“ sind, also als Fahrzeugbedarf nicht „nur Taxi“ eingetragen haben. Bereits verknüpfte Fahrtwünsche wollen wir nicht als Kandidaten betrachten, weil wir keine verschiedenen Verknüpfungsformen innerhalb einer einzelnen Bestellung wollen. Die Grundmenge wird durch einen Grundmengenparameter **grundmenge** festgelegt. Sollen also alle diese Bestellungen als Kandidaten betrachtet werden gilt: **grundmenge = alle_bestellungen**. Eine Möglichkeit ist, die Sammelfahrten nicht auf dem ganzen Graphen zu erzeugen, sondern nur auf einem Teil oder auf den verschiedenen Teilen mit unterschiedlichen Parametereinstellungen. Damit wird die Grundmenge eingeschränkt.

Man kann z.B. nur die *Bus*bestellungen zu Sammelfahrten verknüpfen (**grundmenge = nur_busbestellungen**), getreu der Devise, daß eine Fahrt im Taxi immer billiger ist als eine Fahrt im Bus. Es werden dann insbesondere nicht zwei oder mehr Taxibestellungen dadurch zu einer Busbestellung, daß sie zu einer Sammelfahrt zusammengefaßt werden. Andererseits fallen dadurch vielleicht gewollte und geplante Sammelfahrten weg. Auf jeden Fall sind weniger Busbestellungen zu disponieren als beim Sammelfahrt-Erzeugen auf dem gesamten Graphen. Dadurch sinkt die Anzahl der benötigten Busse; der Anteil der Taxifahrten steigt.

Größere Gruppen fahren häufig jeden Tag von oder zu einem der Behindertentreffpunkte, deren Adresse im Fahrtwunsch mit einem * und einem Kürzel gekennzeichnet ist. Diese „Stern-Bestellungen“ können als Grundmenge genommen werden (**grundmenge = nur_sternbestellungen**). Weil hier oft große Gruppen gefahren werden, könnte man hier die Geduldsgrenzen erhöhen oder größere Fahrzeuge (Neoplan-Busse) zulassen.

Teil-Sammelfahrten. Neben der Einschränkung der *Grundmenge*, auf der die Kandidaten ausgewählt werden, kann man eine weitere Einschränkung durch Teilmengenbildung auf den Kandidatenmengen erhalten, indem nur bestimmte Kandidatenmengen für „gut“ erklärt werden. Eine Variante ist, nur diejenigen *Kandidatenmengen* zu berücksichtigen, die *mindestens eine* Busbestellung enthalten (`teilmenge = nur_bus_sammelfahrten`). Das schließt alle reinen Taxigruppen aus, ist aber nicht so harsch wie die Grundmengeneinschränkung auf die Nur-Busbestellungen.

Eine andere Strategie ist, nur die wirklichen *Gruppenfahrten* (gleicher Start- und Zielort) zu verknüpfen (`teilmenge = nur_gruppenfahrten`), zum Beispiel mit großen Bussen. Bei Gruppenfahrten wird nicht auf Zumutbarkeit getestet.

Sammelfahrten mit Mindestgröße. Eine Strategie könnte sein, nur diejenigen Kandidatenmengen zu Sammelfahrten zu verknüpfen, die mehr als zwei Bestellungen umfassen, oder größere Kandidatenmengen mit erweiterten Kapazitäten oder Geduldsgrenzen zu verknüpfen. Dafür ist der Parameter `min_gruppengroesse` vorgesehen, der im Standardfall auf 2 gesetzt ist. Es werden nur diejenigen Kandidatenmengen berücksichtigt, die mindestens so viele Kandidaten umfassen.

Reihenfolge der Sammelfahrten. Wir haben bisher immer davon gesprochen, daß von einer Vergleichsbestellung ausgehend die Kandidaten für Sammelfahrten am gleichen Ort und zur gleichen Zeit wie die der Vergleichsbestellung aufgesammelt werden. In welcher Reihenfolge werden die Vergleichsbestellungen ausgesucht? Wir haben die natürliche Reihenfolge genommen: Die Ordnung der Ecken.

Bei den *Start-Sammelfahrten* wird mit der am frühesten beginnenden Einzelbestellung der Grundmenge als Vergleichsbestellung begonnen. Nach jeder Betrachtung der Kandidatenmenge (natürlich auch nur *Einzelbestellungen*), die diese Vergleichsbestellung um sich versammelt, und der Disposition zu einer oder mehreren Sammelfahrten, wird die zeitlich nächste Einzelbestellung aus der Grundmenge zur Vergleichsbestellung. Und so fort, bis die letzte Einzelbestellung erreicht ist.

Bei den *Ziel-Sammelfahrten* ist es analog die Ordnung der Ecken absteigend nach der Endzeit, die als Reihenfolge für die Vergleichsbestellungen genommen wird. Der Graph wird von der am spätesten endenden Einzelbestellung bis zur am frühesten endenden Einzelbestellung durchgegangen.

Reihenfolge von Start- und Ziel-Sammelfahrten. Eine Möglichkeit ist, erst die Start-Sammelfahrten und danach die Ziel-Sammelfahrten zu disponieren. Genauso gut

kann man es umgekehrt machen. Oder gleichzeitig. Wir haben bisher meistens die Start-Sammelfahrten vor den Ziel-Sammelfahrten erzeugt. Es kommen sehr unterschiedliche Sammelfahrten heraus; im Ergebnis unterscheidet sich die Anzahl aber fast gar nicht voneinander.

SAMMELFAHRTEN

STRATEGIE 4-3er 20 min Geduld	ANZAHL		
	Gesamt	Start	Ziel
erst Start- dann Ziel- Sammelfahrten	173 100%	108 62%	65 38%
erst Ziel- dann Start- Sammelfahrten	167 100%	53 32%	114 68%

Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl der Sammelfahrten mit 20 Minuten Geduldsgrenze und einer Buskapazität von 4 Rollstuhl- und 3 Sitzplätzen. Erst Start-, dann Zielsammelfahrten und umgekehrt.

Sammelfahrten auf Tageszeiten. Schließlich können wir Sammelfahrten innerhalb eines vorgegebenen Zeitintervalls erzeugen. So kann man die Fahrtwünsche zu unterschiedlichen Tageszeiten unterschiedlich stark zusammenfassen, während der Spitzenzeiten die Geduldsgrenzen erhöhen oder höhere Verspätungen zulassen.

5.2.6 Handvorgabe-Sammelfahrten

Oft kommt es vor, daß eine Gruppe genau so fahren will oder soll, wie gedacht, das Programm aber eine andere Busaufteilung berechnet. Oder beim Durchschauen des Tourenplanes erkennt man, daß das Sammelfahrten-Programm einige schlechte Busaufteilungen auch bei zufälligen Gruppen vorgenommen hat. Diese Fälle wird man nie durch Automatisieren vollständig beseitigen können, egal wie sehr die Sammelfahrt-Algorithmen verbessert werden. Deshalb muß es möglich sein, Fahrtwunschverknüpfungen oder auch die Verhinderung von Verknüpfungen vorzugeben. Das Programm hat dann diesen Anweisungen zu folgen. Für den Fall der Sammelfahrten ist diese Möglichkeit implementiert. Die Funktion `handvorgabe_sammelfahrten` erwartet eine Handvorgabe-Datei `xxxx.vorgabe`. Das ist eine Textdatei, in der jede Zeile eine Folge von Fahrtwunschnummern des zu disponierenden Tages enthält, die zu einer Sammelbestellung zusammengefaßt werden sollen. Enthält eine Zeile nur *eine* Fahrtwunschnummer, so soll dieser Fahrtwunsch *alleine* befördert werden. Die Reihenfolge, in der die Fahrtwünsche einer Handvorgabe-Bestellung ausgeführt werden sollen, bestimmt das Programm dennoch selber. Schließlich ist hierbei keine *Heuristik*

im Spiel, die auch mal Unsinn erzeugen kann, sondern ein Algorithmus, der die *optimale Reihenfolge* ermittelt.

5.2.7 Statistiken

Wir wollen nun anhand einiger Statistiken, die die Woche vom 1.–7. Februar 1993 auswerten, verdeutlichen, wie hoch die Reduktion der Bestellmenge durch die Sammelfahrtverknüpfung ist und wie sich unterschiedliche Einstellungen der Geduldsgrenzen und der Fahrzeugkapazität auswirken.

Eine interessante Frage ist zunächst: Wie groß sind eigentlich die einzelnen Kandidatenmengen? Wieviel macht die Beschränkung durch die Fahrzeugkapazität eigentlich aus? Werden viele Kandidatenmengen auf mehrere Busse aufgeteilt? Es stellt sich heraus, daß die allermeisten Kandidatenmengen aus nur zwei Fahrtwünschen bestehen. Große – geplante oder zufällige – Gruppen sind die Ausnahme. Noch extremer wird dieses Bild, wenn wir als Kandidaten nur noch die Busbestellungen zulassen.

KANDIDATENMENGEN FÜR SAMMELFAHRTEN											
S T A R T	FW-ANZAHL KANDI- DATENMENGE	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Anzahl	88	17	7	5	1	1	3	0	0	1
	in Prozent	72	14	6	4	1	1	2	0	0	1
Z I E L	FW-ANZAHL KANDI- DATENMENGE	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Anzahl	70	10	2	1	0	0	0	0	0	0
	in Prozent	84	12	2	1	0	0	0	0	0	0
G E S A M T	FW-ANZAHL KANDI- DATENMENGE	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Anzahl	158	27	9	6	1	1	3	0	0	1
	in Prozent	77	13	4	3	0,5	0,5	1	0	0	0,5

KANDIDATENMENGEN FÜR SAMMELFAHRTEN , DIE NUR BUSBESTELLUNGEN ENTHALTEN											
S T A R T	FW-ANZAHL KANDI- DATENMENGE	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Anzahl	36	9	4	6	1	1	0	0	0	0
	in Prozent	63	16	7	10	2	2	0	0	0	0
Z I E L	FW-ANZAHL KANDI- DATENMENGE	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Anzahl	31	6	0	0	0	0	0	0	0	0
	in Prozent	84	16	0	0	0	0	0	0	0	0
G E S A M T	FW-ANZAHL KANDI- DATENMENGE	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Anzahl	67	15	4	6	1	1	0	0	0	0
	in Prozent	71	16	4	6	1	1	0	0	0	0

Donnerstag, 4.2.1993. Die Größe der Sammelfahrt-Kandidatenmengen.

Die meisten Sammelfahrten bestehen also aus nur zwei Fahrtwünschen, weil gar nicht mehr Kandidaten vorhanden sind. Darüberhinaus werden die ganz großen Gruppen auf mehrere Busse aufgeteilt.

Das Ergebnis sieht dann z.B. so aus:

SAMMELFAHRTEN

STRATEGIE	FÜLLE				
	2	3	4	5	6
4-3er 20 min					
erst Start- dann Ziel- Sammelfahrten	151 87%	15 9%	6 3%	1 0,5%	0 0%
erst Ziel- dann Start- Sammelfahrten	143 86%	14 8%	10 6%	0 0%	0 0%

Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl der Fahrtwünsche in den Sammelfahrten mit 20 Minuten Geduldsgrenze und einer Buskapazität von 4 Rollstuhl- und 3 Sitzplätzen.

Die Verknüpfung von Fahrtwünschen hat den Nachteil, daß sie die Dauer der Bestellungen verlängert. Eine Bus-Einzelbestellung hatte, wie wir uns erinnern, eine durchschnittliche Gesamtdauer von 40 Minuten, eine durchschnittliche Fahrtdauer von 25 Minuten und eine Standdauer von 15 oder 20 Minuten. Wie lange dauert eine *Sammelfahrt* im Durchschnitt?

SAMMELFAHRTEN

Ø TYP in MIN	DOPPELBUS		SOLOBUS	
	MO - FR	SA - SO	MO - FR	SA - SO
STAND- DAUER	20	23	24	25
FAHRT- DAUER	30 (25 - 35)	37 (25 - 50)	30 (20 - 45)	36 (25 - 45)
GESAMT- DAUER	50	60	54	61

Gesamtdauer, Fahrtdauer und Standdauer der Sammelfahrten.

Wie reduzieren nun die zu Sammelfahrten verknüpften Fahrtwünsche die Bestellungs-
menge? Auffallend ist, daß bei der Grundmenge „alle Bestellungen“ die Anzahl der Busbestel-
lungen kaum reduziert wird, dagegen die Anzahl der Taxibestellungen überproportional.
Der Grund ist, daß eine Sammelfahrt, die nur taxifähige Fahrtwünsche befördert, aus Ta-
xibestellungen Busbestellungen macht, weil jede Sammelfahrt eine Busbestellung ist.

REDUKTION DER BESTELLMENGE DURCH SAMMELFAHRTEN

KAPAZITÄT GEDULDSGRENZE	TAG	MO			DI			MI			DO			FR			SA			SO		
		Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi
4-3er	Anzahl	232	62	170	267	81	186	253	80	173	274	89	185	206	72	134	114	42	72	112	59	53
	keine Prozent	24	13	36	25	14	38	25	15	37	25	15	39	22	14	32	19	12	28	20	15	29
4-3er 30 min	Anzahl	213	51	162	241	68	173	225	63	162	238	72	166	184	60	124	103	36	67	100	54	46
	Prozent	22	10	34	23	12	35	22	12	34	22	12	35	20	11	29	17	11	26	17	14	25
4-3er 20 min	Anzahl	182	40	142	212	57	155	202	52	150	203	63	140	157	50	107	87	28	59	88	47	41
	Prozent	19	8	30	20	10	32	20	10	32	19	10	29	17	10	25	15	82	23	15	12	22
4-3er 15 min	Anzahl	155	39	116	177	38	139	172	52	120	172	55	117	133	41	92	70	19	51	74	41	33
	Prozent	16	8	25	17	7	29	17	10	25	16	9	25	14	8	22	12	6	20	13	11	18
2-3er 20 min	Anzahl	172	27	145	203	47	156	189	40	149	190	50	140	149	39	110	80	22	58	81	39	42
	Prozent	18	6	31	19	8	32	19	7	32	18	8	29	16	7	26	13	6	23	14	10	23
6-4er 30 min	Anzahl	218	57	161	246	73	173	226	65	161	239	73	166	189	65	124	103	36	67	100	54	46
	Prozent	23	12	34	23	13	35	22	12	34	22	12	35	20	12	29	17	11	26	17	14	25

Absolute und prozentuale Reduktion der Bestellungsanzahl durch Sammelfahrten auf der Menge aller
Einzelbestellungen mit unterschiedlichen Parametereinstellungen.

Deshalb gibt es die Möglichkeit, die Grundmenge nur aus den Busbestellungen zu bilden.

REDUKTION DER BESTELLMENGE DURCH SAMMELFAHRTEN, DIE NUR BUSBESTELLUNGEN ENTHALTEN

TAG KAPAZITÄT GEDULDSGRENZE		MO			DI			MI			DO			FR			SA			SO		
		Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi
4-3er	Anzahl	84	84	0	98	98	0	95	95	0	99	99	0	79	79	0	42	42	0	60	60	0
	20 min Prozent	9	17	0	9	17	0	9	18	0	9	16	0	8	15	0	7	12	0	10	15	0
2-3er	Anzahl	77	77	0	88	88	0	87	87	0	89	89	0	70	70	0	36	36	0	52	52	0
	20 min Prozent	8	16	0	8	16	0	9	16	0	8	15	0	7	13	0	6	11	0	9	13	0
6-4er	Anzahl	99	99	0	113	113	0	106	106	0	115	115	0	96	96	0	49	49	0	67	67	0
	20 min Prozent	10	20	0	11	20	0	10	19	0	11	19	0	10	18	0	8	14	0	12	17	0

Absolute und prozentuale Reduktion der Bestellungsanzahl durch Sammelfahrten auf der Menge der Busbestellungen mit unterschiedlichen Parametereinstellungen.

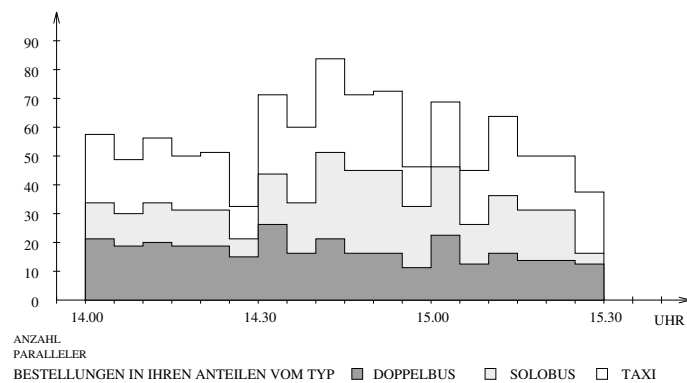
Eine dritte Variante ist, die Sammelfahrt-Verknüpfung in drei Teile zu teilen. Erst werden die großen Gruppen verknüpft, die von oder zu den markanten *-Punkten fahren. Dann werden nur auf den Busbestellungen Start- und Zielsammelfahrten erzeugt.

REDUKTION DER BESTELLMENGE DURCH STERNFAHRTEN UND DURCH SAMMELFAHRTEN, DIE NUR BUSBESTELLUNGEN ENTHALTEN

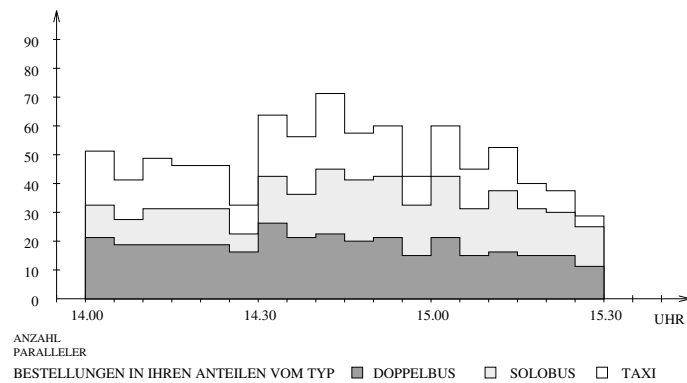
TAG KAPAZITÄT GEDULDSGRENZE		MO			DI			MI			DO			FR			SA			SO		
		Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi	Ges.	Bus	Taxi
4-3er	Anzahl	116	80	36	130	101	29	125	91	34	124	94	30	120	80	40	62	41	21	70	60	10
	20 min Prozent	12	17	8	12	18	6	12	17	7	11	15	6	13	15	9	10	12	6	12	15	1

Absolute und prozentuale Reduktion der Bestellungsanzahl durch Sammelfahrten erst auf der Menge der „Sternbestellungen“, danach auf der Menge der Busbestellungen mit unterschiedlichen Parametereinstellungen.

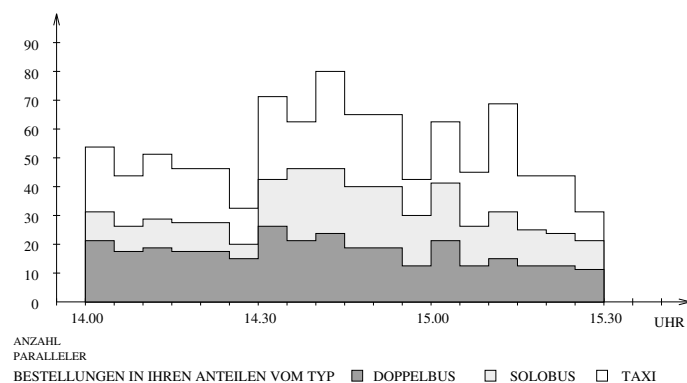
Wir wollen auf der nächsten Seite diese Reduktionen für die Spitzenzeit am Donnerstag, dem 4.2.1993, unter der Lupe betrachten. Zum Vergleich drucken wir noch einmal die ursprüngliche Kurve ab, die *vor* der Fahrtwunschverknüpfung vorlag.



Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Einzelbestellungen zwischen 14 Uhr und 15.30 Uhr.



Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Bestellungen zwischen 14 Uhr und 15.30 Uhr, nachdem Sammelfahrten auf der gesamten Einzelbestellungsmenge erzeugt wurden.

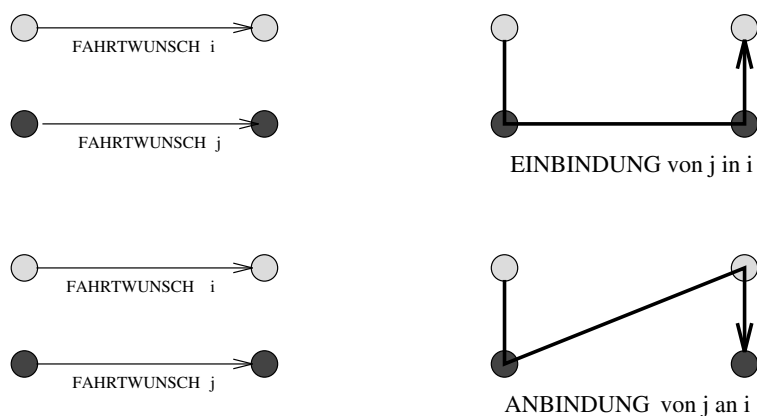


Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Bestellungen zwischen 14 Uhr und 15.30 Uhr, nachdem Sammelfahrten nur auf der Menge der Busbestellungen erzeugt wurden.

5.3 Ein- und Anbindungen

5.3.1 Definition

Zwei Fahrtwünsche gehen eine *Bindung* ein, wenn sie einen Teil ihrer Strecke gemeinsam befördert werden sollen. Eine *Einbindung* ist eine Fahrt, die von dem Startpunkt des *ersten* zum Startpunkt des *zweiten* Fahrtwunsches führt, dann zum Zielpunkt des *zweiten* und schließlich zum Zielpunkt des *ersten*. Eine *Anbindung* ist eine Fahrt, die genauso startet aber dann erst zum Zielpunkt des *ersten* und danach zum Zielpunkt des *zweiten* führt. Bei der Einbindung wird die zweite in die erste ganz integriert. Bei der Anbindung werden beide jeweils halb allein und halb gemeinsam befördert.



Als Fahrtwunschverknüpfung kennen wir bereits die Sammelfahrten. Alle Sammelfahrten, die nur aus einem *Paar* bestehen, könnten wir auch als Ein- oder als Anbindung betrachten. In diesen Spezialfällen ist eine Sammelfahrt gleich einer Einbindung gleich einer Anbindung.

Lassen wir diese Spezialfälle mal außen vor und folgen dem Gedanken: Wie können die restlichen Fahrtwünsche verknüpft werden, so daß die Kosten bei zugesicherter Servicequalität minimiert werden? Gäbe es keine Standzeiten, Service-, Ein- und Ausstiegszeiten am Start oder Ziel, könnte man viele Lösungsansätze ausprobieren, die über die *einfache* Ein- oder Anbindung von nur je zwei Fahrtwünschen hinausführen. Ginge es uns nur um eine Optimierung der Kapazitätsauslastung in den Bussen, würden wir also die Kosten und Zeiten vernachlässigen und den Behinderten viel Geduld zumuten, wäre die Kombination mehrfacher Ein- und Anbindungen der Schlüssel zum Erfolg. Aber zum einen hat jede Busbestellung eine Standzeit von insgesamt mindestens 5 Minuten, die nicht vernachlässigt werden darf. Jede größere Ein- oder Anbindung wird schnell unzumutbar. Zum anderen sind die großen Busse erheblich teurer als die kleinen und die wiederum als die Taxis. Das bedeutet: wenn im wesentlichen die Kosten und die Servicequalität darüber entscheiden,

wie disponiert wird, heißt die Devise: Große Busse nur einsetzen, wenn sie Gruppen fahren, sonst kleine Busse oder Taxis nehmen.

Deshalb haben wir uns entschieden als weitere Verknüpfungsform neben den Sammelfahrten (Gruppenfahrten) lediglich *einfache* Ein- und Anbindungen von je zwei Fahrtwünschen vorzunehmen. Es geht also darum, unter den Fahrtwünschen Paarungen zu finden, die zeitlich etwa parallel liegen und deren Wege wir in gewisser Weise verweben können.

Bevor wir uns fragen, wann zwei Fahrtwünsche als Ein- oder Anbindung ineinander verwoben werden können, wollen wir uns wie bei den Sammelfahrten erst darüber Gedanken machen, aus welcher Grundmenge wir Ein- und Anbindungskandidaten auswählen. Wir unterscheiden an dieser Stelle drei Möglichkeiten: Entweder sind beide Kandidaten nicht taxifähige Fahrtwünsche, oder mindestens einer von beiden ist nicht taxifähig, oder es ist egal, ob sie taxifähig sind oder nicht. Im ersten Fall sind nur Ein- oder Anbindungen auf der Menge der *Busbestellungen* möglich. *Beide* müssen Bestellungen sein, die nur mit dem Bus fahren können. Im zweiten Fall können auch taxifähige Bestellungen dabei sein, aber nur dann, wenn *mindestens eine* von beiden nur mit dem Bus fahren kann. Im dritten Fall ist die Kandidatenmenge der ganze Bestellungsgraph. Weil wir nur einfache Ein- und Anbindungen vornehmen wollen, müssen Kandidaten stets *Einzelbestellungen* sein.

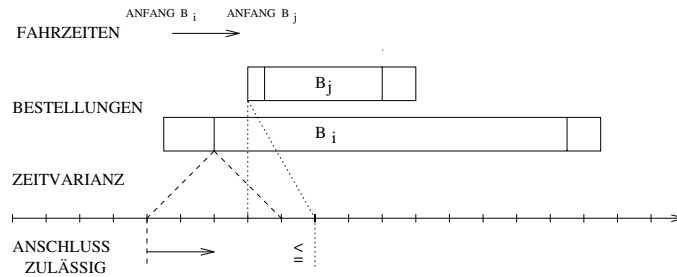
5.3.2 Anschluß finden

„Heiratskandidaten“ sind also nur Fahrtwünsche, die aus der jeweils vorgegebenen Kandidatenmenge kommen und die solo sind: *Einzelbestellungen*. Um von einer Einzelbestellung B_i aus eine passende Ein- oder Anbindungskandidatin B_j zu finden, brauchen wir für jede Ecke nicht den ganzen Graphen zu durchsuchen. Als Ein- oder Anbindungskandidaten einer Ecke B_i kommen sinnvollerweise nur solche Nachfolger in Frage, deren Anfangszeiten zwischen der Anfangs- und der Endzeit von B_i liegen. Unter diesen testen wir, ob von B_i aus zu ihnen ein zulässiger Anschluß existiert.

Definition. Ein Anschluß von B_j an B_i ist *zulässig*, falls früheste Abfahrtszeit(B_i) + Fahrzeit(Anfangsort(B_i) → Anfangsort(B_j)) ≤ späteste Anfangszeit(B_j).

Wir haben in der Definition gleich die Zeitvarianz der Bestellungen eingebaut, um möglichst viele Ein- oder Anbindungen zu finden und unter ihnen die besten auszuwählen. Gerade bei der Verknüpfung von Paaren kommt es auf die Flexibilität jedes Einzelnen an. Ist ein Anschluß zweier Ecken zulässig, berechnen wir zunächst die neuen Anfangs- und Abfahrtszeiten wie folgt:

neue Anfangszeit(B_j) :=
 $\max[\text{früheste Abfahrtszeit}(B_i) + \text{Fahrzeit}(\text{Anfangsort}(B_i) \rightarrow \text{Anfangsort}(B_j)), \text{frühester Anfang}(B_j)]$
neue Abfahrtszeit(B_j) := neue Anfangszeit(B_j) + Anfangsstandzeit(B_j)



neue Abfahrtszeit(B_i) :=

$\min[\text{neue Anfangszeit}(B_j) - \text{Fahrzeit}(\text{Anfangsort}(B_i) \rightarrow \text{Anfangsort}(B_j)), \text{späteste Abfahrtszeit}(B_i)]$

neue Anfangszeit(B_i) := $\text{neue Abfahrtszeit}(B_i) - \text{Anfangsstandzeit}(B_i)$

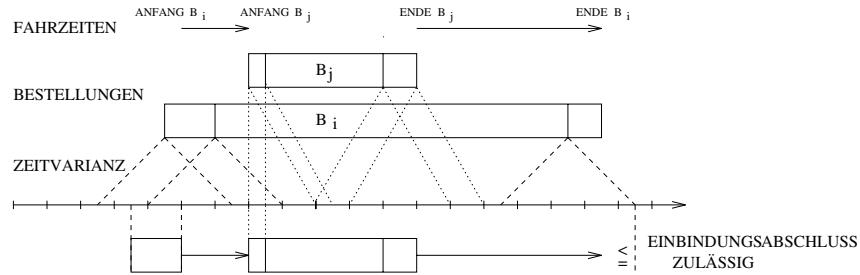
Die Berechnung der *neuen Anfangszeit von B_j* kann man sich so klar machen: Entweder wir sind mit B_i zu früh und müssen im Modell am Anfangsort von B_j ein wenig warten, bis B_j frühestens abgeholt werden wollte (1. Fall). Oder wir sind im Rahmen der Zeitvarianz pünktlich dort (2. Fall). Im zweiten Fall kann im Modell ohne Warten der Service für und das Zusteigen von B_j beginnen. Ist der Anschluß zulässig, gibt es nur diese beiden Fälle, und die in Telebuszeit „größere“ Uhrzeit muß die Lösung sein. Aus der neuen *Anfangszeit* können wir direkt die neue *Abfahrtszeit* von B_j berechnen, denn innerhalb einer Bestellung betrachten wir die Standzeit als Konstante.

Erst wenn die neue Anfangszeit von B_j berechnet ist, können wir die *neue Abfahrtszeit von B_i* festlegen. Lag der 2. Fall vor, müssen wir nur die Fahrzeit zurückrechnen und erhalten damit eine genaue Abfahrtszeit für B_i , die in diesem Fall sicher im von B_i gewünschten Pünktlichkeitsrahmen liegt. Lag aber der 1. Fall vor, ist die neue Anfangszeit von B_j ihre früheste Anfangszeit, und wir mußten am Anfangsort von B_j möglicherweise eine Wartezeit einkalkulieren. Bei der Subtraktion der Fahrzeit kann also eine Abfahrtszeit für B_i herauskommen, die „größer“ als deren späteste Abfahrtszeit ist. Für die neue Abfahrtszeit von B_i dürfen wir aber höchstens die späteste Abfahrtszeit von B_i nehmen. Ist die Subtraktion „kleiner“ als die späteste Abfahrtszeit von B_i , dann ist sie die Lösung. Im umgekehrten Fall wird die späteste Abfahrtszeit von B_i die neue Abfahrtszeit von B_i .

5.3.3 Abschlüsse finden

Ab diesem Punkt gehen Ein- und Anbindungen getrennte Wege. Eine Einbindung würde jetzt erst B_j zu seinem Ziel bringen und dann B_i . Bei einer Anbindung wird erst B_i abgesetzt und dann B_j . Im ersten Fall, der Einbindung, muß folgender Abschluß zulässig sein:

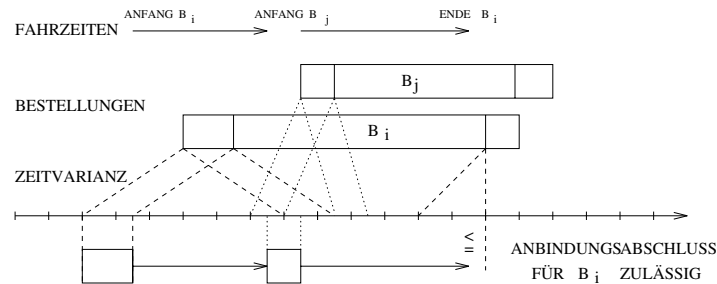
Definition. Ein *Einbindungsabschluß* von B_j in B_i ist *zulässig*, falls $\text{neue Anfangszeit}(B_j) + \text{Gesamtdauer}(B_j) + \text{Fahrzeit}(\text{Endort}(B_j) \rightarrow \text{Endort}(B_i)) \leq \text{späteste Ankunftszeit}(B_i)$.



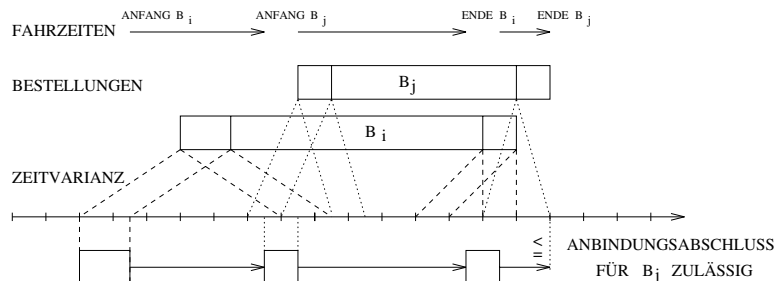
Diese Bedingung besagt, daß trotz des Umweges über B_j immer noch die pünktliche Ankunft von B_i zugesichert ist.

Bei einer *Anbindung* müssen zwei Abschlüsse zulässig sein. In diesem Fall wird auch B_j auf einem Umweg befördert, will aber trotzdem, wie gewünscht, pünktlich ankommen. Zu beachten ist, daß jetzt Zickzack gefahren wird.

Definition. Ein *Anbindungsabschluß* ist für B_i zulässig, falls neue Abfahrtszeit(B_j) + Fahrzeit(Anfangsort(B_j) → Endort(B_i)) ≤ späteste Ankunft(B_i).

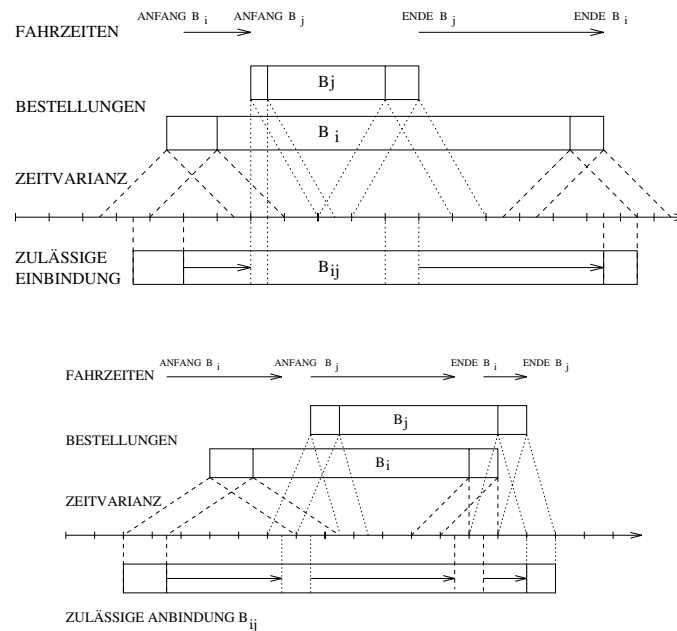


Definition. Ein *Anbindungsabschluß* ist für B_j zulässig, falls neue Abfahrtszeit(B_j) + Fahrzeit(Anfangsort(B_j) → Endort(B_i)) + Endstandzeit(B_i) + Fahrzeit(Endort(B_i) → Endort(B_j)) ≤ späteste Ankunftszeit(B_j).



5.3.4 Zulässige und vertretbare Bindungen

Ist von einer Ecke B_i aus der Anschluß und der Einbindungsabschluß einer Ecke B_j zulässig, sagen wir: die *Einbindung* ist *zulässig*. Von einer *zulässigen Anbindung* sprechen wir genau dann, wenn der Anschluß, der Anbindungsabschluß für B_i und der für B_j zulässig ist.



Bleibt zu fragen: Wann ist eine zulässige Ein- oder Anbindung den Kunden gegenüber vertretbar? Wir wollen bei Zeitverschiebungen neben der Pünktlichkeit auch die Geduldstoleranz berücksichtigen. Bei einer *Einbindung* wird nur dem Kunden aus der Bestellung B_i Geduld abverlangt. Wie lange dauert der Umweg? Die einfachste Rechnung ist:

$$\text{Einbindungs-Umwegdauer}(B_i) := \text{Gesamtdauer}(B_{ij}) - \text{Gesamtdauer}(B_i)$$

Eine zulässige *Einbindung* B_{ij} ist *vertretbar* genau dann, wenn die Einbindungs-Umwegdauer für B_i kleiner oder gleich der Einbindungs-Geduldsgrenze ist (E_GEDULDSGRENZE, zur Zeit 15 Minuten).

Damit wir eine *Anbindung* für vertretbar halten, muß die *Anbindungs-Umwegdauer* für B_i wie die für B_j kleiner als deren Geduldsgrenze sein. Bei der Berechnung dieser Umwegzeiten geht die Rechnung nicht so einfach. Wenn wir sagen, daß die *Anschlußzeit* die Differenz aus der neuen Anfangszeit von B_j und der neuen Abfahrtszeit von B_i ist, dann läßt sich die Umwegdauer für B_i wie folgt ermitteln:

$$\begin{aligned} \text{Anbindungs-Umwegdauer}(B_i) &:= \text{Anschlußzeit} + \text{Anfangs-Standzeit}(B_j) + \text{Fahrzeit}(\text{Anfangsort}(B_j) \\ &\rightarrow \text{Endort}(B_i)) - \text{Fahrtdauer}(B_i) \end{aligned}$$

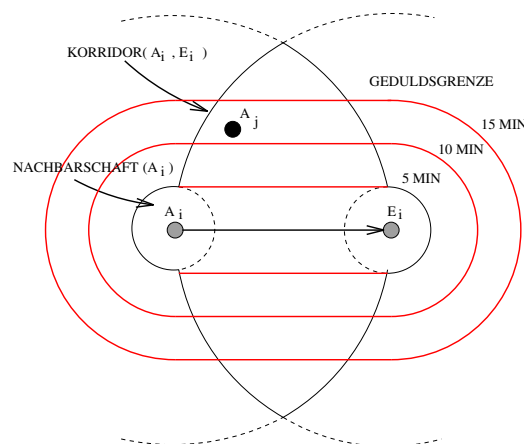
Wir müssen mit der Anschlußzeit rechnen, weil, wie oben beschrieben, der Fall auftreten kann, daß am Anfangsort von B_j möglicherweise gewartet werden muß. Diese zusätzliche Wartezeit wird bei einer vernünftigen Parametereinstellung zwar nur wenige Minuten ausmachen, aber diese Minuten können das Geduldsfaß zum Überlaufen bringen, und wir wollen sie deswegen nicht vernachlässigen. Die Umwegdauer für B_j ist direkt berechenbar:

Anbindungs-Umwegdauer(B_j) := Fahrzeit(Anfangsort(B_j) → Endort(B_i)) + End-Standzeit(B_i) + Fahrzeit(Endort(B_i) → Endort(B_j)) – Fahrdauer(B_j)

Diese Rechnungen macht man sich am besten an den Bildern klar. Die Geduldsgrenzen heißen im Programm `A_GEDULDSGENZE_i` und `A_GEDULDSGENZE_j` und betragen zur Zeit ebenfalls 15 Minuten.

Bevor wir in unserem Program die Vertretbarkeit einer Ein- oder Anbindung testen, überprüfen wir, ob der *Ein-* bzw. *Anbindungsweg gut* ist. Wir sagen: Bei einem guten Einbindungsweg muß der Anfang und das Ende der eingebundenen Bestellung *günstig zum Fahrtweg* der einbindenden Bestellung liegen. Bei einem guten Anbindungsweg muß der Anfang der Angebundenen günstig zum Fahrtweg der Anbindenden und das Ende der Anbindenden günstig zum Fahrtweg der Angebundenen liegen.

Was heißt für uns, ein Punkt liegt günstig zu einem Fahrtweg? In Kapitel 4.1.2 haben wir erwähnt, daß es die Prädikate `benachbart` und `liegt_im_korridor` in `netz.c` gibt. Diese Prädikate nutzen wir an dieser Stelle aus, um im Wechselspiel mit der Geduldsgrenze nur qualitativ gute Ein- und Anbindungswege zuzulassen. Benachbart sind zwei Punkte genau dann, wenn die Fahrzeit zwischen ihnen kleiner oder gleich der `NACHBARSCHAFTSZEIT` ist. Diese haben wir auf 5 Minuten gesetzt. Im folgenden Bild wird skizziert, daß A_j im Falle einer 15-Minuten-Geduldsgrenze *günstig zum Fahrtweg* der Bestellung B_i liegt. Bei einer 10-Minuten-Geduldsgrenze liegt A_j zwar wie zuvor im Korridor von B_i , aber außerhalb der Geduldsgrenze, also ungünstig.



Dieses Schema ist abstrakt. Im Stadtplan sehen die Kurven nicht so schön gerade aus. Unterschiedliche Geschwindigkeiten auf unterschiedlichen Wegstrecken ergeben Verzerrungen. Auf dem Stadtplan liegen manchmal Knoten günstig, die im Schaubild außerhalb aller Begrenzungen liegen. Gerade bei größeren Fahrtstrecken spielt die Straßennetzstruktur eine wesentliche Rolle und kann nicht mehr abstrakt über Fahrzeiten modelliert werden.

Wenn wir die Umwege auf dem digitalisierten Stadtplan berechnen könnten, wäre es denkbar die Geduldsgrenzen auf 15 bis 30 Minuten zu heben. Wir denken, daß diese Zeiten vertretbar wären. Zum einen sind insbesondere die Kunden, die längere Fahrten buchen, daran gewöhnt. Zum anderen spielt der Gedanke eine Rolle, daß eine globale Optimallösung, um wirklich gut zu sein, meist ein paar lokal schlechte Lösungen enthalten wird. Durch die Parameter können wir die *lokale* Güte aller zulässigen und vertretbaren Ein- oder Anbindungen bezogen auf Pünktlichkeit, Geduld und Größe des Umweges steuern. Welche Kombinationen unter allen Ein- und Anbindungsmöglichkeiten gewählt werden, ist ein anderes Thema.

5.3.5 Das Optimierungsproblem

Wir haben eine Menge von Einzelbestellungen, für die entsprechend Definition eine Menge von zulässigen und vertretbaren Ein- und Anbindungen existiert. Wie läßt sich das Optimierungsproblem beschreiben? Daß dieses Problem sehr komplex ist, wollen wir so motivieren: Allein zu einer bestimmten Uhrzeit, z.B. Donnerstags 14.30 Uhr, gibt es beispielsweise 44 Einzelbestellungen, die zu dieser Zeit anfangen. Zwischen 14.30 Uhr und 15.30 liegen 176 Einzelbestellungen. Für die 44 ist das etwa die Menge, in der die potentiell ein- oder anzubindende Bestellungen liegen. Dieses Problem für sich ist noch optimal lösbar. Aber für die 30 Einzelbestellungen um 14.45 Uhr haben wir wieder einen Bereich bis etwa 15.45 Uhr mit genauso vielen Verknüpfungsmöglichkeiten. Das Verzwickte daran ist: Die einzelnen Optimallösungen für 14.30 Uhr und 14.45 Uhr sind nicht voneinander unabhängig berechenbar, weil die Lösungsräume sich überlappen.

Das treffendste Modell für das Optimierungsproblem bei den Ein- und Anbindungen ist, wen wundert es, Set-Partitioning. Wir haben nichts anderes vor uns, als das Dispositionsproblem im Kleinen. Die Touren sind in diesem Fall nur jeweils entweder genau *eine* Einzelbestellung oder *zwei* Fahrtwünsche, die zu einer Ein- oder Anbindungsbestellung verknüpft wurden. Im Unterschied zum Gesamtproblem können wir hier den *vollständigen* Lösungsraum erzeugen, der alle zulässigen und vertretbaren Ein- und Anbindungsmöglichkeiten sowie alle Fahrtwünsche als Einzelbestellungen enthält (siehe `ein_anbindungen.c: erzeuge_ein_an_moeglichkeiten`). Wir bräuchten nur noch den Set-Partitioning-Löser fragen: Welcher „Tourenplan“ ist der beste?, und wir wüßten die Optimallösung.

Wir haben bisher keinen Set-Partitioning-Löser, der Probleme dieser Größenordnung löst.

Deswegen fragen wir: In welche schnell lösbaren Teilprobleme läßt sich das Problem zerlegen, so daß wir eine annähernd optimale Lösung finden? Es ist die Idee: Teile das Problem in viele Einzelprobleme, die zeitlich nacheinander und damit unabhängig voneinander gelöst werden können.

Die kleinste Einheit in unserem Bestellungsgraph ist eine Bestellung. Aus Sicht einer einzigen Bestellung ist das Ein- und Anbindungsproblem einfach: Nimm die *lokal* beste Ein- oder Anbindung, die von ihr aus noch möglich ist. Dafür muß man nur eine lokale Güte für Ein- und Anbindungen kennen, um die beste unter ihnen herauszufinden. Zur Zeit berechnen wir die *lokale Ein- und Anbindungsgüte* aus der Differenz der Weglängen der Mega-Ecke B_{ij} und der Summe der Weglängen der Einzelecken B_i und B_j . Das ist der „gesparte“ Weg. Statt der Differenz der Weglängen könnten folgende Gütekriterien zum Maßstab genommen werden: Umwege oder Umwegzeiten; wie oft und wieviel werden Wunschzeiten verschoben; wie gut liegt die ein- oder angebundene Ecke mit ihrem Anfang oder Ende in bestimmten Korridoren der ein- oder anbindenden Ecke? Die Festlegung einer lokalen Güte bringt uns die Möglichkeit, den Lösungsraum lokal und damit auch global sinnvoll einzugrenzen. Die von uns gesetzte obere Schranke für lokal gute zulässige und vertretbare Ein- und Anbindungen ist zur Zeit $E_GUETEGRENZE = 3$ km und $A_GUETEGRENZE = 2$ km Wegersparnis. Wir wollen schließlich mit jeder Ein- oder Anbindung lokal Wege und damit den Zeitaufwand minimieren und die Kapazitätsauslastung maximieren, um global die Busanzahl und damit Kosten zu senken.

Wir können das Problem aber auch in etwas gröbere Einheiten unterteilen. Unserem Beispiel folgend, kann man *regionale* Ein- und Anbindungsprobleme definieren. Wenn wir ein *Zeitintervall* nehmen, sagen wir zwischen 14 und 15.30 Uhr, haben wir wieder ein Set-Partitioning-Optimierungsproblem vor uns. Je mehr wir den Tag in Zeitintervalle unterteilen, desto einfacher lassen sich optimale regionale Lösungen finden, weil der Lösungsraum übersichtlich und klein ist. Das Set-Partitioning-Problem auf einen ganzen Tag bezogen liegt in der Größenordnung 1.000 Zeilen $\times$ 2.000 Spalten. Bezogen auf ein Zeitintervall von 15 Minuten zu Spitzenzeiten liegt die Größenordnung bei 70 Zeilen $\times$ 200 Spalten.

Wie wir aber auch teilen und lokal oder regional unser Bestes tun, das globale Problem lösen wir dabei nicht *optimal*, denn, wie im Großen so im Kleinen: alles hängt mit allem zusammen.

5.3.6 Heuristiken

Pünktlichkeitsheuristik. Wir haben die Zulässigkeit der Ein- und Anbindungen *nicht* starr definiert. Nimmt man z.B. exakt die gewünschten Anfangs- und Endzeiten und erzeugt alle zulässigen und vertretbaren Ein- und Anbindungen, dann erhält man an einem typischen Donnerstag etwa 100 Möglichkeiten. Nehmen wir dagegen die flexiblen Anfangs-

und Endzeiten, die in einem den individuellen Wünschen entsprechenden Rahmen variieren, so steigt die Zahl der Möglichkeiten auf 2.400. Jede Veränderung der Pünktlichkeitsparameter schafft einen anderen Lösungsraum. Nicht nur die Quantität ändert sich dadurch, sondern auch die Qualität.

Korridor-Geduldsheuristik Wie oben skizziert, können wir die Gebietsgröße, in der ein ein- oder anzubindender Punkt liegen muß, variieren. Dadurch läßt sich die Qualität und die Quantität der Verknüpfungen einstellen. Noch ist das Korridorprädikat etwas plump, weil es auf Fahrzeiten und nicht auf dem Straßennetz arbeitet, aber die Zahlen sprechen dafür, diese Heuristik weiter zu verfeinern. Je besser wir die Frage guter Ein- und Anbindungswege lösen, desto höher können wir die Geduldsgrenze setzen und damit weitere Verknüpfungen ermöglichen.

Lokale Auswahlheuristiken Durch die Berechnung einer Güte, z.B. Wegedifferenz, lassen sich die Ein- oder Anbindungsmöglichkeiten lokal ordnen. Durch die Variation über Güteberechnungen, obere und möglicherweise auch untere Schranken, sind Verfahren denkbar, schrittweise lokal beste Ein- oder Anbindungen zu finden. Ein einfaches und schnelles Verfahren, um viele gute Ein- und Anbindungen zu finden, ist: Gehe den Bestellungsgraphen einmal durch und frage an jeder Ecke: welche Ein- oder Anbindungsmöglichkeiten gibt es noch? Wenn es welche gibt, entscheide sofort, welche darunter die lokal beste ist.

Zeitintervallheuristiken Wenn wir für begrenzte Zeiträume in einer bestimmten Reihenfolge jeweils alle verbleibenden Ein- und Anbindungsmöglichkeiten erzeugen, können wir einen Set-Partitioning-Löser fragen: Was ist die optimale Verknüpfungskombination? Es kann aber auch jedes Zeitintervall mit dem eben beschriebenen Verfahren Ecke für Ecke durchgegangen werden. Es ist sinnvoll, die Zeitintervalle so zu wählen, daß sie sich *überlappen*, weil sonst zu viele Möglichkeiten vernachlässigt würden.

Spitzenzeitenheuristiken Eine Idee ist, als erstes an die Spitzenzeiten heranzugehen, also die Uhrzeiten, an denen die meisten Bestellungen zeitlich parallel liegen. Der Hintergrundgedanke dafür ist: die Anzahl paralleler Bestellungen zu einer Spitzenzeit bildet eine untere Schranke für die benötigte Fahrzeuganzahl. Bei jeder Ein- oder Anbindungsverknüpfung hat der Bestellungsgraph eine Bestellung weniger. Wir verdichten die Bestellmasse. Die Spitzen schrumpfen. Einen Effekt, der bei fast jeder Verknüpfung vorkommt, muß man sich aber klar machen: In den meisten Fällen ist die gemeinsame Bestelldauer *länger* als die Zeit zwischen dem Anfang der zuerst und dem Ende der zuletzt disponierten Bestellung (siehe Abschnitt Statistiken). Nur im Ausnahmefall, wenn die kürzesten Wege *beider* Einzelbestellungen auf dem kürzesten Weg der Ein- bzw. Anbindung liegen, ist die gemeinsame

Bestelldauer nicht länger. Beim Verdichten wird die Bestellmasse regelrecht verformt. Spitzen und Täler verschwinden, Hochebenen sacken ab, aber es bilden sich an anderen Stellen auch neue Berge auf niedrigerem Niveau. Dieses Phänomen wird sichtbar, wenn man eine Fahrtwunschkurve mit der entsprechenden Bestellungskurve, die *nach* der Fahrtwunschverknüpfung entsteht, vergleicht (siehe Statistiken). Noch zeigen die Spitzenzeitenheuristiken in ihren Ergebnissen aber keine große Abweichung zu den Ergebnissen aus Zeitintervallheuristiken. Wir führen das darauf zurück, daß die Bestellungskurven nicht gleichmäßig ansteigen und abfallen, sondern sich am Ende eines Tals fast senkrechte Steilwände auf-tun, die in der Zeit darauf langsam abfallen, um nach einer Stunde wieder steil aufzuragen.

5.3.7 Implementierung

Wir haben in dem Modul `ein_anbindung.c` zunächst Prozeduren implementiert, die in einem vorgegebenen Zeitraum nacheinander lokal beste Ein- oder Anbindungen berechnen, als Mega-Ecken in den Graph einfügen und die entsprechenden Einzelbestellungen löschen. Es gibt drei Varianten: `erzeuge_einbindungen`, `erzeuge_anbindungen` und `erzeuge_ein-anbindungen`. Die ersten beiden Varianten wählen jeweils nur die lokal beste Verknüpfung vom entsprechenden Typ. Die letzte Variante betrachtet von einer Einzelbestellung aus gleichzeitig die Ein- und Anbindungsmöglichkeiten und wählt davon die lokal beste.

Diese Prozeduren erwarten als Eingabe neben dem Graphen einen Anfang und ein Ende als Telebuszeit. Es werden nur die Einzelbestellungen betrachtet, deren Anfangszeit größer oder gleich dem Anfang und kleiner oder gleich dem Ende ist. Als viertes Argument erwarten die Prozeduren die Angabe über die Kandidatenmenge, also ob nur auf der Menge der Busbestellungen Ein- und Anbindungen vorgenommen werden (`min_beide_nur_bus`) oder nur dann, wenn mindestens einer von beiden Bus fahren muß (`min_einer_nur_bus`), oder ob *alle* Einzelbestellungen potentielle Verknüpfungskandidaten sind (`beide_beliebig`). Als fünftes Argument erwarten sie eine Geduldsgrenze, als sechstes die Angabe, ob eine Ausgabe erwünscht ist.

Neben diesen Verfahren, die eher einem lokalen Ansatz folgen, gibt es eine Prozedur `erzeuge_ein_und_an_moeglichkeiten`, die alle Ein- und Anbindungsmöglichkeiten, die es in einem gegebenen Zeitintervall gibt, in eine Matrix schreibt. Jeder Verknüpfungsmöglichkeit sind Kosten zugeordnet. Die Matrix kann auf einfache Art in eine Mini-Tourenplanmatrix überführt werden, in der alle Verknüpfungen Touren sind, ergänzt durch alle Bestellungen einzeln als Tour. Ein Set-Partitioning-Löser kann dann die optimale Minitouren-Kombination ausrechnen, die dieser Plan enthält.

5.3.8 Strategien

Mit den Werkzeugen Varianz der Kandidatenmenge und Pünktlichkeit, Verändern von Gedulds- und Gütegrenzen und durch eine beliebige Teilung des Tages in Zeitintervalle, die man anschließend in einer beliebigen Reihenfolge bearbeitet, können viele Strategien verfolgt werden. Will man einen guten Tourenplan erzeugen, kann z.B. an einem Wochentag so vorgegangen werden: In einem ersten Wurf können mit drei Varianten von früh nach spät drei Lösungen erzeugt werden, die jeweils die lokal beste Möglichkeit wählen. Die beste davon merkt man sich. Als nächstes nimmt man sich den Nachmittag mit seinen Spitzenzeiten vor. Diese beackert man etwas gründlicher und variiert auch mal die Pünktlichkeitsparameter. Die Lösungen für den Nachmittag werden untereinander und mit dem entsprechenden Teil aus der erstbesten Tageslösung verglichen. Es kann sein, daß es sich lohnt, auch die dünnen Zeiten früh morgens und spät abends als besondere Intervalle zu untersuchen. Uns ist mehrfach der Fall untergekommen, daß ein ganzer Bus mehr angemietet werden müßte, nur weil zwei ganz früh liegende Bestellungen nicht verknüpft wurden. Sie hätten aber gut verknüpft werden können, wenn man etwas mehr Unpünktlichkeit zugelassen hätte.

Weitere Strategien zielen darauf ab, die Fahrtwunschverknüpfungsformen – die Sammel- und Gruppenfahrten und die Ein- und Anbindungen – nicht nacheinander anzuwenden, sondern auch mit Mischformen zu spielen. Beispielsweise kann es sinnvoll sein, nur die Gruppen zuerst zu knüpfen, dann Ein- und Anbindungen vorzunehmen und erst zum Schluß nach Start- und Ziel-Sammelfahrten zu suchen. Diese Strategie wird sich lohnen, wenn man annimmt, daß die beste Lösung sich vorwiegend aus *kleinen* Bussen und Taxis zusammensetzt.

Alle Definitionen, Berechnungen und Strategien, die wir bei den Ein- und Anbindungen bis hierher diskutiert haben, beziehen sich auf die Sicht in den Bestellungen von den Anfängen aus und im Bestellungsgraph von früh nach spät. Es wird sinnvoll sein, alles noch einmal für den umgekehrten Fall, ausgehend von den Enden und von spät nach früh, zu definieren und zu implementieren. Wir haben die Ideen vorwärts erklärt, weil das die natürliche Denkweise ist und nur diese Varianten bisher implementiert sind.

Man kann sich leicht klar machen, daß bei der vollständigen Umkehrung sicher *nicht* die gleichen Ein- und Anbindungen geknüpft werden, denn es sind jetzt stets diejenigen, die vorher die letzten waren, die ersten; die vorher Gewählte waren, sind jetzt diejenigen, die wählen. Würde sich dennoch zufällig ein Paar beim Rückwärtsgehen verbinden, das sich beim Vorwärtsgehen auch verbunden hätte, sind sie das gleiche Paar, aber ihre neuen gemeinsamen Zeiten unterscheiden sich, weil einmal von den Anfängen und einmal von den Enden aus gerechnet wird. Neben nur Vor und nur Zurück gibt es noch zwei weitere Möglichkeiten: Von den Anfängen aus aber von spät nach früh und von den Enden aus von früh nach spät. Die Wahrscheinlichkeit ist groß, daß die Lösungen sich in den meisten

Fällen in ihrer Qualität ungefähr ähneln. Zum schnellen Erzeugen von guten Tourenplänen lohnt es sich sicher nicht, *alle* Varianten in den verschiedensten Zeitintervallreihenfolgen zu berechnen. Man sollte aber damit experimentieren, welche Varianten an welchen Tagesprofilen oder zu welchen Tageszeiten gute Ergebnisse liefern, und diese gezielt einsetzen. Zum Erzeugen unterschiedlicher Spalten für den Set-Partitioning-Löser wird es sich lohnen, gerade bei den Verknüpfungen viele Variationen zu erzeugen, auch wenn sie sich ähneln.

5.3.9 Handvorgabe-Ein-/Anbindungen

Bei der Handdisposition gibt es bisher die Regel, unnötig lang erscheinende Einzelfahrten dadurch zu sanktionieren, daß sie einen Umweg in Kauf nehmen müssen, weil mindestens eine andere Bestellung eingebunden wird. Neben der pädagogischen Absicht spielt dabei der Sicherheitsaspekt eine Rolle: Falls der unnötig lange Fahrtwunsch nach Vollendung der Disposition kurzfristig abgesagt wird, muß nicht groß umdisponiert werden. Bei Wegfall der zu langen Bestellung klafft keine große Lücke im Plan, weil in sie eine andere, die auf dem Weg lag, verwoben war. Die Tour ist nach wie vor ein geschlossener Fluß. Wir haben dieses Verfahren bisher nicht integriert. Das ist für uns ein typischer Fall für eine Handvorgabe.

In Kapitel 5.2.6 wurde schon beschrieben, wie Handvorgaben in unser Programm eingebaut werden können. Bei den Sammelfahrten haben wir ein einfaches Programm dafür geschrieben. Analog kann dem Wunsch nach Handvorgabe bei Ein- und Anbindungen nachgekommen werden. Man muß das Programm nur schreiben.

5.3.10 Statistiken

DIE ANZAHL DER EIN- UND ANBINDUNGSMÖGLICHKEITEN

TAG GÜTE Geduld 15 min		MO	DI	MI	DO	FR	SA	SO
0.0 km	VOR SAMMEL	2100	2805	2226	2440	1970	1233	867
	NACH SAMMEL	584	723	696	696	576	528	336
Ein - 3.0 km An - 2.0 km	VOR SAMMEL	1176	1659	1217	1178	1168	863	558
	NACH SAMMEL	295	377	384	395	258	349	202

1.2. – 7.2.1993. Die Anzahl der Ein- und Anbindungsmöglichkeiten bei verschiedenen Parametereinstellungen.

EIN- UND ANBINDUNGEN

$\emptyset$ in MIN	TYP		DOPPELBUS		SOLOBUS	
			MO - FR	SA - SO	MO - FR	SA - SO
STAND-DAUER			20	20	13	14
FAHRT-DAUER			36 (30)	38 (20 - 45)	34 (25 - 45)	44 (30 - 60)
GESAMT-DAUER			56	58	47	58

Gesamtdauer, Fahrtdauer und Standdauer der Ein- und Anbindungen.

VERKNÜPFUNGSVERHÄLTNIS : EIN / AN

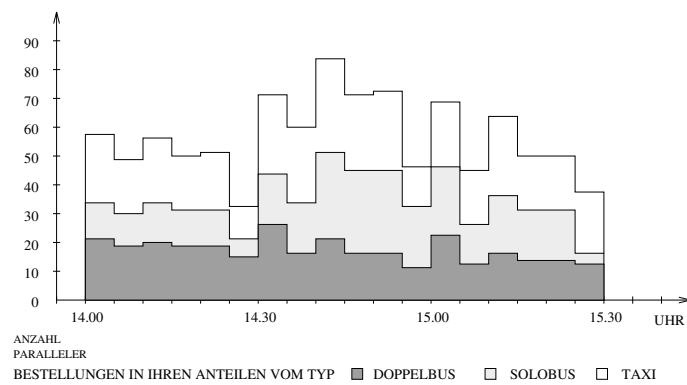
STRATEGIE $\backslash$ GEDULD	ERST EIN DANN AN	ERST AN DANN EIN	GLEICHZEITIG EIN ODER AN
	EIN / AN	EIN / AN	EIN / AN
20 min	50 / 50	10 / 90	30 / 70
15 min	50 / 50	10 / 90	30 / 70
10 min	50 / 50	25 / 75	40 / 60
5 min	50 / 50	50 / 50	40 / 60
0 min	100 / 0	100 / 0	100 / 0

Das prozentuale Verhältnis von Ein- und Anbindungen beim Erzeugen in verschiedener Reihenfolge und mit unterschiedlicher Geduldsgrenze.

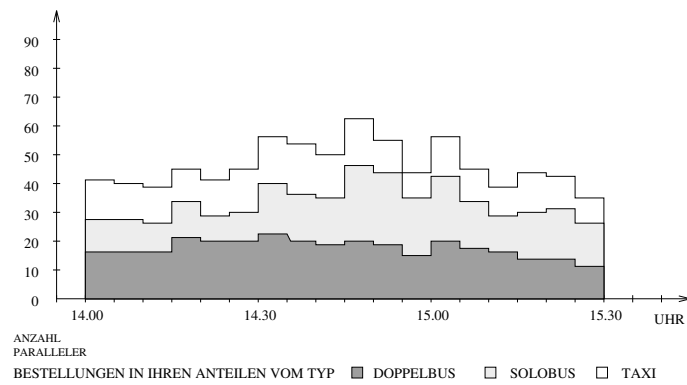
REDUKTION DER BESTELLMENGE DURCH EIN- UND ANBINDUNGEN

TAG GÜTE GEDULDSGRENZE			MO Gesamt	DI Gesamt	MI Gesamt	DO Gesamt	FR Gesamt	SA Gesamt	SO Gesamt
0.0 km	20 min	Anzahl	236	281	284	278	248	175	163
	15 min	Anzahl	229	273	276	275	237	165	149
	10 min	Anzahl	207	251	243	242	208	126	115
	5 min	Anzahl	102	129	108	104	97	56	33
	0 min	Anzahl	24 nur Ein	31 nur Ein	23 nur Ein	19 nur Ein	10 nur Ein	10 nur Ein	4 nur Ein
STRATEGIE									
0.0 km	Lokal	Anzahl	229	273	276	275	237	165	149
	15 min	Prozent	24	26	27	25	25	28	26
Ein - 3.0 km	Lokal	Anzahl	148	200	195	201	162	133	116
	15 min	Prozent	15	19	19	19	17	22	20
An - 2.0 km	Intervall	Anzahl	154	203	198	204	165	138	120
	15 min	Prozent	16	19	20	19	17	23	21

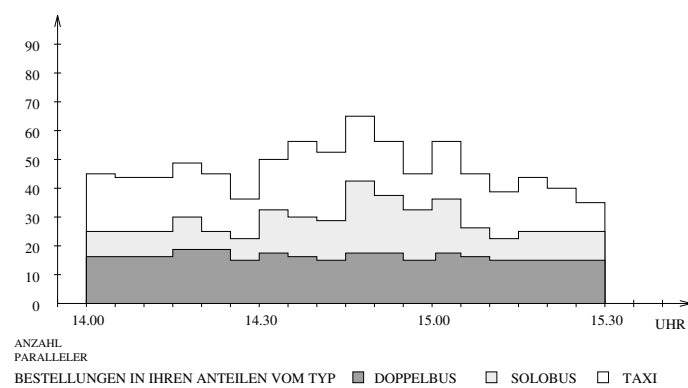
Absolute und prozentuale Reduktion der Bestellungsanzahl durch Ein- und Anbindungen. Eine der beiden Bestellungen in der Ein- oder Anbindung muß eine Busbestellung sein.



Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Einzelbestellungen zwischen 14 Uhr und 15.30 Uhr.



Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Bestellungen zwischen 14 Uhr und 15.30 Uhr nach Ein- und Anbindungen. Eine der beiden Bestellungen in der Ein- oder Anbindung muß eine Busbestellung sein.



Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Bestellungen zwischen 14 Uhr und 15.30 Uhr nach Ein- und Anbindungen (nur auf der Menge der Busbestellungen).

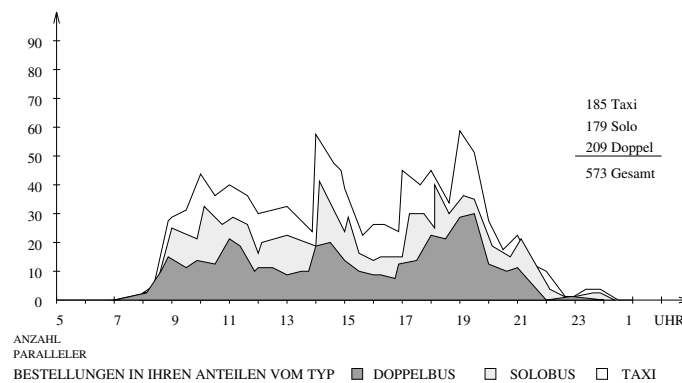
5.4 Ergebnisse von Verknüpfungsvarianten

In diesem Abschnitt wollen wir die Verknüpfungsformen Sammelfahrten, Ein- und Anbindungen zusammenbringen. Dafür haben wir sie in verschiedener Reihenfolge und mit verschiedenen Parametereinstellungen auf die Tage der ersten Februarwoche angesetzt. Wir betrachten dabei die jeweilige Reduktion, die Bestellsungsverteilung über den ganzen Tag und, für die Spitzenzeit am Donnerstag, dem 4.2.1993, die Bestellsungsverteilung auch unter der Lupe.

REDUKTION DER BESTELLMENGE DURCH SAMMELFAHRTEN UND EIN- UND ANBINDUNGEN

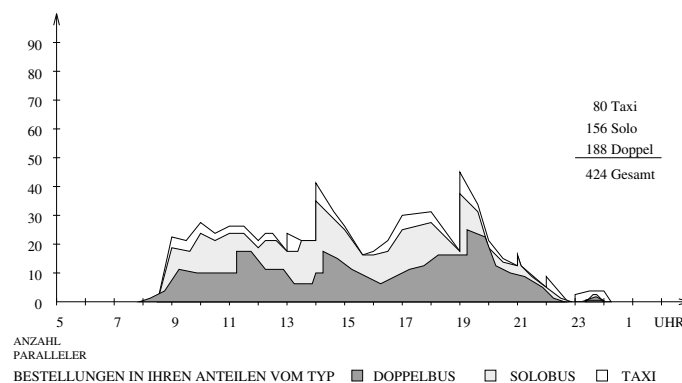
TAG GÜTE GEDULDSGRENZE			MO Gesamt	DI Gesamt	MI Gesamt	DO Gesamt	FR Gesamt	SA Gesamt	SO Gesamt
0.0 km	20 min	Anzahl	305	380	352	356	298	179	175
	15 min	Anzahl	294	367	337	351	294	185	164
	10 min	Anzahl	276	350	310	320	265	157	141
	5 min	Anzahl	214	262	231	238	189	103	99
	0 min	Anzahl	188	221	206	211	160	90	91
STRATEGIE 4-3er 20 min									
0.0 km	Lokal	Anzahl	294	367	337	351	294	185	164
	15 min	Prozent	31	35	33	32	31	31	29
Ein - 3.0 km	Lokal	Anzahl	252	296	296	301	239	158	143
	15 min	Prozent	26	28	29	28	25	27	25
An - 2.0 km	Intervall	Anzahl	257	312	299	305	247	163	146
	15 min	Prozent	27	30	29	28	26	27	25

Absolute und prozentuale Reduktion der Bestellungsanzahl durch Sammelfahrten auf allen Einzelbestellungen mit 4-3er Bussen und 20 Minuten Geduldsgrenze und nachfolgenden Ein- und Anbindungen. Eine der beiden Bestellungen in der Ein- oder Anbindung muß eine Busbestellung sein.

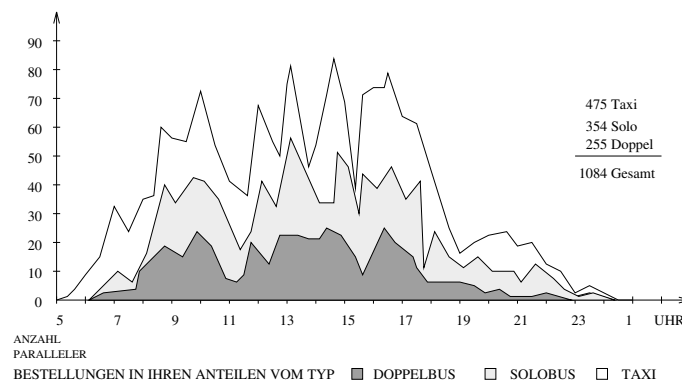


Sonntag, 7.2.1993. Die Anzahl paralleler Einzelbestellungen.

Durch die Verknüpfung der Fahrtwünsche reduzieren wir die Anzahl der Bestellungen. Die Kurven in den Parallelbildern verlieren an Höhe. In dem Vergleichsbild für den Sonntag fällt auf, daß fast alle Taxibestellungen verschwunden sind. Die Strategie ist: Verknüpfe alles mit allem. Werden zwei Taxibestellungen verknüpft ändert sich ihr Fahrzeugtyp. Sie werden bei uns zu einer *Bus*bestellung, weil wir bisher voraussetzen, daß nur Busse mehr als einen Fahrgast befördern können.

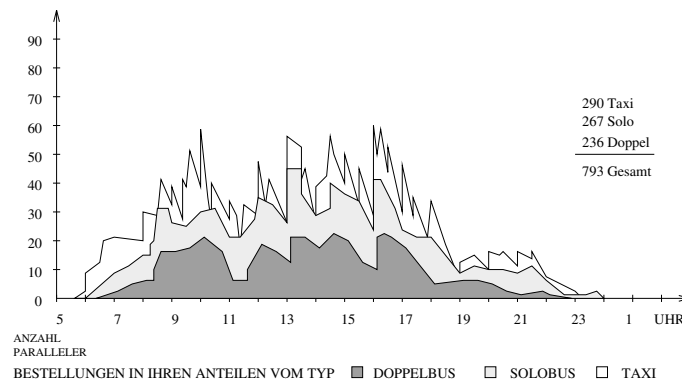


Sonntag, 7.2.1993. Die Anzahl paralleler Bestellungen, nachdem zuerst Sammelfahrten und dann Ein- und Anbindungen auf der Menge aller Einzelbestellungen erzeugt wurden.



Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Einzelbestellungen.

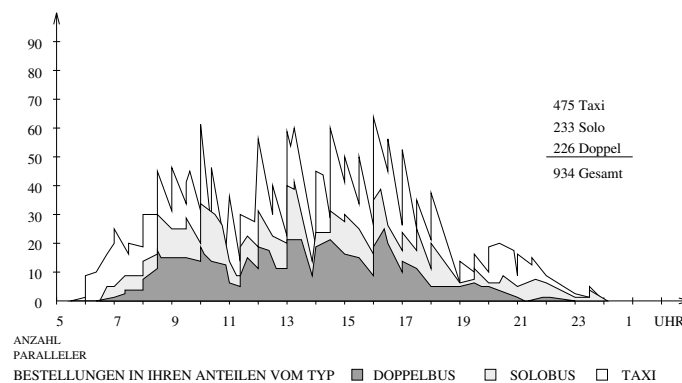
Für den Donnerstag haben wir gleich zwei Parallelbilder zum Vergleich abgedruckt und betrachten weitere 6 Varianten unter der Lupe. Wenn wir gemischt verknüpfen, also nicht alle mit allen, aber auch nicht nur die Busbestellungen unter sich, ergibt sich folgendes Bild: Die Doppel- und Solobusbestellungskurven sacken etwas ab. Ihre Spitzen fallen nicht mehr steil ab, sondern wurden zu kleinen Hochebenen oder langsam abfallenden Bergrücken. Endeten beispielsweise viele Einzelbestellungen, die um 17 Uhr begannen, bereits um 17.15 oder 17.20 Uhr, so enden sie als Sammelfahrt, Ein- oder Anbindung verknüpft eben erst um 17.30 oder 17.40 Uhr. Dadurch verschwindet ein Tal, das im Parallelbild der Einzelbestellungen noch zu sehen war.



Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Bestellungen, nachdem zuerst Sammelfahrten und dann Ein- und Anbindungen auf der Menge aller Einzelbestellungen erzeugt wurden. Bei den Sammelfahrten werden nur Kandidatenmengen berücksichtigt, die mindestens eine Busbestellung enthalten. Zusätzlich muß eine der beiden Bestellungen in der Ein- oder Anbindung eine Busbestellung sein.

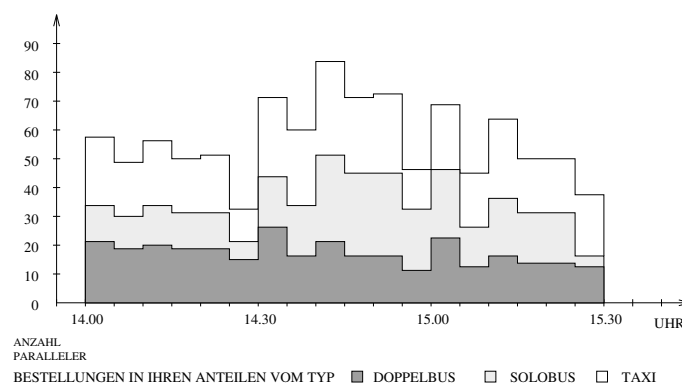
Ein ganz anderes Bild der Bestellungsverteilung ergibt sich, wenn wir die Strategie wählen: Verknüpfte außer bei den Gruppenfahrten nur Busbestellungen miteinander. Was charakterisiert diese Strategie? Am deutlichsten wird, wie nicht anders zu erwarten, der Doppel- und

Solobusanteil reduziert. Die Busspitze sackt beispielsweise von 57 auf 42 zeitlich parallele Busbestellungen ab. Das Verhältnis Doppel- zu Solobusbestellungen verschiebt sich aber zu den Doppelbussen hin. Dies begründet sich darin, daß jeweils das „schwächste“ Glied den Fahrzeugtyp einer verknüpften Bestellung bestimmt. Sobald z.B. eine Sammelfahrt eine Doppelbusbestellung enthält, kann diese Sammelfahrt nur noch von einem Doppelbus bedient werden.



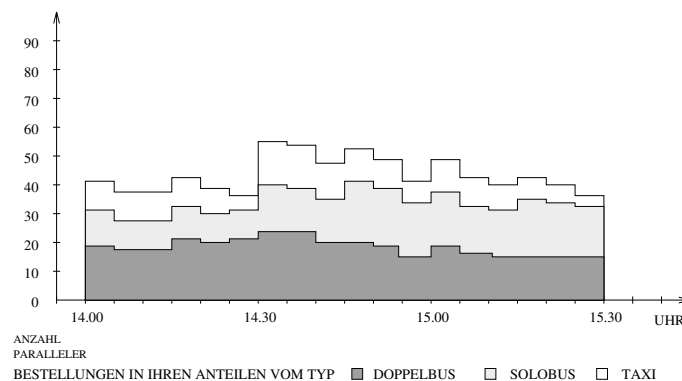
Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Bestellungen, nachdem zuerst Sammelfahrten und dann Ein- und Anbindungen auf der Menge aller Busbestellungen erzeugt wurden.

Schauen wir uns abschließend für den Donnerstag die Zeit von 14 bis 15.30 Uhr unter der Lupe an. Diese vergrößerten Bilder verdeutlichen, daß die Bestellungen, die hier gestapelt werden, durch die Anfangs- und Endzeitrundung in einem Fünf-Minuten-Raster auftauchen.

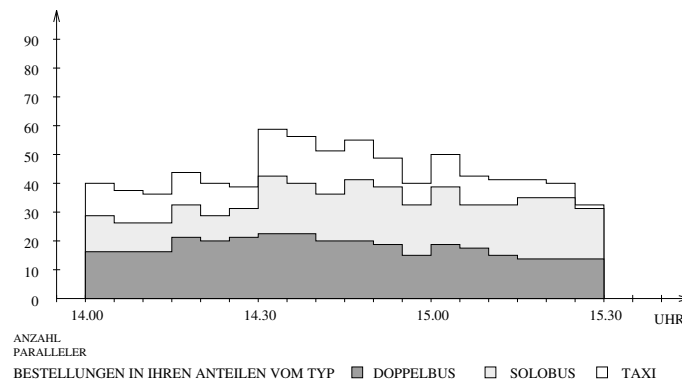


Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Einzelbestellungen zwischen 14 Uhr und 15.30 Uhr.

Wir fangen wieder an mit der Strategie, soweit es geht alle mit allen zu verknüpfen. Wir beobachten unter der Lupe noch deutlicher als eben, wie groß die Reduktion dann ist.



Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Bestellungen zwischen 14 Uhr und 15.30 Uhr, nachdem zuerst Sammelfahrten und dann Ein- und Anbindungen auf der Menge aller Einzelbestellungen erzeugt wurden.

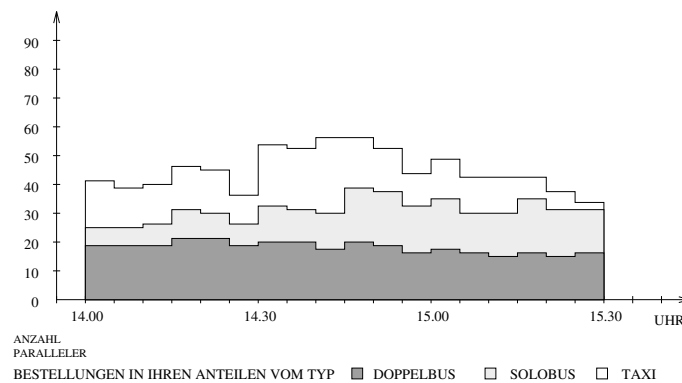


Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Bestellungen zwischen 14 Uhr und 15.30 Uhr, nachdem zuerst Ein- und Anbindungen und dann Sammelfahrten auf der Menge aller Einzelbestellungen erzeugt wurden.

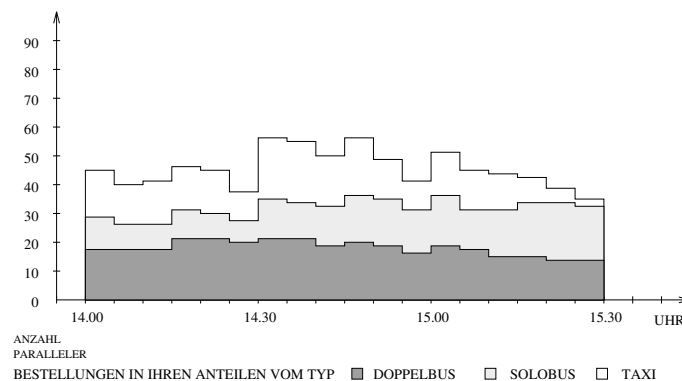
Die Taxibestellungen verschwinden zum Großteil in den Busbestellungen. Die Kurven sacken ab und werden geglättet. Bezogen auf den Reduktionsumfang in seinen Teilen unterscheiden sich bei dieser Strategie die Ergebnisse der Variante, Gruppenfahrten vor *Sammelfahrten vor Ein- und Anbindungen* zusammenzufassen, nicht sonderlich von der Variante, Gruppenfahrten vor *Ein- und Anbindungen vor Sammelfahrten* zusammenzufassen. Bei allen Bildern wurde von uns im übrigen für die Sammelfahrten die Parametereinstellung 4–3er Busse und 20 Minuten Geduldsgrenze gewählt, für die Ein- und Anbindungen die Einstellung 15 Minuten Geduldsgrenze, Gütegrenze bei den Einbindungen mindestens 3 Kilometer, bei den Anbindungen mindestens 2 Kilometer Wegersparnis.

Auch bei der zweiten Strategie, bei der nur dann Taxibestellungen verknüpft werden, wenn auch eine Busbestellung dabei ist, unterscheiden sich die beiden Varianten *Sammelfahrten vor Ein- und Anbindungen* und *Ein- und Anbindungen vor Sammelfahrten* nicht großartig in ihren Ergebnissen. Sie unterscheiden sich, vor allem bei der Solobus- und Taxibestel-

lungskurve. Aber im Volumen sind sie auch in ihren Anteilen fast identisch. Wir führen das darauf zurück, daß etwa 80 % der Sammelfahrten Zweiersammelfahrten sind, die genau-
sogut als Ein- oder Anbindungen interpretiert und verknüpft werden können. Wenn wir
also die Ein- und Anbindungen vor den Sammelfahrten erzeugen, dann kann eigentlich nur
bei den restlichen 20 % der Fall eintreten, daß größere Sammelfahrten nicht gemeinsam,
sondern als Menge von Paaren disponiert werden.



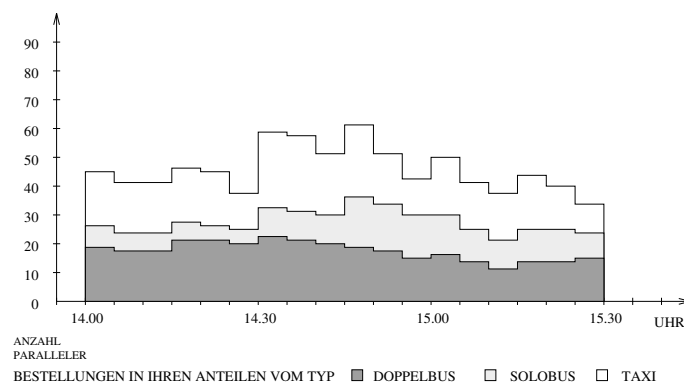
Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Bestellungen zwischen 14 Uhr und 15.30 Uhr, nachdem zuerst
Sammelfahrten und dann Ein- und Anbindungen auf der Menge aller Einzelbestellungen erzeugt wurden.
Bei den Sammelfahrten werden nur Kandidatenmengen berücksichtigt, die mindestens eine Busbestellung
enthalten. Zusätzlich muß eine der beiden Bestellungen in der Ein- oder Anbindung eine Busbestellung
sein.



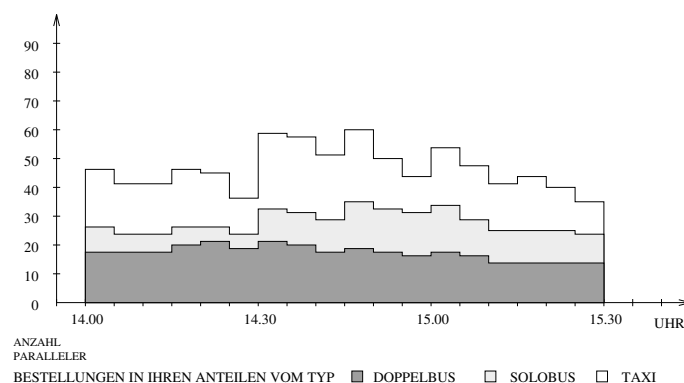
Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Bestellungen zwischen 14 Uhr und 15.30 Uhr, nachdem zuerst
Ein- und Anbindungen und dann Sammelfahrten der Menge aller Einzelbestellungen erzeugt wurden.
Bei den Sammelfahrten werden nur Kandidatenmengen berücksichtigt, die mindestens eine Busbestellung
enthalten. Zusätzlich muß eine der beiden Bestellungen in der Ein- oder Anbindung eine Busbestellung
sein.

Bei der dritten Strategie, die außer Gruppenfahrten nur Busbestellungen untereinander ver-

knüpft, sehen wir unter der Lupe noch deutlicher, wie der Taxianteil fast konstant bleibt. Das Zahlenverhältnis Doppel- zu Solobusbestellungen fällt in diesem Zeitintervall vor der Fahrtwunschverknüpfung zu Gunsten der Solobusbestellungen aus, nach der Verknüpfung mit dieser Strategie kippt es um zu Gunsten der Doppelbusbestellungen. Warum das so ist, haben wir bereits beschrieben. Wir stellen uns vor, daß bei einer rechnergestützten Disposition solche Analysen vorgenommen werden. Um diese Varianten auszurechnen, braucht der Rechner nur wenige Sekunden. Der Disponent kann dadurch sofort erkennen, wo an dem entsprechenden Tag die Probleme für eine gute Lösung liegen werden. Je mehr mit solchen Kontrollausgaben gearbeitet wird, desto besser werden die Parametereinstellungen. Außerdem liefern solche Bilder eher als Zahlenkolonnen Inspiration zum Erkennen von Problemen und deren Lösung.



Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Bestellungen zwischen 14 Uhr und 15.30 Uhr, nachdem zuerst Sammelfahrten und dann Ein- und Anbindungen auf der Menge aller Busbestellungen erzeugt wurden.



Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Bestellungen zwischen 14 Uhr und 15.30 Uhr, nachdem zuerst Ein- und Anbindungen und dann Sammelfahrten auf der Menge aller Busbestellungen erzeugt wurden.

6 Das Tourenplanprogramm

6.1 Graph der Möglichkeiten

6.1.1 Die Verbindungskanten

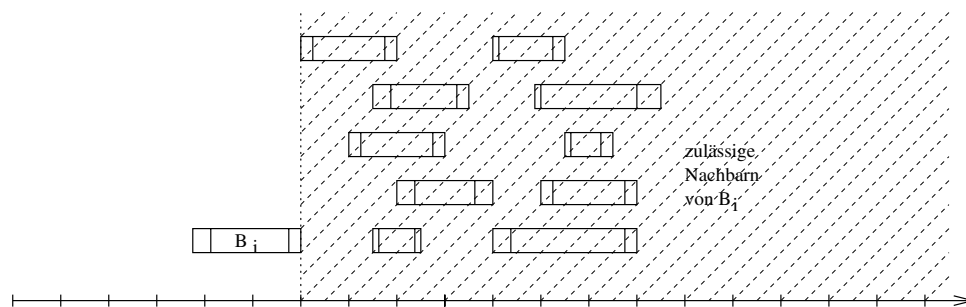
Nachdem nun die Bestellungsmenge, der Bestellungsgraph, feststeht, werden für die Tourenrezeugung die Verbindungsmöglichkeiten jeder Bestellung mit anderen Bestellungen berechnet und als Kanten des Dispo-Graphen gemerkt. Eine Vorwärtskante im Dispo-Graph von einer früheren Bestellung B_i zu einer späteren Bestellung B_j bedeutet, daß B_j innerhalb einer Tour *nach* der Erledigung von B_i bedient werden kann. Analog existiert dann eine Rückwärtskante von B_j nach B_i , die bedeutet, daß B_i *vor* der Erledigung von B_j bedient werden kann. Wegen der Symmetrie der Erreichbarkeitsrelation existieren beide Kanten (Vorwärts- und Rückwärtskanten) immer paarweise.

6.1.2 Kriterium für das Legen einer Kante

Um die Kantenmenge genau zu definieren, nehmen wir uns eine beliebige Bestellung B_i her und schauen uns die potentiellen Nachbarn von B_i , zu denen eine Kante gelegt werden soll, an. Die Bestellung B_j stehe für solche potentiellen Nachbarn. Zunächst interessieren uns die *Vorwärtsnachbarn*. Wer sind die potentiellen Vorwärtsnachbarn von B_i ?

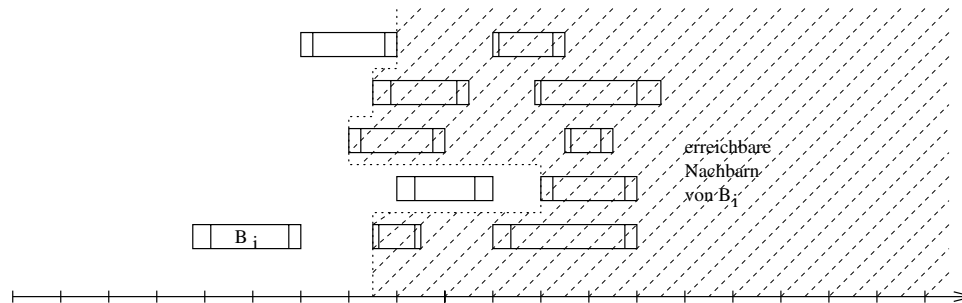
Im Prinzip kann ein Bus, nachdem er die Bestellung B_i erledigt hat, alle die Bestellungen B_j erledigen, die später liegen als die Endzeit von B_i .

Definition. B_j heißt *zulässiger Nachbar* von B_i , falls $\text{Endzeit}(B_i) \leq \text{Anfangszeit}(B_j)$.



Allerdings muß der Bus es zeitlich vom Endpunkt von B_i zum Anfangspunkt von B_j schaffen, so daß er rechtzeitig beim Anfangspunkt der nächsten Bestellung B_j eintrifft. Rechtzeitig meint: bis zur spätesten Anfangszeit von B_j . Wir sagen dann, B_j ist von B_i aus *erreichbar*.

Definition. B_j ist von B_i aus *erreichbar*, falls
 $\text{Endzeit}(B_i) + \text{Fahrzeit}(\text{Endort}(B_i) \rightarrow \text{Anfangsort}(B_j)) \leq \text{späteste Anfangszeit}(B_j)$.

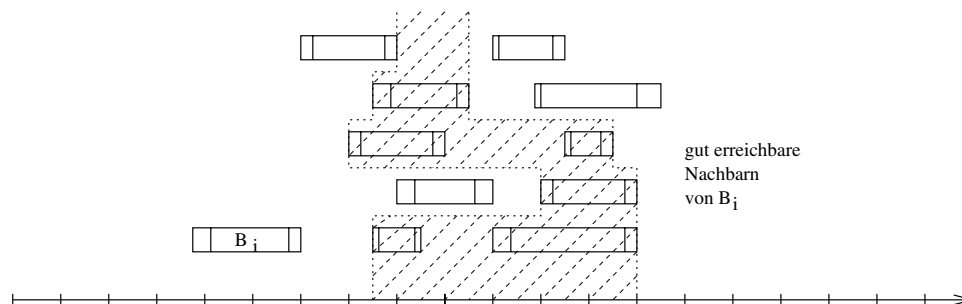


Wir haben durch die zwei *Filter* „Zulässigkeit“ und „Erreichbarkeit“ den Lösungsraum nach links beschränkt. Nach rechts können wir ihn beschränken, indem wir nur Bestellungen betrachten, die sich anbieten.

Definition. $\text{Anfangszeit}(B_j) - \text{Endzeit}(B_i)$ heißt *Leerzeit* ($B_i \rightarrow B_j$).

Wir wollen unter den erreichbaren Bestellungen nur diejenigen betrachten, deren Leerzeit nicht absurd hoch ist.

Definition. B_j heißt von B_i aus *gut erreichbar*, falls B_j von B_i aus erreichbar ist und $\text{Leerzeit}(B_i \rightarrow B_j) \leq k$.



Die Leerzeit setzt sich zusammen aus *Leerfahrzeit* und *Leerstehzeit*. Darf man diese beiden Komponenten überhaupt zur Leerzeit zusammenfassen? Für den Busfahrer sind diese beiden Dinge sicherlich verschieden, vom Kostengesichtspunkt aber gleich. Allerdings kann z.B. während der Leerstehzeit bei der Tourenplanung eine Pause eingeplant werden, was während der Leerfahrzeit nicht möglich ist.

Die tolerierte Leerzeit k kann z.B. eine Stunde betragen; wir betrachten dann alle erreichbaren Nachbarn von B_i , die innerhalb einer Stunde nach dem Ende von B_i beginnen. Dies werden die Vorwärtsnachbarn von B_i ; zu ihnen legen wir eine Kante. Für alle Vorwärtsnachbarn von B_i ist aber B_i selber ein Rückwärtsnachbar, weil die Relation *gut erreichbar*

symmetrisch ist. Jede Kante $B_i \rightarrow B_j$ hat also eine Kante $B_i \leftarrow B_j$ zur Folge. Die Fahrzeit zwischen B_i und B_j wird aus der Fahrzeitentabelle abgelesen. Wenn der Parameter `FAHRZEIT_RUNDEN` gesetzt ist, wird sie aufgerundet auf `FAHRZEIT_RUNDUNG`, derzeit 10 Minuten, berechnet. Die Menge der erreichbaren Nachbarn wird dadurch eingeschränkt.

Der Dispo-Graph ist nun folgendermaßen definiert:

Definition. Der gerichtete Graph $G(E, K)$ mit der Eckenmenge $E :=$ Menge der Bestellungen $= \{B_1, \dots, B_n\}$ in den zwei Eckenordnungen und der Kantenmenge $K :=$ Vorwärtskanten $\cup$ Rückwärtskanten $= \{B_i \rightarrow B_j \mid B_j \text{ gut von } B_i \text{ aus erreichbar}\} \cup \{B_i \leftarrow B_j \mid B_j \text{ gut von } B_i \text{ aus erreichbar}\}$, heißt *Dispo-Graph*.

6.1.3 Die Ordnung der Kanten

Die Menge der auslaufenden Kanten einer Bestellung B_i ist geordnet nach der Güte der Kanten. So kann bei der Tourenplan-Erzeugung die beste Nachfolgerbestellung jeder einzelnen Bestellung ohne Suchen ermittelt werden. Sei $B_i \rightarrow B_j$ eine Vorwärtskante. Folgende Parameter können in die Bewertung dieser Kante einfließen:

- Die *Leerzeit*, das ist die Zeit zwischen dem Ende von B_i und dem Anfang von B_j , soll möglichst klein sein, da das Fahrzeug leer herumfährt oder steht und trotzdem Kosten verursacht.
- Die *Leer-Fahrzeit* zwischen dem Endort von B_i zum Anfangsort von B_j soll klein sein, damit das Fahrzeug sicher und pünktlich zur nächsten Bestellung gelangt und der Anschluß „vernünftig“ aussieht.
- Die *Region*, in der B_i endet und die Region, in der B_j beginnt, soll möglichst dieselbe sein; geht das nicht, soll das Fahrzeug eine benachbarte Region anfahren, nicht aber eine entfernte. Deshalb können die Kanten nach der örtlichen Nähe zueinander im Raster der Regionen geordnet werden. Die Idee ist, daß Touren entstehen sollen, die vorwiegend in einer einzigen verkehrsmäßig zusammengehörenden Region hin- und herfahren und die Bestellungen dort bedienen.
- Die *Anzahl der Fahrtwünsche*, die die Anschlußbestellung B_j erfüllt, kann eine Rolle spielen, wobei eine Kante als gut bewertet werden soll, wenn die Zielbestellung möglichst „voll“ ist, weswegen dieses Kriterium im Programm auch „Fülle“ heißt. Die Idee dahinter ist, daß die ersten Busse möglichst viele volle Bestellungen fahren und so die Anzahl der benötigten großen Busse minimiert wird.
- Schließlich kann man die Kanten auch nach dem mindestens benötigten Fahrzeugtyp und damit nach den *Kosten der Unterbringung* (Doppelbus, Solobus oder Taxi)

der Zielbestellung B_j bewerten. Wenn der Tourenplan hierarchisch von den teuersten zu den billigsten Bestellungen erzeugt wird und nacheinander große und kleine Doppelbusse und danach große und kleine Solobusse disponiert werden, so ist eine Kantenordnung Doppelbusbestellungen vor Solobusbestellungen vor taxifähigen Bestellungen erwünscht, wobei die Doppel- und Solobusnachfolger noch in diejenigen, die einen großen Bus benötigen und diejenigen, die nur einen kleinen Bus benötigen, sortiert werden können.

Natürlich kann man sich weitere Kriterien ausdenken; wir haben diese fünf implementiert. Nun soll nicht *ein* Kriterium alleine zum Ordnungsmerkmal werden, sondern die Kriterien sollen zusammenfließen und, mit unterschiedlichem Gewicht, ihre Wirkung entfalten. Deshalb werden zunächst ihre Werte nivelliert und auf Zahlen zwischen 1 und 99 skaliert. (Die Länge der Skala kann durch die Parameter `LZ_SKALA` und `FZ_SKALA` im Modul `parameter.c` eingestellt werden.) Sodann bekommt die Operation `verbinde` im Modul `graph.c` für jedes dieser Kriterien einen Wichtungsfaktor. Wählt man diese Wichtungsfaktoren im Hunderter-Abstand (0, 1, 100, 10.000 1.000.000, 100.000.000), so werden die Ordnungskriterien hierarchisch gestaffelt, so daß die nächst schlechter gewichtete Ordnung erst unter gleichen Elementen der größeren Ordnung wirksam wird.

Wir werden in Kapitel 9 Tourenpläne, die mit verschiedenen Wichtungsfaktoren erzeugt wurden, analysieren und die Wirkungsweise der einzelnen Faktoren und die Wechselwirkung zwischen ihnen aufzeigen.

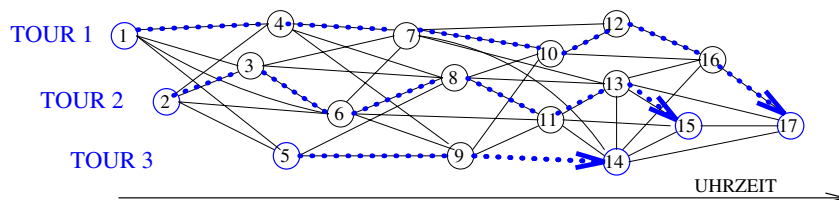
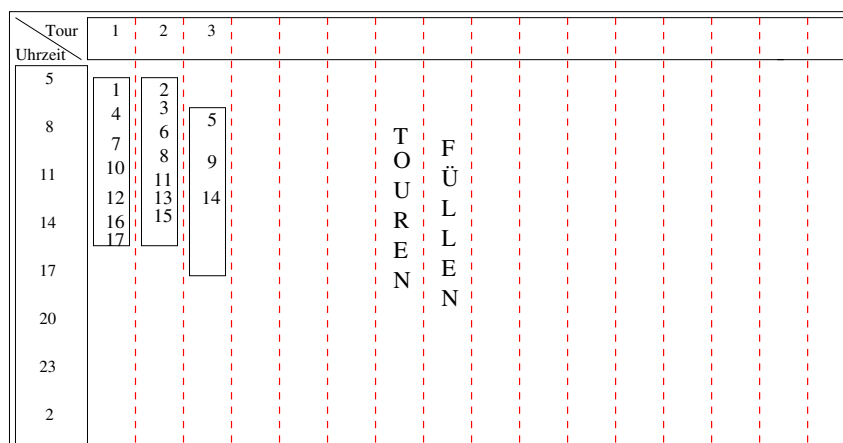
6.2 Tourenplan

Der Tourenplan ist eine große Tabelle (Matrix), deren Spalten eine Menge von Touren darstellen, die in der Reihenfolge, in der sie in der Spalte vorkommen, gefahren werden sollen. Tourenplanung heißt, diese Tabelle so mit Bestellungen zu füllen, daß fahrbare Touren herauskommen und jede Bestellung genau einmal erfüllt wird.

6.2.1 Zwei Verfahren

Man kann sich zwei grundsätzliche Verfahren vorstellen, um diese Tabelle zu füllen: Entweder füllt man sie Spalte für Spalte, erzeugt also eine vollständige Tour nach der nächsten (Touren-Füllen), oder man nimmt die Bestellungen in ihrer zeitlichen Reihenfolge und packt eine jede in den Plan auf eine Stelle, in die sie paßt (Zeiträume-Füllen). Die eine Form arbeitet spaltenweise, die andere zeilenweise.

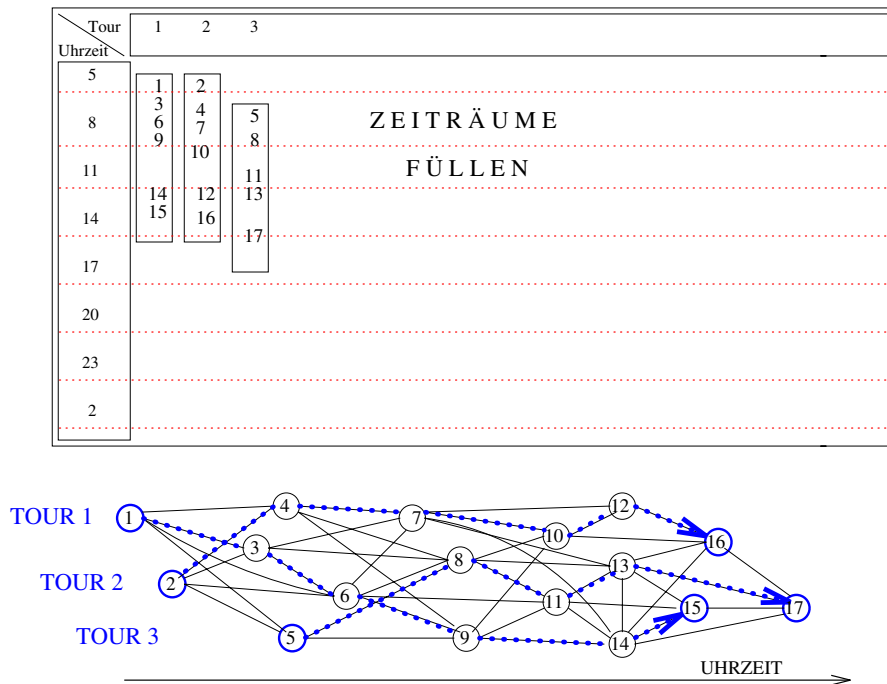
Touren füllen. Das Touren-Füllen des Tourenplans geht so: Nimm die zeitlich erste Bestellung B_1 und beginne mit ihr eine Tour T_1 . Seien $B_1, B_2, \dots, B_i$ die bereits gewählten Bestellungen in dieser Tour. Wähle jeweils eine sich noch nicht im Plan befindende Bestellung B_{i+1} aus den Nachfolgerkanten von B_i als Anschlußbestellung für B_i in T_1 . Ist die gewünschte Schichtlänge erreicht, beginne die nächste Tour T_2 mit der in der Graphordnung nächsten (nach B_i) noch nicht in den Plan eingefügten Bestellung. Und so fort, bis keine Bestellung mehr übrig ist.



Für die Auswahl der jeweiligen Anschlußbestellung kann man sich verschiedene Varianten überlegen, um eine gute Mischung von knappen und luftigen Anschlüssen zu erreichen. Das Verfahren hat die Tendenz, bei den ersten Touren das Terrain „abzugrasen“ und anfänglich gute Touren zu erzeugen, um dann später im Niveau stark abzufallen. Der Gedanke, dabei ist ja auch eher der des Spaltengenerators, dessen Aufgabe es nur ist, gute oder zumindest vernünftige unabhängige Spalten zu erzeugen, deren Bewährungsprobe, die Kombinationsmöglichkeit nämlich, erst im Set-Partitioning-Löser kommt.

Zeiträume füllen. Das Zeiträume-Füllen ist die Strategie, die in der Telebus-Zentrale beim Hand-Disponieren verwendet wird. Jeweils die Bestellungen der nächsten Stunde werden an Tourenanfänge angehängt, an die sie als Anschlußbestellungen passen. Das Verfahren geht so: Nimm die zeitlich erste Bestellung B_1 und beginne mit ihr eine Tour. Gehe

die Bestellungen in der zeitlichen Reihenfolge durch und packe jede Bestellung B_i an das bisherige Ende einer Tour, falls es eine gibt, an die sie als Anschlußbestellung paßt und die die gewünschte Schichtlänge mit dem Anhängen von B_i nicht überschreitet. Gibt es keine „offene“ Tour, an deren Ende B_i paßt, eröffnet B_i eine neue Tour.



Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß die Bestellungen Stunde für Stunde abgearbeitet werden und dadurch für die späteren Stunden noch die ganze Auswahl vorhanden ist. Alle offenen Touren grasen sozusagen gleichzeitig das Terrain ab und haben deshalb die gleichen Chancen. Der „Nachteil“ ist, daß jede Tour gute *und* schlechte Verbindungen enthält. Es gibt nicht mehr ganz tolle Touren und ganz schlechte, wie bei dem Spaltenverfahren. Es ist eine Strategie des Mittelmaßes. Gut geeignet, wenn es darum geht, nicht nur einzelne Spalten für einen Spaltengenerator zu erzeugen, sondern einen kompletten Tourenplan für einen Tag.

Touren füllen Zeiträume füllen Touren. Die beiden paradigmatischen Verfahren – spalten- oder zeilenweises Füllen des Tourenplans – können vermischt oder sogar ineinander überführt werden. Beim Zeiträume-Füllen wird jede Bestellung einzeln dann in den Tourenplan gepackt, wenn ihre Zeit gekommen ist. Nichts spricht dagegen, zu dem Zeitpunkt des Hineinpackens einer Bestellung B_i auch gleich noch ihren besten Nachfolger als Nachfolgerbestellung in dieselbe Tour hinter B_i hineinzutun. Oder nicht nur B_i 's besten Nachfolger, sondern auch noch den besten Nachfolger dieser Nachfolgerbestellung. Man

kann, im Extremfall, solange beste Nachfolger verkettet, bis die Tour voll ist oder einer der Kettennachfolger keine undisponierte Nachfolgerbestellung mehr besitzt. Und genau dann ist das zeilenweise Füllen zum spaltenweisen Füllen geworden. Der umgekehrte Weg führt wieder zum zeilenweisen Füllen zurück. Sinnvoll könnte eine Vermischung sein, wenn eine Spalte nicht nur Bestellung um Bestellung zu einer Tour disponiert wird, sondern wenn sie aus schon vorher disponierten Halbeschicht- oder Drittschicht-Touren zusammengesetzt wird.

Je mehr das Zeiträume-Füllen zum Touren-Füllen wird, desto mehr werden die gerade vorher disponierte Bestellung B_i und die zu dem Zeitpunkt ihrer Disposition im Tourenplan herrschenden Verhältnisse zum Maßstab für die Auswahl einer späteren Bestellung B_j genommen. Dagegen disponiert das reine Zeiträume-Füllen wirklich immer nur einen Kandidaten zu seinem Zeitpunkt und hängt ihn an dasjenige „lose Ende“ an, das für ihn zum Zeitpunkt *seiner* Disposition das beste ist.

Unsere Wahl. Wir sind gedanklich von der Seite „Zeiträume-Füllen“ an das Programm herangegangen, und dies ist die Grundvariante für die Erzeugung gültiger Lösungen, also gesamter Tourenpläne. Wir lassen aber alle Stufen in Richtung Touren-Füllen zu, so daß auch das reine „Touren-Füllen“-Verfahren möglich wird. Jeder dieser so erzeugten Tourenpläne kann natürlich auch als Eingabe für den Set-Partitioning-Löser dienen. Durch einen Parameter `KETTENLAENGE` wird festgelegt, wieviele Nachfolgerbestellungen für jede neu in den Plan gepackte Bestellung zusätzlich disponiert werden sollen. Ist der Parameter = 0, dann wird das reine Zeiträume-Füllen gewählt, ist der Parameter = `MAXBEST`, liegt das Touren-Füllen vor. Alle Zahlen dazwischen geben Mischformen an. Im folgenden konkretisieren wir unsere Lösung: das Tourenplan-Programm, das sich in dem Modul `tourenplan.c` befindet.

6.2.2 Der Algorithmus

Die Grundmenge für die Tourenplanerzeugung ist jeweils die Menge aller undisponierten Bestellungen *eines* benötigten Fahrzeugtyps in einem vorgegebenen Zeitrahmen (in der Regel der ganze Tag). Jede Gruppe wird in ihrer zeitlichen Reihenfolge betrachtet: Beim Erzeugen des Planes von morgens nach abends also von der frühesten bis zur spätesten vorgegebenen Anfangszeit, beim Erzeugen des Planes von abends nach morgens von der spätesten zur frühesten vorgegebenen Endzeit. Wir wollen den Algorithmus am Beispiel des Disponierens von morgens nach abends, also vorwärts, beschreiben. Der andere Fall ist analog. Sei die Bestellung B_i der Kandidat.

Paßt B_i an kein Ende irgendeiner angefangenen Tour, eröffnet B_i eine neue Spalte und damit eine neue Tour. Sonst lautet die Aufgabe: Finde die beste angefangene Tour, an

deren momentanes Ende B_i angehängt werden kann.

1. Zunächst wird versucht, B_i an eine angefangene Tour anzuhängen. Welche angefangenen Touren kommen dafür in Frage? Erstens darf die Tour zusammen mit B_i nicht ihre maximale Schichtlänge überschreiten. Zweitens muß B_i in den Fahrzeugtyp der Tour hineinpassen. Schließlich muß B_i vom Endort der letzten Bestellung in der angefangenen Tour *erreichbar* sein. Unter all den zulässigen Plätzen für B_i wählt das Programm den besten Platz aus.
2. Falls der Kandidat B_i an eine bestehende Tour angehängt wird, kann es sein, daß zwischen der vorherigen Endzeit der letzten Bestellung in der Spalte und der Anfangszeit von B_i eine Lücke klafft, in der der Bus herumsteht und wartet. Diese Lücke kann man mit Bestellungen auffüllen. Diese Lückenfüller-Bestellungen sind automatisch von einem kleineren Fahrzeugtyp, da alle Bestellungen des aktuell zu disponierenden Fahrzeugtyps bis zu der Anfangszeit von B_i ja bereits disponiert wurden. Ob überhaupt Lücken aufgefüllt werden sollen, entscheidet der Parameter `LUECKEN_FUELLEN`.
3. Falls der Kandidat B_i an keine bestehende Tour angehängt werden konnte, eröffnet er eine neue Tour. Dabei legt der Fahrzeugtyp, den er benötigt, den Fahrzeugtyp der Spalte fest. Das maximale Schichtende wird auf die Anfangszeit von B_i plus der maximalen Schichtlänge, die bereits in der Spalte steht, festgesetzt.
4. Nachdem B_i disponiert wurde, werden hinter B_i so viele Nachfolgerbestellungen disponiert wie es der Parameter `KETTEN_LAENGE` angibt. Diese müssen selbstverständlich zulässig sein, d.h., sie müssen in den Fahrzeugtyp der Tour hineinpassen und dürfen das maximale Schichtende nicht überschreiten. Gibt es keine Nachfolgerbestellung mehr, die noch in diese Tour hineinpaßt, bricht die Kette für diese Tour ab, unabhängig von dem Wert `KETTEN_LAENGE`.

6.2.3 Parametergesteuerte Heuristiken

Luftigkeit des Tourenplans. Wir wollen verschieden dicht gepackte Tourenpläne erzeugen. Ein Parameter soll dem Tourenplan-Generator in Telebus-Zeit angeben, wieviel „Luft“ zwischen den einzelnen Bestellungen in einer Tour gelassen werden soll, wieviele Minuten der Bus also zwischen den einzelnen Bestellungen mindestens leer herumstehen und warten soll. Wenn diese Herumstehzeit gleich 0 ist, so werden nur die pünktlich erreichbaren Bestellungen als Nachfolger genommen. In einem engen Plan mit „negativer Luft“ < 0 wird Luft aus dem Plan genommen, indem zusätzlich auch diejenigen Nachfolgerbestellungen berücksichtigt werden, die nur mit Verspätung erreichbar sind. Diese sind aber in der Regel erreichbar bis zur spätesten Anfangszeit, also in unserem Sinne *erreichbare* Nachfolger.

Wenn aber die Überlappungszeit größer ist als die späteste Anfangszeit der Nachfolgerbestellung, entscheidet ein globaler Ja/Nein-Parameter `TOUREN_MIT_VERSPAETUNG`, ob die Bestellungen auch über die späteste Anfangszeit hinaus verschoben werden dürfen oder nicht. In der Regel soll das natürlich nicht erlaubt sein. In einem „luftigen“ Plan mit einer Luftzeit > 0 wird zwischen je zwei Bestellungen in einer Tour eine entsprechende Mindeststehzeit eingehalten. Eine Variante ist, in einem luftigen Plan immer dann eine Ausnahme von der Luftigkeitszusage zu machen und zusätzlich mit Verschiebung erreichbare Bestellungen zu berücksichtigen, wenn eine Bestellung einen neuen Bus eröffnen würde. Wenn der Parameter `VERSCHIEBUNG_ERLAUBT` gesetzt ist, versucht das Programm dann, einen anderen Platz im Plan für diese Bestellung zu finden, indem es sie ein wenig nach hinten oder vorne verschiebt. So wird die Anzahl der Busse klein gehalten.

Neben der globalen Luftigkeitsaussage über den gesamten Tourenplan, gibt es noch die Möglichkeit, die Luftigkeit beim Lückenfüllen in Relation zur globalen Luftigkeit festzusetzen. Die Luftigkeit beim Lückenfüllen wird aus der Summe der globalen Luftzeit und der Lücken-Luftzeit berechnet. Die Luftigkeit der Lücke ist also gleich der globalen Luftigkeit, wenn der Parameter `LUECKEN_LUFT` auf 0 gesetzt ist. Ist er auf Zeiten > 0 gesetzt, werden die Lücken mit entsprechend mehr Luft gefüllt als die globale Luftigkeit eigentlich angibt. Bei Zeiten < 0 wird entsprechend beim Lückenfüllen Luft aus dem Plan herausgenommen. Wenn nicht das reine Zeiträume-Füllen-Verfahren zum Disponieren benutzt wird, ermöglichen wir diese Feineinstellung mit dem Parameter `NACHFOLGER_LUFT` auch beim Nachfolgerketten-Disponieren.

Neben dem luftigen *Disponieren* gibt es zwei weitere Verfahren, um einen luftigeren Plan zu erreichen. Erstens die schon erwähnte Rundung der Anfangs- und Endzeiten jeder Bestellung, wodurch Luft *innerhalb* der Bestellungen geschaffen wird, und zweitens die Luft, die durch die Möglichkeit der Fahrzeitrundung *zwischen* den Bestellungen geschaffen wird. Wie bereits beim Kantenlegen erwähnt, werden die Berechnungen der Erreichbarkeit oder Anschließbarkeit einer Bestellung mit einer aufgerundeten Verbindungsfahrzeit gerechnet, wenn der Parameter `FAHRZEIT_RUNDEN` gesetzt ist.

Anschlüsse. Wann wird eine Bestellung B_j hinter eine Bestellung B_i in einer Tour disponiert? Wenn B_j von B_i aus bis zu ihrer Anfangszeit erreicht werden kann, wird sie pünktlich disponiert. Die disponierte Zeit entspricht dann ihrer Anfangszeit. Wird sie erst später erreicht, so kann die Bestellung nicht mehr pünktlich disponiert werden. Sie wird in der Tour bis spätestens zu ihrer spätesten Anfangszeit verschoben, bleibt aber damit im Rahmen ihrer Pünktlichkeitstoleranz. Ihre *disponierte* Anfangszeit entspricht dann nicht mehr ihrer Anfangszeit. Verschiebungen über die späteste Anfangszeit hinaus, sind nur erlaubt, wenn der Parameter `TOUREN_MIT_VERSPAETUNG` gesetzt ist. Wir sagen:

Definition. B_j ist an B_i mit der Luftzeit t_ℓ *anschließbar* genau dann, wenn B_j von B_i aus mit der Luftigkeit t_ℓ erreichbar ist.

Bester Platz im B-Plot. Wird B_i an einen Tourenanfang angehängt, stellt sich bei mehreren Möglichkeiten die Frage: an welchen? Er muß zulässig sein, d.h., die Tour darf zusammen mit B_i nicht ihre maximale Schichtlänge überschreiten, B_i muß in den Fahrzeugtyp der Tour hineinpassen und B_i muß an die letzte Bestellung in der angefangenen Tour *anschließbar* sein. Der beste Platz im B-Plot für B_i kann auf zweierlei Art herausgefunden werden: Entweder man nimmt die *erstbeste* Tour, also die erste Tour im von der ersten bis zur letzten Tour durchgeschauten Plan, an die B_i erlaubterweise paßt (*first fit*). Oder das Kriterium „beste Tour“ wird auf die Kanten verlagert: Schließe B_i an dasjenige zulässige „lose Ende“ unter den schon erzeugten Tourenanfängen an, das unter den Rückwärtskanten von B_i als erstes vorkommt; an den besten Vorgänger also (*best fit*). Dies ist allerdings ein lokales Kriterium. Wenn jede Bestellung ihren besten Anschluß bekommt, muß, global gesehen, nicht das Beste herauskommen. Man könnte auch, in Anlehnung an die Telebus-Disponenten, jeweils eine Stunde zusammenfassen und unter dieser Kandidatenmenge eine optimale Zuordnung der „losen Enden“ versuchen: ein optimales Matching. Wir haben *first fit* und *best fit* implementiert; die Auswahl der Strategie erfolgt über den Parameter BEST_FIT (Ja/Nein).

Bester Nachfolger. Wenn die „beste Nachfolgerbestellung“ einer Bestellung B_i gesucht wird: Was ist der beste Nachfolger? Zunächst die erste Kante in der Kantenordnung der auslaufenden Kanten von B_i , die zulässig ist. Zulässig ist eine Nachfolgerbestellung, wenn sie noch nicht im Tourenplan enthalten ist, wenn sie in den Fahrzeugtyp der Tour und in die Schicht hineinpaßt und wenn sie anschließbar ist, also die geforderte Luftigkeit des Plans beachtet.

Hierarchie der Fahrzeugtypen. Je homogener eine Bustour mit Bestellungen gefüllt ist, die genau die vorhandene Kapazität und Fahreranzahl dieses Busses ausnutzen, desto weniger teure Busse wird man insgesamt brauchen. Wenn nur eine einzige Doppelbus-Bestellung in einer Tour enthalten ist, braucht man schon einen doppelt besetzten Bus; wenn nur eine einzige Solobus-Bestellung unter taxifähigen Bestellungen in der Tour vorkommt, benötigt man schon einen Solobus. Es wird deshalb jeweils die Bestellungs menge *eines* Fahrzeugtyps (Doppelbus, Solobus oder Taxi) disponiert. Wenn die Kanten des Dispo-Graphen nach den Fahrzeugtypen als höchstes Sortierkriterium sortiert sind – in der Reihenfolge Doppelbus-Nachfolger, Solobus-Nachfolger, Taxi-Nachfolger –, werden durch diese Kantenordnung, verbunden mit der Generierung in der Hierarchie der Fahrzeugtypen,

die Buskosten minimiert, denn jeder Anschluß erreicht als beste Kante die vom Fahrzeugtyp her passendste. Läßt man diese Kantenordnung weg, garantiert die bunte Mischung der Nachfolger-Fahrzeugtypen in der Ordnung, daß die meisten Touren genauso bunt gemischt sind. Das bedeutet, daß viele Busse benötigt werden, dafür aber nur wenige Taxen. Allerdings sind die einzelnen Touren qualitativ oft besser, da die Auswahl bester Anschlüsse nicht mehr durch die Zusatzanforderung des passenden Fahrzeugtyps eingeschränkt wird. Eine mittlere Lösung ist die zur Zeit in der Telebus-Zentrale praktizierte: Es wird nur unterschieden zwischen Bus- und Taxibestellungen. Da fast nur doppelt besetzte Busse angemietet sind, können diese mit einer Mischung aus Bestellungen, die einen Doppelbus oder einen Solobus benötigen, gefüllt werden. Dadurch wird die Anzahl der Busse insgesamt minimiert, nicht aber die Anzahl der Doppelbusse unter ihnen. Wir ermöglichen diese Variante über einen Parameter `BUSTYP_NIVELLIERUNG`, der erreicht, daß bei dem Sortierkriterium „Fahrzeugtyp der Zielbestellung“ nur noch Busse und Taxen unterschieden werden.

Lange Fahrtwege vermeiden. Wenn die Kanten im Dispo-Graph nach den Fahrzeugtypen in absteigender Ordnung geordnet sind in den Gruppen Doppelbusbestellungen – Solobusbestellungen – Taxibestellungen, dann schlägt der Fahrzeugtyp auf jeden Fall alle anderen Kriterien wie Fahrzeit oder Nähe. Das ist auch gut so, denn durch die Kantenwichtungen ist ja gerade diese Ordnung vorher festgelegt worden. Es gibt an dieser Stelle aber eine Heuristik, die ein wenig eingreift in dieses Übergewicht des möglichst passenden Fahrzeugtyps. Wenn der Parameter `NUR_BESTE_VERBINDUNGEN` gesetzt ist, muß die beste Nachfolgerbestellung oder der beste Platz im B-Plot für B_i in einer Fahrzeit von höchstens `MAX_DOPPEL_VERBINDUNGSZEIT` bei Doppelbusspalten (derzeit 30 Minuten) oder `MAX_SOLO_VERBINDUNGSZEIT` bei Solobusspalten (derzeit 40 Minuten) erreicht werden können. Dadurch werden unschöne Anschlüsse vermieden, bei denen der Bus durch die ganze Stadt fahren muß, um den Anschluß zu bekommen. Lieber wird ein kürzerer Anschluß genommen, und es wird bei der Nachfolgerbestimmung in Kauf genommen, daß dadurch eine Bestellung eines kleineren Fahrzeugtyps diesen Platz in der Tour einnimmt.

Lücken füllen. Eine Lücke in einer Tour entsteht, wenn B_i an das Ende einer Tour angehängt werden soll, aber zwischen diesem Ende und B_i noch Platz ist. Nennen wir die letzte Bestellung dieser Tour B_j . Falls der Parameter `LUECKEN_FUELLEN` gesetzt ist, wird versucht, die Lücke zwischen B_j und B_i zu füllen. Die Strategie ist: Nimm die beste Nachfolgerbestellung von B_j und von dieser wieder die beste Nachfolgerbestellung und so fort, bis entweder kein passender Nachfolger mehr vorhanden ist oder mit einer weiteren Bestellung B_i nicht mehr erreicht werden könnte. Und daß B_i an das Ende dieser Tour angehängt werden soll, ist ja schon entschieden. Ist kein passender Nachfolger mehr vorhanden, wird versucht, außerhalb der Kanten, also später als `LEERZEITGRENZE` neu anzusetzen und von

dort aus nach einem Lückenfüller zu suchen. Von diesem aus wird dann nach besten Nachfolgern gesucht wie eingangs beschrieben. Ob zusätzlich zu der Forderung, daß B_i von allen Bestellungen in der ehemaligen Lücke aus weiterhin erreichbar sein muß, noch eine Mindestlücke gelassen werden soll, entscheidet der Parameter `MINDEST_LUECKE`. Durch diese kleineren Lücken kann Luft in den Plan gebracht werden, oder es können Pausen eingeplant werden (`MINDEST_LUECKE` = 30 Minuten), denn oft haben Busse, die morgens ihre Tour beginnen, über Mittag ein „Bestellungsloch“.

Depotanbindung. Nähert sich die Tour ihrem (Schicht-)Ende, muß man erreichen, daß das Fahrzeug wieder in die Nähe seines Depots zurückkehrt, um nicht unsinnig lange Depotanbindungszeiten zu haben und womöglich gar kein passendes Fahrzeug für diese Tour zu finden. Dies gilt natürlich nur, wenn die Anfahrt vom und die Abfahrt zum Depot von der Telebus-Zentrale bezahlt werden muß. Beim Disponieren kennen wir das Depot dieser Tour noch nicht, weil das Fahrzeug für diese Tour erst später ausgewählt wird. Wenn der Parameter `DEPOT_ANBINDUNG` gesetzt ist, versucht das Programm aber bei der Nachfolgerbestimmung, ab einer kurzen Zeit vor dem spätesten Schichtende (`SCHICHT_ABZUG`, derzeit 60 Minuten), in die Region der ersten Bestellung in der Tour zurückzukehren. Genommen wird die Nachfolgerbestellung mit der kürzesten Fahrzeit von ihrem Endpunkt zum Anfangsort der ersten Bestellung in der Tour.

Pausen. Jeder Busfahrer, der länger als 6 Stunden fährt, muß nach spätestens 5 Stunden eine Pause von 30 Minuten einlegen. Ist dies nicht möglich, müssen nach der Arbeitszeitordnung zwei 20-minütige Pausen oder drei 15-minütige Pausen eingeplant werden. Während der Tourenplanerzeugung gibt es die Möglichkeit, starr in jeder Tour nach 4-5 Stunden eine Lücke von einer halben Stunde Stehzeit zu lassen, wie es jetzt auch bei der Handdisposition gemacht wird. Da aber während der Disposition die einzelnen Touren allesamt noch nicht fertig sind (falls nicht das Touren-Füllen-Verfahren benutzt wird), kann man zu diesem Zeitpunkt noch nicht sagen, ob nicht auch ohne diese Lücke 2×20 Minuten oder 3×15 Minuten Pause möglich gewesen wären. Jedenfalls müßte man beim Erzeugen der Touren genauestens Buch führen über die angepeilte Pausenregelung jeder Tour. Deshalb überlassen wir die Pausen beim Erzeugen des Tourenplans dem Zufall. Der ist im Übrigen gar nicht so schlecht; insbesondere in einem luftig disponierten Plan haben so gut wie alle Touren genügend Pausenzeit. Wir sagen deshalb: Pausen einhalten ist ein Problem, das *nach* der vollständigen Erzeugung des B-Plots, also auch nach der Fahrzeugzuteilung, gelöst wird. Und zwar im B-Plot-Änderungsprogramm (Kapitel 8). Dort können Bestellungen aus zu dichten Plänen herausgenommen oder nach vorne oder hinten verschoben werden, um Pausen zu ermöglichen.

Verbesserungsheuristiken. Alle bisher vorgestellten Heuristiken wirken bei der *Erzeugung* eines Tourenplanes. Sie haben nicht die Aufgabe, den fertigen Plan oder Entwurf zu *überarbeiten*. Diese Arbeit erfolgt erst *nach* der Erzeugung eines Tourenplans oder erst nach der Fahrzeugzuteilung. Verbesserungsheuristiken gehören deshalb in das B-Plot-Änderungsprogramm. Implementiert haben wir bisher nur Eröffnungsheuristiken, die zum Teil auch verbessern, aber nur lokal während der Plangenerierung. Der Grund ist, daß das Optimierungsziel überhaupt noch nicht klar ist. Bei Verbesserungsverfahren muß aber klar sein, was „besser“ überhaupt heißt. Nachdem die Werkzeuge der Datenstrukturen und Algorithmen der Eröffnungsverfahren vorhanden sind, handelt es sich dabei aber nur noch um kleine Programme, die jeweils *ein* Ziel verfolgen müssen. Wir stellen uns vor, daß diese Verbesserungsverfahren (Austausche, dichteres Packen, etc.) während der Installierung und Anpassung in der Telebus-Zentrale programmiert werden. Einige Ideen für Verbesserungsheuristiken haben wir in Kapitel 8 aufgeschrieben.

6.2.4 Strategien

Das Tourenplan-Programm als Werkzeugkasten. Das Modul `tourenplan.c` stellt fünf mächtige Werkzeuge zur Verfügung, mit deren Hilfe verschiedenartige Tourenpläne, die auf unterschiedlichen Strategien beruhen, erzeugt werden können. Diese Werkzeuge sind:

- Die Funktion `init_tourenplan`, die einen leeren Tourenplan erzeugt, in dem alle Spalten eine maximale, über Parameter angegebene Schichtlänge, erhalten.
- Die Funktion `erzeuge_tourenplan`, die alle Bestellungen eines vorgegebenen Fahrzeugtyps in einem leeren oder schon begonnenen Tourenplan disponiert. Die Funktion disponiert diese Kandidatenmenge in dem angegebenen Zeitintervall von der Bestellung mit der frühesten Anfangszeit bis zur Bestellung mit der spätesten Anfangszeit. Soll der ganze Tag disponiert werden, geben diese Zeitparameter eben dies an. Ferner wird der Funktion mitgeteilt, wieviel Luft der Plan enthalten soll.
- Die Funktion `erzeuge_tourenplan_rueck`, die der Funktion `erzeuge_tourenplan` entspricht, nur daß sie die Bestellungen in umgekehrter Reihenfolge disponiert: von abends nach morgens. Genauer: Von der Bestellung mit der spätesten Endzeit bis zur Bestellung mit der frühesten Endzeit im angegebenen Zeitintervall.
- Die Funktion `reverse_b_plot_spalten`, die die Bestellungen aller Spalten des Tourenplans in ihrer Reihenfolge umdreht. Genauso werden jeweils Schichtanfang und Schichtende vertauscht.

- Die Funktion `loesche_b_plot_spalten`, die als Parameter einen Fahrzeugtyp bekommt und alle Touren im Tourenplan, deren Fahrzeugtyp diesem entspricht, auflöst. Alle Bestellungen in diesen aufgelösten Touren gelten wieder als undisponiert.

Von morgens nach abends. Eine grundsätzliche Strategie ist, den Tourenplan in „natürlicher“ Weise von morgens nach abends zu erzeugen, indem `erzeuge_tourenplan` erst mit den Doppelbusbestellungen als Kandidaten, dann mit den Solobusbestellungen und schließlich mit den Taxibestellungen aufgerufen wird. Angefangene Enden von Doppelbustouren werden dann mit Solobusbestellungen aufgefüllt; später werden angefangene Doppel- und Solobustouren mit Taxibestellungen aufgefüllt. Will man überhaupt keine taxifähigen Fahrtwünsche disponieren, läßt man den dritten Durchlauf einfach weg. Die Touren werden bei dieser Strategie nur nach hinten hin aufgefüllt. Will man erreichen, daß möglichst viele Touren sich in ihrer Dauer der maximalen Schichtlänge nähern, so kann man mit den Werkzeugen `reverse_b_plot` und `loesche_b_plot_spalten` arbeiten. Zum Beispiel kann man so vorgehen: Disponiere erst die Doppelbusbestellungen und dann die Solobusbestellungen in Vorwärtsrichtung. Löse dann alle Solobustouren wieder auf, d.h., alle Solobusbestellungen, die nicht an Doppelbustouren angehängt wurden, werden wieder aus dem Plan genommen, und drehe den Tourenplan um. Die vorherigen Touranfänge sind jetzt die „losen Enden“. Disponiere nun rückwärts die restlichen Solobusbestellungen. Einige werden wieder an die Doppelbustouren angehängt, diesmal aber als Touranfänge. Disponiere nun die Taxibestellungen, drehe den Plan um, löse dann die Taxitouren (also diejenigen Taxibestellungen, die nicht als Touranfang vor eine Bustour gehängt wurden) wieder auf und disponiere die restlichen Taxibestellungen noch einmal. Dies ist nur ein Beispiel für die vielfältigen Möglichkeiten. Man kann auch mit den Anfangszeiten arbeiten und nur bestimmte Uhrzeiten disponieren, mit der Dichte des Plans experimentieren oder verschiedene Dichten kombinieren.

Von abends nach morgens. Das ganze Verfahren kann auch genau umgekehrt laufen: Es wird grundsätzlich von abends nach morgens (also rückwärts) disponiert. Bestellungen kleineren Fahrzeugtyps werden zum Auffüllen der *Touranfänge* benutzt. Analog erreicht man dann durch Spaltenumdrehen das Auffüllen der Bustour-*Enden*.

Von der Mitte zu den Rändern. Eine Strategie könnte sein, von der Uhrzeit des maximalen Fahrtwunschaufkommens aus, vorwärts zum Abend hin zu disponieren und rückwärts zum Morgen hin. Die maximale Anzahl parallel laufender Bestellungen ist ja die untere Schranke für die Anzahl der benötigten Fahrzeuge. Diese Bestellungen zumindest wären dann mit der geringstmöglichen Anzahl an Fahrzeugen versorgt.

6.2.5 Kosten

Die Kosten jeder Tour lassen sich exakt erst bestimmen, wenn jede Tour einem Fahrzeug zugeordnet ist. Der Tourenplan ist aber in der Lage, obere und untere Schranken für den Preis seiner Verwirklichung anzugeben. Beides wird von uns gemacht. In einer ersten Kostenberechnung während der Erzeugung der Touren werden pauschal die maximal vorkommenden Preise des benötigten Fahrzeugtyps jeder Tour (Doppel- oder Solobus) genommen, wobei die Größe des Fahrzeugs als maximal angesehen wird, damit erst einmal alle Bestellungen eine Chance haben, rein kapazitätsmäßig in jede Tour hineinzukommen. Dieser Preis wird mit der maximalen Schichtlänge jeder Spalte multipliziert.

Nach der Fertigstellung des Tourenplans wird für die Fahrzeugzuteilung der minimale Kapazitätsbedarf jeder Bustour und die minimal notwendige Schichtlänge eines Fahrzeugs, das diese Tour fahren soll, berechnet. Damit werden die Stundenpreise und die Schichtlängen kleiner; der Plan wird billiger. Diese Berechnung passiert in der Funktion `init_b_plot`. Außerdem wird dort für jede Bustour eine Kernzeit berechnet, indem am Anfang und am Ende jeder Tour die möglicherweise angehängten Taxibestellungen aus der Tour herausgerechnet werden. So entstehen mehr Buszuteilungsmöglichkeiten für jede Tour, denn jetzt können auch Fahrzeuge zugeteilt werden, die diese Tour nur unter Hinauswurf einiger Taxibestellungen am Anfang oder Ende der Tour bedienen könnten. Die „hinausgeworfenen“ Taxibestellungen würden dann an das Taxigewerbe gegeben.

Die im Tourenplan als Nebenprodukt erzeugten Taxitouren werden nicht als zu fahrende *Touren* aufgefaßt, da nach unserer Vorstellung jede nicht in einem Bus untergebrachte Taxibestellung einzeln von der nächsten Rufsäule aus angefahren werden sollte. Deshalb haben wir die Kosten jeder Taxispalte aus der Summe der Fahrpreise nach Taxitarif für die einzelnen Bestellungen in ihr berechnet. Und zwar so: Grundgebühr + Kilometeranzahl $\times$ Kilometerpreis + Stand-Dauer der Bestellung in Minuten $\times$ Wartetarif. Auf das Ergebnis werden 10 % aufgeschlagen, um das Warten während der Fahrt (im Stau oder an Ampeln) und Umwege zu berücksichtigen.

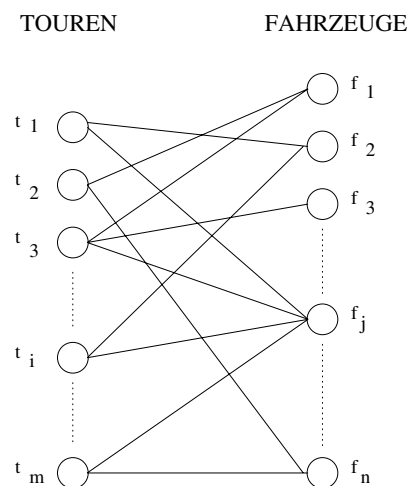
7 Das Fahrzeugzuteilungsprogramm

7.1 Die Fahrzeugzuteilung im Modell

Der Grundgedanke unseres Konzeptes ist: Erzeuge einen Tourenplan ausgehend von den Fahrtwünschen der Behinderten. Erst anschließend soll die Aufgabe gelöst werden: Finde für den Tourenplan eine optimale Fahrzeugzuteilung.

Vernachlässigen wir zunächst Fragen wie: Welche Fahrzeuge sind wann angemietet? Wo liegen die Depots? Welche Fahrzeuggrößen gibt es? Werden Zuteilungsmöglichkeiten eingeschränkt durch gegebene Personal- oder Buseinsatzpläne? Wenn ja, wie? Um den Blick frei zu haben für das Wesentliche, nehmen wir einfach an, es gäbe ein Paßt-Prädikat, das auf die Frage, ob eine Tour t von einem Fahrzeug f gefahren werden kann, mit Ja oder Nein antwortet.

Wie läßt sich das Problem abstrakt formulieren? Wir haben zwei Mengen, eine Menge T , die Touren, und eine Menge F , die Fahrzeuge, und für je zwei Elemente $t_i \in T$ und $f_j \in F$ sagt uns das Paßt-Prädikat eindeutig: t_i paßt zu f_j oder nicht. Sagen wir, links sind alle m Elemente aus T , rechts F mit n Elementen. Eine Kante zwischen t_i und f_j bedeutet: die zwei passen zueinander. Keine Kante bedeutet dementsprechend: sie passen nicht zueinander.

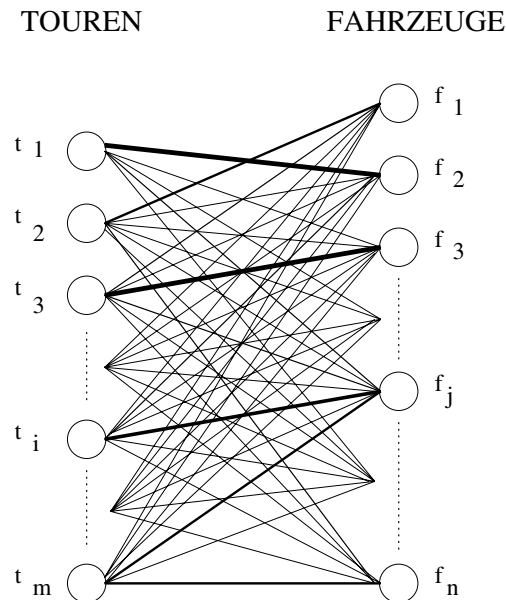


Das Modell zeigt einen bipartiten Graphen. Das Problem ist ein Zuordnungsproblem. Wir wollen für möglichst viele Touren, am besten für alle, je genau ein passendes Fahrzeug finden. Graphentheoretisch haben wir es mit dem Problem zu tun, eine maximale Korrespondenz zu finden. Das nennt man ein Matchingproblem. In bipartiten Graphen ist dieses Problem äquivalent zu dem *Assignmentproblem* (Jungnickel [1990]).

Die Lösung eines Assignmentproblems ist einfach. Sei n die Anzahl der Elemente, die die größere Seite im bipartiten Graph enthält. Der Aufwand liegt in der Größenordnung $O(n^3)$ (Jungnickel[1990]). Wenn wir den Kanten *Kosten* zuordnen, jede Kante also eine *Zuteilungsgüte* besitzt, wird das Problem dadurch nicht schwieriger. Dies gilt natürlich nur dann, wenn die Güten aller Kanten untereinander *vergleichbar* sind. Sie müssen sich wie Zahlen nach der $\leq$ -Relation ordnen lassen.

7.2 Der Assignment-Algorithmus

Die Idee zur Lösung des Assignmentproblems ist: *Alle* Elemente aus der Menge T lassen sich in Relation zu *allen* Elementen aus der Menge F setzen. Jede Kante hat eine Güte. Gibt es zwischen zwei Elementen t_i und f_j *keine* Kante, dann sagen wir, sie haben trotzdem eine Güte, eben die schlechteste, die wir uns vorstellen können. Das ist der Trick, um schon im voraus zu wissen: Es gibt immer eine Lösung des Problems. Damit wir aber Paare, die eigentlich nicht vorgesehen sind, sofort erkennen, müssen sie mindestens so teuer bewertet werden, wie n mal der Güte der teuersten Kante, die denkbar ist. Diese Bewertung sichert zu, daß unter allen Zuteilungskonstellationen nur genau dann eine Optimallösung ein Paar enthält, das eigentlich nicht vorgesehen war, wenn es nicht anders ging.



Dieser Trick vereinfacht das Modell. Der Weg zur optimalen Lösung kann nicht mehr in eine Sackgasse führen, weil stets an jeder Ecke wieder Wege zu allen Ecken aus der anderen Menge weiterführen. Wir arbeiten auf dem *vollständigen* bipartiten Graphen $K_{m,n}$. Eine

gute Eröffnungslösung im $K_{m,n}$ zu finden, ist ein Spaziergang: Gehe einmal Zickzack bei der kleineren Menge T links oben beginnend solange möglichst billig hin und her, bis alle Elemente $t_i \in T$ besucht wurden. Streiche anschließend jede zweite Kante und du hast ein erstes maximales Matching. Jetzt geht es nur noch darum, möglichst geschickt mit jedem Schritt besser zu werden. Die Schönheit und Schnelligkeit der bekannten Algorithmen zur Lösung des Assignmentproblems hängt im Wesentlichen davon ab, eine gute Datenstruktur zu besitzen, um dieses „Schritt für Schritt besser werden bis eine Optimallösung gefunden ist“ so effektiv wie möglich zu lösen. Es macht dabei einen Unterschied, ob im ursprünglichen Modell viele oder wenige Kanten vorhanden sind. Wir haben die Details guter Implementierungen, beispielsweise für den von Kuhn stammenden *ungarischen Algorithmus*, der wiederum auf den Arbeiten von König und Egerváry beruht, nicht weiter analysiert. Am ZIB gibt es einen Assignmentcode, der vor einigen Jahren von Andreas Hefner und Christian Rank entwickelt wurde. Ihre Version basiert wiederum auf dem Algorithmus „A Dual Forest Algorithm For The Assignment Problem“ (Achatz, Kleinschmidt, Paparizzos[1989]).

7.3 Die Tour-Fahrzeug-Anpassung

In dem Modul `assignment.c` haben wir die Prozedur `assignment` von Andreas Hefner und Christian Rank unverändert abgelegt und behandeln sie als Black Box, in die eine $n \times m$ Matrix, gefüllt mit positiven Integerwerten, hineingesteckt wird und ein Feld der Länge n herauskommt, das eine Optimallösung enthält. Uns ist es nicht möglich, zu kontrollieren, ob das stimmt. Wir vertrauen auf die Erfahrung mit diesem Code. Es ist zu beachten, daß in Abweichung zur in der Informatik üblichen Zählweise ab 0 beim Assignmentcode die realen Ausmaße der Matrix und des Feldes jeweils um 1 größer als angegeben sind und die Informationen an den Stellen 1 bis $n + 1$ bzw. $m + 1$ erwartet werden und zurückgeliefert werden.

In dem Modul `fahrzeugzuteilung.c` befindet sich die Prozedur `teile_fahrzeuge_zu`. Sie muß drei Aufgaben nacheinander erledigen:

1. Erzeuge das Fahrzeugangebot.
2. Erzeuge die Menge aller Fahrzeugzuteilungsmöglichkeiten.
3. Wähle daraus eine beste Fahrzeugzuteilung aus.

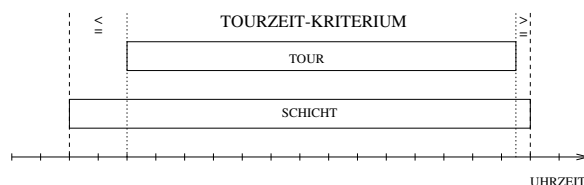
Im Grunde müssen wir uns nur noch über die zweite Aufgabe Gedanken machen. Die erste haben wir schon in Kapitel 4.1.3 beschrieben und gelöst: Aus der Fahrzeug-Stammdatei und einer Fahrzeug-Tagesdatei erzeugen wir ein Fahrzeugangebot. Die dritte Aufgabe erledigt zur Hauptsache die Black Box `assignment` für uns. Die zweite Aufgabe ist im Grunde die

Frage: Wie kann das Prädikat „Fahrzeug paßt auf Tour“ im vorliegenden Fall am besten modelliert werden?

Fünf Größen müssen aufeinander abgestimmt werden: Die Zeiten, der Fahrerbedarf, der Platzbedarf, die Ein- und Ausstiegsart und die geographische Lage einer *Tour* mit den Zeiten, dem Personal- und Kapazitätsangebot, der Ein- und Ausstiegsart und der geographischen Lage eines *Fahrzeugs*.

Außer bei Zeit und Ort läßt sich nicht viel modellieren. Das Personalangebot paßt genau dann, wenn es größer oder gleich dem Fahrerbedarf ist. Ebenso ist es bei der Kapazität eines Fahrzeugs. Es paßt vom Platz her genau dann, wenn die Kapazität größer oder gleich dem Platzbedarf ist. Die Ein- und Ausstiegsart haben wir gesondert berücksichtigt, weil der Rollstuhltyp *Kastenrollstuhl* nur in Fahrzeuge paßt, die eine *Rampe* haben. Eine Bestellung und damit eine Tour, die einen Kastenrollstuhl enthält, paßt *nicht* zu einem Fahrzeug, das nur ein *absenkbares* Heck hat oder mit einer Hebebühne ausgestattet ist. Weil die geographische Feinabstimmung zwischen Tour und Fahrzeug für uns wegen des fehlenden Stadtplans noch nicht möglich war, fällt sie zunächst weg. Wir dürfen sie aber nicht außer Acht lassen. Die Frage, ob und wie gut eine Depotanbindung möglich ist, fällt bei uns unter das Zeitkriterium.

Das Tourzeit-Kriterium Ob die Einsatzzeit eines Fahrzeugs, die *Schicht*, zeitlich zu einer Tour paßt, ist im Modellfall einfach zu klären. Wir sagen: Ein Fahrzeug paßt zeitlich zu einer Tour genau dann, wenn sein Zeitintervall das Zeitintervall der Tour *vollständig* überdeckt.



Die reale Fahrzeuganmietung beim Telebus ist noch relativ starr, auch wenn sich durch unser Anraten bereits Ansätze von Flexibilität zeigen. Wenn der Personal- und Buseinsatzplan in seinen Zeiten starr ist, ist es Zufall, ob ein guter Tourenplan, der erstmal nur die Fahrtwünsche der Behinderten zur Grundlage hat, dazu paßt. Sobald ein Tourzeitintervall nur wenige Minuten zeitlich über ein Schichtzeitintervall hinausragt, würde bei der eben eingeführten Definition die Antwort Nein lauten müssen. Da wir uns nicht auf den Zufall verlassen wollen, haben wir uns Gedanken gemacht, welche Flexibilisierungsformen wir bei den *Touren* und welche bei den *Fahrzeugen* vorsehen wollen. Wir gehen im folgenden erst darauf ein, wo wir bei den *Touren* nachgiebiger sein wollen, damit mehr und vor allem

gute und kostengünstige Zuteilungsmöglichkeiten entstehen. Danach diskutieren wir, was das Wort „Flexible Busanmietung“ in unserem Programm bedeutet.

Das Turlänge-Kriterium Eine Form, die Zahl der Zuteilungsmöglichkeiten zu erhöhen, ist, vor dem Erzeugen der Touren die maximale Schichtlänge (**SCHICHTLAENGE**) von zur Zeit 10 Stunden auf z.B. 7 Stunden herunterzusetzen. 80 % der Busse werden bevorzugt im 10-Stunden-Schichtbetrieb eingesetzt, die anderen 20 % im 8-Stunden-Schichtbetrieb. Ihre Schichtlängen sind wegen der vorgeschriebenen Pausenzeit dementsprechend 10,5 Stunden bzw. 8,5 Stunden. Taxis fahren flexibel bis zu 14 Stunden am Tag in einer Schicht. Dies sei nur nebenbei bemerkt, und es sei noch einmal daran erinnert, daß uns bei der Fahrzeugzuteilung nur die Bustouren und die Busse interessieren. Die Taxibestellungen sind flexibel von beliebigen Taxis als Tour oder einzeln fahrbar. Also, angenommen die Touren im Tourenplan dauern alle maximal 7 Stunden. Es werden sich viele Fahrzeuge finden, die diese kurzen Touren fahren können. 3 1/2 Stunden Varianz ist viel. Aber wenn die Schichtzeiten fest sind und voll bezahlt werden müssen, hat diese Art, mehr Zuteilungsmöglichkeiten zu erzeugen, einen entscheidenden Nachteil: Jeder gute Tourenplan wird bei 7-Stunden-Touren mindestens 30 % mehr Touren umfassen. Damit wäre man zwangsläufig um 30 % teurer als nötig. Die Überschlagsrechnung ist einfach: Ein Tourenplan umfaßt beim Telebus zur Zeit durchschnittlich 600 Busbetriebsstunden. Das sind bei 10-Stunden-Touren etwa 60 Busse. Aber bei 7-Stunden-Touren braucht man etwa 90 Busse. Busse werden derzeit für ihre volle Schichtzeit bezahlt und nicht nur für die Zeit, in der Behinderte befördert werden. Diese Methode lohnt sich daher erst, wenn es geteilte Schichten gibt oder eben die Leerfahrzeiten nicht bezahlt werden.

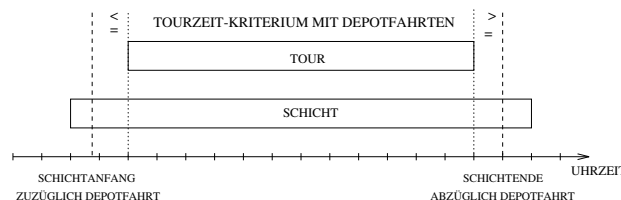
Unser Ziel ist, nach der Fahrzeugzuteilung den fertigen B-Plot zu haben, ohne viele Nachoptimierungen und Korrekturen vornehmen zu müssen. Umdispositionen oder Nachbesserungen wollen wir auf einen möglichst kleinen Teil von Busbestellungen beschränken. Schließlich haben wir uns so viel Mühe gemacht, einen besten Tourenplan zu finden. Diesen wollen wir jetzt nicht unnötig nur wegen der Fahrzeuge wieder verschlechtern.

Das Kernzeit-Kriterium Eine relativ flexible Dispositionsmasse im Tourenplan sind die *taxifähigen* Bestellungen. Diese können problemlos und vor allem ohne daß dies größere Kostensteigerungen verursacht, umdisponiert werden. Daher rührt die Idee, im Tourenplan einen festen *Kern* zu definieren, der nicht mehr verändert werden soll. Der Kern einer *Tour* ist der Teil der Tour, der von der ersten *Busbestellung* bis zur letzten *Busbestellung* der Tour reicht. Alle Kerne aller Touren ergeben zusammen den Kern des Tourenplans. Nun können wir sagen: Ein Fahrzeug paßt zeitlich zu einer Tour genau dann, wenn sein Zeitintervall das Zeitintervall der *Kernzeit* der Tour vollständig überdeckt. Dieses Kernzeit-Kriterium umfaßt das oben definierte Tourzeit-Kriterium, denn für jede Tour, die paßt, gilt: es paßt auch ihr Kern. Umgekehrt muß dies aber nicht immer gelten.

3. Um wieviel ein *Schichtrahmen erweitert* werden kann, damit die Schicht zeitlich nicht starr ist, sondern sich in einem vergrößerten Rahmen frei bewegen kann.
4. Ob die *Fahreranzahl fest* mit einem Fahrzeug zusammenhängt oder nicht.
5. Wie die *Kapazität* eines Fahrzeugs sich auf den *Preis* niederschlägt.

Die Depotfahrten Für jedes Fahrzeug im erzeugten Fahrzeugangebot gibt es einen Vermerk, ob die Depotfahrten für dieses Fahrzeug bzw. diese Schicht zu berücksichtigen sind oder nicht. Entweder ist es *nicht* angemietet, dann entspricht dieser Vermerk den Angaben aus der Stammdatei, oder es ist angemietet, dann folgt es aus dem Wahrheitswert des Steuerparameter `ANGEMIETET MIT DEPOTANFAHRT`.

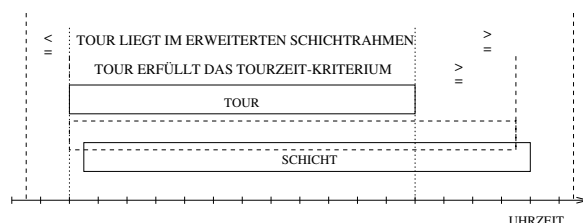
Die Depotfahrtzeit ist einerseits die Fahrzeit zwischen dem Anfangsdepot des Fahrzeugs und dem Anfangsort der ersten Bestellung der Tour, andererseits die zwischen dem Endort der letzten Bestellung der Tour und dem Enddepot des Fahrzeugs. Nehmen wir an, das Tourzeit-Kriterium zählt. Dann sagen wir in Anlehnung an obige Definition: Eine Schicht paßt mit Depotfahrten zu einer Tour genau dann, wenn ihr Zeitintervall abzüglich der Depotfahrten am Anfang und Ende das Zeitintervall der Tour vollständig überdeckt. Analog läßt sich das für das Kernzeit- und Flexzeitkriterium definieren.



Feste Schichtlänge Falls die Schichtlänge für ein Fahrzeug im Fahrzeugangebot *nicht* fest ist, sind einerseits Überstunden disponierbar. Wir wollen keine Überstunden einplanen. Also ermöglicht diese Situation bei uns nur den umgekehrten Fall: Eine Tour wurde einer Schicht zugeteilt. Die Kostenbewertung dieser Zuteilung berechnet sich jetzt aber nicht aus dem Stundenpreis mal der *Schichtlänge* sondern mal der zumeist kürzeren *Tourlänge*. Ein guter Tourenplan kann damit auch kurze Schichten enthalten, so wie jetzt beim Telebus fast jeder Tourenplan kurze Touren für Ersatzbusse, sogenannte *E-Busse*, enthält, die nur für die genaue Einsatzzeit bezahlt werden.

Ob die Schichtlänge fest ist, richtet sich wieder bei nicht angemieteten Fahrzeugen nach den Angaben in der Fahrzeugstammdatei, bei den angemieteten Fahrzeugen nach einem Steuerparameter (`ANGEMIETET_FESTE_SCHICHTLAENGE`). Dieses Konzept der flexiblen Schichtlängen ermöglicht es auch, *geteilte Schichten* zu disponieren.

Erweiterter Schichtrahmen Eine weitere Form flexibler Busanmietung betrifft nicht die Flexibilität der Schichtlänge sondern ihrer Lage. Sagen wir, ein gegebenes Zeitintervall einer Schicht kann am Anfang und am Ende um jeweils 60 Minuten erweitert werden und das Tourzeit-Kriterium zählt. Dann können wir sagen: Eine Tour paßt zeitlich auch dann, wenn sie vollständig im *erweiterten Schichtrahmen* liegt und höchstens so lang ist wie die Schicht. Wieder kann analog das Kernzeit- oder Flexzeit-Kriterium benutzt werden.



Gerade dieses Konzept ist, so denken wir, den Anbietern und Fahrern gegenüber durchsetzbar. Es schafft für die Disposition genug Spielraum für eine kostengünstige Lösung, die erst am Ende die echten Einsatzzeiten der konkreten Fahrzeuge festlegt. Die Anbieter können, wie gewohnt, mit ganzen Schichten kalkulieren. Die Fahrer müssen eine Varianz ihrer Arbeitszeiten um maximal eine Stunde hinnehmen. Im Regelfall wird die Varianz wahrscheinlich bei 15 Minuten liegen. Diese Varianz wird bei Fahrdiensten aber sowieso stets einkalkuliert, weil vorschriftsgemäß vor jedem Schichtbeginn mindestens 15 Minuten zur Überprüfung der Fahrtüchtigkeit des Fahrzeugs vorgesehen sind, und vielfach nach der Schicht Reinigungsarbeiten von den Fahrern erledigt werden müssen, die mal mehr und mal weniger Zeit beanspruchen.

In unserem Programm kann die Erweiterungszeit in der Fahrzeugstammdatei für jeden Anbieter und jedes Fahrzeug gesondert angegeben werden. Bei angemieteten Fahrzeugen wird der Schichtrahmen nur erweitert, wenn der Parameter `ANGEMIETET_OHNE_ERWEITERUNGSZEIT` ausgeschaltet ist.

Feste Fahreranzahl Jedes Fahrzeug hat bisher eine bevorzugte Personalbesetzung. Nur wenn ein Fahrzeug in Ausnahmefällen kurzfristig eingesetzt wird, kommt es vor, daß ein normalerweise von zwei Fahrern besetztes Fahrzeug auch mal nur einen Fahrer hat. Unsere Dispositionsergebnisse und unsere Analysen des Fahrtwunschaufkommens haben ergeben,

daß ein bester Tourenplan z.B. 20 Doppelbusse weniger braucht, als an diesem Tag beim Telebus angemietet waren und disponiert wurden. Ein Doppelbus kostet etwa 20 DM pro Stunde mehr als ein Solobus. Das ergibt eine Kostendifferenz die auf den Tag gerechnet in diesem Beispiel theoretisch 4.000 DM betragen würde. Praktisch war es etwas weniger, weil unser automatisch erzeugter Plan im Bereich der Taxibestellungen teurer war als der von Hand disponierte.

In der Fahrzeug-Stammdatei kann die alternative Berechnungsform wieder fahrzeugbezogen angegeben werden. Bei angemieteten Fahrzeugen wird diese billigere Rechnung aber nur dann übernommen, wenn der Parameter `ANGEMIETET_FESTE_FAHRERANZAHL` ausgeschaltet ist.

Das Preis-Kapazität-Verhältnis Wie bei der Fahreranzahl so gibt es auch bei der Kapazitätsauslastung Differenzen zwischen Angebot und Nachfrage. Wenn wir bei einer Fahrzeugzuteilung nicht den Stundenpreis als Berechnungsfaktor nehmen, der sich aus der Busgröße ableitet, sondern den, der dem Platzbedarf der Tour, auf die gängigen Busgrößen aufgerundet, entspricht, sind viele Ergebnisse billiger. Die Preisdifferenz zwischen den beiden gängigsten Arten 4-3er-Bus (4 Rollstuhlplätze, 3 Sitzplätze) und 2-3er-Bus (2 Rollstuhlplätze, 3 Sitzplätze) beträgt etwa 10 DM pro Stunde. Beim Telebus wird die eben vorgestellte Abrechnungsform bei den 4 Neoplan-Bussen (Kapazität: 6,4 oder 5,4), die noch für den Telebus im Einsatz sind, angewendet: Sie kosten genauso viel, wie die 4-3er-Busse. Gerade weil der Telebus-Service, wie die Statistiken in Kapitel 4.1.1 zeigen, vornehmlich ein Individualservice ist, lohnen sich nur wenige große Busse. Dies würde sich aber ändern, wenn beispielsweise vom Telebus verstärkt Schultouren und Touren für Behinderteneinrichtungen übernommen würden. Wenn es mehr geplante Gruppen- und Sammelfahrten beim Telebus gäbe, würden sich auch mehr große Busse lohnen.

Quintessenz Diese Beispiele zeigen: Summa summarum können aus energisch geführten Verhandlungen mit den Bewerbern Einsparungspotentiale für die öffentliche Hand entstehen, die sich aufs Jahr gerechnet in Millionenbeträgen bewegen. Die Fahrzeuge als Markt zu betrachten, möglichst viele Anbieter durch öffentliche Ausschreibungen für diesen Markt zu gewinnen und das beste für den Senat und die Behinderten auf diesem Markt auszuhandeln, das ist die wichtigste Aufgabe, die von der Geschäftsführung und den politisch Verantwortlichen angegangen werden muß. Ein flexibles Fahrzeugangebot ist billiger und berührt in keiner Weise die Servicequalität für die Behinderten. In Kapitel 9 kann man sehen, wie sich die verschiedenen Kombinationen einer flexiblen Busanmietung in Kosten umrechnen lassen. In Kapitel 10 haben wir aus diesen Analysen und Berechnungen Vorschläge abgeleitet, die bei einer rechnergestützten Disposition von unserem Programm sofort aufgegriffen werden können.

7.5 Der Tourenplan wird zum B-Plot

Die Prozedur `teile_fahrzeuge_zu` aus dem Modul `fahrzeugzuteilung.c` erzeugt im ersten Schritt ein Fahrzeugangebot, das im Rahmen der Vorgaben so flexibel wie möglich ist. Anschließend werden von jeder Tour aus jeweils alle Fahrzeuge bzw. Schichten durchgegangen, und das Prädikat `fzg_ paßt_auf_tour` entscheidet von Fall zu Fall nach der vorher eingestellten Strategie, ob eine Zuteilung möglich ist oder nicht. Paßt das Fahrzeug, werden auf dem Weg gleich alle Informationen, die später wichtig sein können, in einer Tour-Fahrzeug-Matrix, die für jede Tour eine Zeile und jedes Fahrzeug eine Spalte bereit hält, vermerkt. Im Programm heißt sie `tf_matrix`. Jede Tour im Tourenplan hat eine Spaltennummer. Dies ist ihre Zeilennummer in der Tour-Fahrzeug-Matrix. Jedes Fahrzeug hat im Fahrzeugangebot einen Index. Dieser Index ist seine Spaltennummer in der Tour-Fahrzeug-Matrix.

Die Informationen, die gespeichert werden, sind die gegebenenfalls neuen Touranfangs- und -endzeiten sowie die Schichtanfangs- und -endzeiten. Es werden die Kosten für diese Tour, wenn sie von dem entsprechenden Fahrzeug bedient würde, berechnet. Weil die Güte einer Zuteilung auch von Fragen abhängt wie: ist das Fahrzeug angemietet oder nicht?, oder: wie groß ist die Zeitdifferenz zwischen der Schicht- und der Tourdauer (Leerzeiten)?, berechnen wir zusätzlich eine *Zuteilungsgüte* für jedes passende Tour-Fahrzeug-Paar (siehe auch `lege_matching_kante` in `fahrzeugzuteilung.c`). Die Zuteilungsgüte ist bei angemieteten Fahrzeugen derzeit die Summe aus Kosten, Zeitdifferenz und dem Wert von `GUETE_ANGEMIETETES_FAHRZEUG = 0`. Bei nicht angemieteten Fahrzeugen wird stattdessen die `GUETE_ERSATZFAHRZEUG = 10.000` als dritter Summand genommen (siehe auch `parameter.h`).

Weil wir die Matrix nicht als dynamische Liste von Listen repräsentieren, sondern als feste Matrix (Devise: Bei den heutigen Rechnern geht Zeit vor Platz), haben wir mehr Zeilen und Spalten als vorhandene Touren und Fahrzeuge. Im Modell haben wir den Trick gemacht, den bipartiten Graph der echten Zuteilungsmöglichkeiten zu einem $K_{m,n}$ zu erweitern. Im Programm spiegelt sich dies dadurch wieder, daß alle Felder mit `UNENDLICH = 1.000.0000` initialisiert werden.

Bleiben bei einer optimalen Lösung einige Touren ohne passendes Fahrzeug, sollen sie als solche erkennbar sein. Wir wollen ihnen aber nicht fälschlicherweise irgendwelche unpassenden Fahrzeuge aus dem Fahrzeugangebot zuteilen. Deswegen übertragen wir nur solche Zuteilungen in den Tourenplan, deren Güte ungleich `UNENDLICH` ist.

Die mit allen Möglichkeiten gefüllte Tour-Fahrzeug-Matrix überführen wir in eine *Assignmentmatrix*. Die Kantenbewertung ist die *Zuteilungsgüte*. Die Prozedur `assign` liefert uns ein Feld *Fahrzeugzuteilung* zurück. Deren Indizes entsprechen den Tourennummern der Touren im Tourenplan, die Feldeinträge entsprechen den Feldnummern der Fahrzeuge im

Fahrzeugangebot.

Die optimale Lösung kann von uns benutzt werden, um aus dem Tourenplan einen *B-Plot* zu machen: Wir schreiben alle Fahrzeuginformationen an die passende Stelle in die B-Plot-Verwaltungsfelder der Touren, insbesondere auch die realen Kosten.

Noch sind wir nicht fertig. Mußten sich beispielsweise die Touren an die Fahrzeuge anpassen, wurde also das Kernzeit- oder Flexzeit-Kriterium gewählt, müssen wir noch den B-Plot aktualisieren. Alle Bestellungen, die nicht zwischen dem im Verwaltungsfeld angegebenen Touranfang und -ende liegen, werden aus dem B-Plot entfernt und sind wieder frei zu disponierende Ecken im Dispo-Graph. Bis jetzt können dies nur Taxibestellungen sein. Man sollte nach der Fahrzeugzuteilung ruhig *alle* Taxitouren auflösen und sie neu disponieren. Es kann nämlich sein, daß eine Tour jetzt, nach der Fahrzeugzuteilung, noch Bestellungen aufnehmen kann, weil der Schichtanfang des ihr zugeteilten Fahrzeugs das späteste Schichtende der Tour nach hinten verschoben hat oder ein Bus mit großer, nicht variabler Schichtlänge auf diese Tour gesetzt wurde.

Wir müssen sicherheitshalber auch den Fall bedenken, daß bei einer Optimallösung eine Tour *kein* Fahrzeug aus dem Fahrzeugangebot abbekommen hat. Das passiert beispielsweise immer, wenn weniger Fahrzeuge als Touren vorhanden sind. Was dann? Wir haben uns entschieden, Touren, die kein Fahrzeug abbekommen, nicht aufzulösen. Für die Analysen und Modellrechnungen ist dies praktischer. Die Schwachpunkte sollen sichtbar werden. Der Tourenplan ist auf einmal sehr teuer, weil wir in diesem Fall auf die Kosten der Tour 1 Million DM addieren. Auch im späteren Betrieb darf dieser Fall nicht einfach dazu führen, die ganze Arbeit der Fahrtwunschverknüpfung, Tourenplanung und Fahrzeugzuteilung ohne Nachdenken wieder neu zu starten.

Die Ergebnisse von Fahrzeugzuteilungen beschreiben wir in Kapitel 9, weil sich die Daten am besten im direkten Vergleich zwischen Tourenplankosten, B-Plot-Kosten und realen Kosten bewerten lassen.

8 Umdisposition

Die Programme, wie sie jetzt dokumentiert vorliegen, entstanden nicht in einem großen Wurf. Es ist ein Programmpaket, das mit dem Gedanken entwickelt wurde, Stück für Stück einen Werkzeugkasten mit verschiedenen Werkzeugen zu füllen, die nach Bedarf verbessert oder durch neue ersetzt werden können. Die Werkzeugmaschine, der Tourenplangenerator, gab es anfangs nur als einfaches Modell mit einer kleinen Steuereinheit. Erst mit der Entwicklung des gesamten Programmpaketes erhielten wir viele der statistischen Daten, die uns auf Wechselwirkungen aufmerksam machten, Vermutungen erhärteten oder widerlegten und Ideen für den weiteren Entwurf lieferten.

Die Anforderungen und Optimierungsziele unterlagen im Verlauf des Telebus-Projektes einem ständigen Wandel. Dieser Wandel wird bei dem Einsatz der Programme fort dauern. Auch deswegen haben wir die Idee des Werkzeugkastens und der Werkzeugmaschine mit Steuerung im Verlauf der Programmentwicklung immer mehr in den Mittelpunkt gestellt.

Welche Werkzeuge benötigt man nun zum Umdisponieren? Es laufen in der Leitzentrale Stornierungen und Spontanbuchungen auf, und es können Situationen entstehen, die es nötig machen, einen Teil des B-Plots umzugestalten. Umdisposition kann aber auch bedeuten, einen fertigen B-Plot durch seine Veränderung im Nachhinein zu verbessern.

Für diese Arbeiten fehlen im Grunde nur noch zwei Werkzeuge: Das *Streichen* einer Bestellung aus dem B-Plot und das *Einfügen* einer Bestellung in den B-Plot. Etwas allgemeiner formuliert: Streiche einen Bestellungsblock einer Tour im B-Plot bzw. füge einen Bestellungsblock an einer bestimmten Stelle im B-Plot ein.

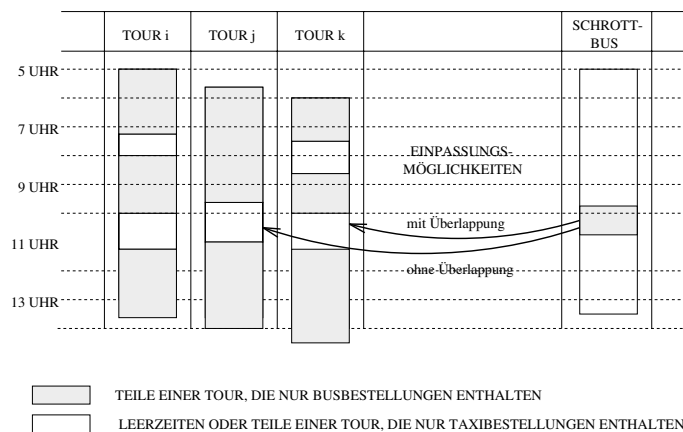
Für eine Per-Hand-Umdisposition reichen diese zwei Operationen vollkommen aus. Für ein rechnergestütztes Umdisponieren kann man sich aber viele weitere Werkzeuge vorstellen, die darauf aufbauen und Implementierungen von mehr oder weniger komplexen Verfahren zur B-Plot-Verbesserung oder zur Umdisposition sind. Auch darüber haben wir uns Gedanken gemacht.

8.1 Verbesserungsheuristiken

Als der Tourenplangenerator noch als Erstversion existierte, haben wir *Verbesserungsheuristiken* entwickelt, implementiert und getestet. Sie hatten zum Ziel, die *Busanzahl* zu minimieren.

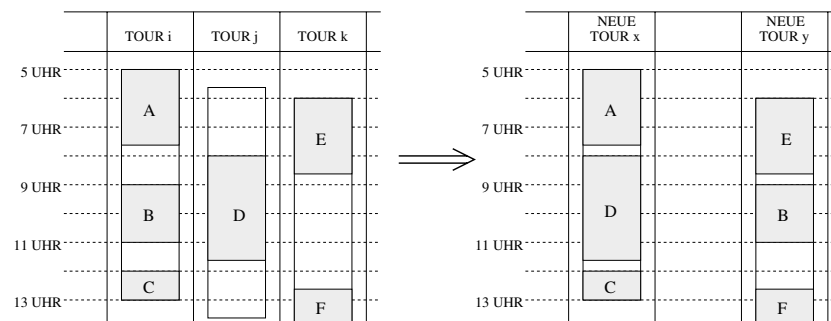
Schrottbusse Das erste Verfahren bekam den Arbeitstitel: *Schrottbusse*. Das waren für uns Touren, die ein oder zwei Busbestellungen und sonst nur taxifähige Bestellungen enthalten. Wir haben diese Schrottbusse aufgelöst und damit eine Menge von wieder neu zu

disponierenden Bestellungen erhalten. Je nach Kompaktheit des Tourenplans wurden so fünf bis zehn Touren aufgelöst, und man erhielt etwa 15 – 20 offene Busbestellungen. Für diese haben wir jeweils alle Möglichkeiten untersucht, sie in den restlichen Touren unterzubringen. Bei luftigen Plänen ging dies gut. Bei kompakteren Plänen haben wir die Zahl der Möglichkeiten dadurch erhöht, daß wir zeitliche Überlappungen, eingeplante Verspätungen, von bis zu 10 Minuten erlaubt haben.



Nun kann man entweder nacheinander die offenen Busbestellungen an ihre jeweils besten neuen Plätze setzen, die noch frei sind, oder man optimiert erst über alle, so daß möglichst viele einen Platz finden oder die global billigste Lösung gewählt wird. Bei diesem Dazwischenpacken ist nur eines zu beachten: Die notwendigen Pausen, die jede Tour haben muß, um fahrbar zu sein, dürfen dabei nicht zugestopft werden.

Austausch Weitere Ansätze, die wir untersucht haben, schöpften aus dem großen Schatz an *Austauschheuristiken*. Eine Verbesserungsidee ist z.B.: Mache aus drei schlechten Touren durch Austauschen von Teilen zwei gute Touren.



Wenn das Optimierungsziel nicht allein die minimale Anzahl von Bussen ist, sondern die Minimierung der Kosten, lohnt es sich bestimmt, auf jedem fertigen B-Plot Austauschheuristiken laufen zu lassen. Dann reicht es ja auch schon, wenn aus zwei schlechten Touren zwei gute oder aus drei schlechten drei neue werden, die den B-Plot insgesamt billiger machen.

Wir haben in das jetzt vorliegende Programmpaket *keine* dieser Verfahren eingebunden. Jede Verbesserungsheuristik hat ein bestimmtes Ziel. Ziele gibt es aber viele: Die Busanzahl minimieren; die Kosten minimieren; die Routenführung verbessern, also z.B. *schlechte Verbindungen* im Plan minimieren oder die Anzahl regionsbezogener Touren maximieren. Es kann sich lohnen, eine Austauschheuristik zu entwickeln, die für einen Tourenplan, der bewußt eng und ohne Lücken disponiert wurde, eine optimale Pausenlegung für alle Touren erzeugt, so daß er billig und fahrbar ist. Diese Beispiele zeigen, daß die Frage, ob und was eigentlich nachoptimiert werden soll, unklar ist. Sie ist darüberhinaus eng verknüpft mit der jeweils gewählten Planungsstrategie. Schließlich ist es offen, ob es besser ist, vor oder hinter oder vor und hinter der Fahrzeugzuteilung noch einmal zu optimieren.

Wir meinen: Verbesserungsheuristiken sollten erst in das Programmpaket eingebaut werden, wenn es in der Telebus-Zentrale eingesetzt wird. Dies begründen wir nicht nur damit, daß die Zielvorgaben noch zu widersprüchlich sind, sondern auch damit, daß wir nicht im Forschungslabor viel Aufwand treiben wollen, wenn besser in der Praxis nach Lösungen gesucht wird. Wir glauben, die Disponenten haben über die Jahre viele Erfahrungen gesammelt, die sich in Zusammenarbeit mit wissenschaftlich geschultem Personal in wirklich gute Implementierungen von Verbesserungsheuristiken umsetzen lassen.

Gegenseitiges Lernen schafft Akzeptanz. Wenn die Disponenten die Erfahrung machen, daß sie nicht nur über das Steuerpult die automatische Tourenplanung nach ihren Vorstellungen regeln können, sondern erleben, daß da EDV-Personal oder Kolleginnen und Kollegen aus einer Forschungseinrichtung sind, die ihre Ideen und Erfahrungen aufgreifen und in Programme umsetzen, dann schafft das Vertrauen und ermöglicht für alle Beteiligten ein qualifiziertes Arbeiten.

8.2 Taxibusse

Eine weitere Idee macht deutlich, daß sich zu viel Optimierung nicht unbedingt lohnt. Die Schrottbusse sind dann *kein* Schrott, wenn Spontanbuchungen in der Leitzentrale angemeldet werden oder wenn ein Fahrzeug mitten in der Tour ausfällt und die restlichen Bestellungen von einem anderen Fahrzeug erledigt werden müssen.

Wie kann eine gute Disposition diesen Anforderungen vorsorglich gerecht werden? Unsere Idee ist: Damit der Plan billig ist, plane ihn kompakt; damit Luft im Plan ist, ziehe alle

Luft, die normalerweise auf alle Touren verteilt wird, in wenigen Touren zusammen, die alle Spontanbuchungen und Ausfälle auffangen sollen.

Schrottbusse sind ideale Auffangtoure. Geht bei einer kompakten Tourenplanung zufällig alles auf, sind also wenige und nur gute Bustouren herausgekommen, dann sind ideale Auffangtoure im Taxibereich zu finden. Man nehme dann die besten Touren, die nur taxifähige Bestellungen enthalten, und ordne diese nicht einem Taxi zu, sondern einem Bus! Wir wollen das Ergebnis einer solchen Fahrzeugzuteilung *Taxibusse* nennen.

Mit drei bis fünf Schrott- oder Taxibussen im Plan ist die Leitzentrale auf der sicheren Seite. Fast jeder Ausfall und eine ganze Reihe von Spontanbuchungen kann durch sie ohne Probleme aufgefangen werden, denn die taxifähigen Bestellungen können über Funk z.B. in einem festgelegten Zweistundenrhythmus an die Taxizentralen abgegeben werden. Damit ist Platz für andere Bestellungen, die nur von Bussen erledigt werden können. Für dieses Verfahren reichen wieder die zwei Grundwerkzeuge, Streichen und Einfügen, vollkommen aus.

Weitere Ideen für die Umdisposition ergeben sich, wenn man all das, was zu den Verbesserungsheuristiken gesagt wurde, nicht als globale, auf den ganzen Plan ausgerichtete Verfahren ansieht, sondern als lokale, auf wenige Touren beschränkte Verfahren. Das Wichtigste bei der Umdisposition ist nämlich, daß sie möglichst *träge* ist. Denn im Grunde soll der Plan so bleiben wie er ist.

9 Der Tourenplangenerator im Test

In der letzten Januarwoche und der ersten Februarwoche des Jahres 1993 haben wir unseren Tourenplangenerator beim BZA getestet. Wir haben Tag für Tag Modellrechnungen angefertigt und mit unserem Programm Tourenpläne erzeugt. Mit den Disponenten und den Mitarbeitern in der Leitzentrale sind wir diese Pläne durchgegangen. Das Ziel dieses Tests und der Gespräche war, die *Qualität* der automatisch erzeugten Touren zu überprüfen und gleichzeitig zu demonstrieren, daß unser Programm so offen ist, daß es auf vielfältige Wünsche eingehen kann. Diese Testphase führte zu Veränderungen bei den Parametereinstellungen und zu Ideen für neue Heuristiken. Generell wurde von den Disponenten bemängelt, daß die von dem digitalisierten Stadtplan errechneten Fahrzeiten zu knapp bemessen waren. Wir haben daraufhin luftigere Pläne erzeugt, die „Schönheit“ der Touren zum Kriterium gemacht und Spezialfälle eingearbeitet. Am Ende der Testphase waren wir so weit, daß das Programm Pläne erzeugen konnte, die von der Art her den von Hand disponierten Plänen gleichkamen. Sie waren auch in ihrer Service- und Fahrqualität den Plänen des BZA ähnlich. Als B-Plot interpretiert, kosteten sie aber auch entsprechend viel.

Für die Woche vom 1. – 7. Februar 1993 hat uns der BZA freundlicherweise Einsicht in die Abrechnungen der Subunternehmer gewährt. So sind wir in der Lage, die Kosten *unserer* Tourenpläne und B-Plots mit den realen Kosten, die dem BZA entstanden sind, zu vergleichen. Dabei muß angemerkt werden, daß der BZA über keine Tages- oder Wochenabrechnung verfügt, sondern nur über die monatliche Kostensumme Bescheid weiß. Die Anbieterrechnungen sind zwar nach Tagen aufgeschlüsselt, aber bei der Kontrolle und Abrechnung werden diese Daten nicht auf den Tag oder die Woche bezogen ausgewertet. So entstand die folgende Tabelle durch eigenes Rechnen auf Grundlage der Originalabrechnungen der etwa 40 Subunternehmer.

Dieser Abrechnung stellen wir die Zahlen und Kosten der Tourenpläne gegenüber, die von unserem Dispositionsprogramm erzeugt wurden. Wegen der Lösungsidee Set Partitioning erzeugen wir in der Regel nicht nur *einen*, sondern viele verschiedene Pläne für einen Tag und wählen unter diesen den kostengünstigsten aus. Wir stellen den BZA-B-Plot-Kosten erst einmal die von unserem Programm berechneten *Tourenplankosten* gegenüber, d.h., es wird vorausgesetzt, daß für jede generierte Tour auch ein passendes Fahrzeug vorhanden ist. Dies ist beim Vergleich der Zahlen in den folgenden Wochentabellen zu beachten.

Es gibt noch billigere Lösungen, z.B. wenn die Möglichkeit von geteilten Schichten vorausgesetzt wird. Auf einfache Weise können wir für jeden Tag sofort eine untere Schranke berechnen: Die Kosten eines Tourenplans, der nach einer guten Fahrtwunschverknüpfung jede Ecke des Bestellungsgraphen als eigene Tour fährt. Es müssen dann nur die reinen Beförderungskosten jeder *einzelnen* Bestellung bezahlt werden. Leerzeiten entstehen nicht.

Wochenübersicht: Telebus-Abrechnung vom 1.2.93 - 7.2.93					
Tag Datum	Fahrzeugtyp	Touren- anzahl	Betriebs- stunden	gefahrte Kilometer	Kosten in DM
Montag 1.2.1993	DOPPELBUS	44	398	41 x 150	28.783,48
	E-BUS	3	11 3/4		
	SOLOBUS	13	128	13 x 150	6.929,15
	E-BUS	2	6 1/2		
	TAXI	33	340	5.891	10.912,02
	GESAMT	95	884 1/4	13.991	46.624,65
Dienstag 2.2.1993	DOPPELBUS	42	378 1/2	42 x 150	29.772,20
	E-BUS	11	46 3/4		
	SOLOBUS	14	138 1/2	15 x 150	7.135,40
	E-BUS	4	18 3/4		
	TAXI	35	364	6.364	10.928,52
	GESAMT	106	946 1/2	15.065	47.836,12
Mittwoch 3.2.1993	DOPPELBUS	45	414 1/2	44 x 150	29.751,63
	E-BUS	5	23 1/4		
	SOLOBUS	17	166 3/4	18 x 150	9.315,70
	E-BUS	3	11 1/4		
	TAXI	34	348	5.843	10.604,82
	GESAMT	104	963 3/4	15.143	49.627,15
Donnerstag 4.2.1993	DOPPELBUS	49	452 1/4	48 x 150	32.837,56
	E-BUS	4	31 1/2		
	SOLOBUS	15	147 3/4	18 x 150	8.292,84
	E-BUS	10	32 1/4		
	TAXI	36	382	6.300	11.236,59
	GESAMT	116	1045 3/4	16.200	52.366,99
Freitag 5.2.1993	DOPPELBUS	45	404 3/4	45 x 150	30.665,45
	E-BUS	9	47 1/4		
	SOLOBUS	16	156	16 x 150	7.905,86
	E-BUS	1	1 3/4		
	TAXI	37	384	6.042	10.926,59
	GESAMT	108	993 3/4	15.192	49.497,90
Samstag 6.2.1993	DOPPELBUS	38	345	36 x 150	24.219,94
	E-BUS	4	12 1/4		
	SOLOBUS	6	58	6 x 150	2.990,42
	E-BUS	1	3 3/4		
	TAXI	18	188 1/4	3.843	6885,68
	GESAMT	67	607 1/4	10.143	34.096,04
Sonntag 7.2.1993	DOPPELBUS	49	440	44 x 150	31.894,84
	E-BUS	1	2 1/2		
	SOLOBUS	6	58	6 x 150	3.321,60
	E-BUS	2	4 3/4		
	TAXI	17	159	3.314	4.514,14
	GESAMT	75	664 1/4	10.814	39.730,58

Wochenübersicht: Tourenplan-Kosten vom 1.2.93 - 7.2.93					
Tag Datum	Fahrzeugtyp	Touren- anzahl	Betriebs- stunden	gefahrte Kilometer	Kosten in DM
Montag 1.2.1993	DOPPELBUS	24	226	3.562	15.826,-
	SOLOBUS	22	196	3.594	11.825,-
	TAXI		348	3.872	7.006,-
	GESAMT		770	11.028	34.657,-
Dienstag 2.2.1993	DOPPELBUS	27	262	3.890	17.334,-
	SOLOBUS	32	300	5.610	14.157,-
	TAXI		216	2.044	5.897,-
	GESAMT		778	11.544	37.388,-
Mittwoch 3.2.1993	DOPPELBUS	25	235	3.568	15.309,-
	SOLOBUS	32	242	4.413	11.162,-
	TAXI		307	3.823	10.522,-
	GESAMT		784	11.804	36.993,-
Donnerstag 4.2.1993	DOPPELBUS	31	287	4.334	18.805,-
	SOLOBUS	32	288	5.221	13.861,-
	TAXI		206	2.138	5.935,-
	GESAMT		781	11.803	38.601,-
Freitag 5.2.1993	DOPPELBUS	29	252	3.874	16.712,-
	SOLOBUS	30	275	4.978	12.948,-
	TAXI		191	1.741	4.956,-
	GESAMT		718	10.593	34.616,-
Samstag 6.2.1993	DOPPELBUS	27	190	3.281	12.129,-
	SOLOBUS	17	128	2.656	5.975,-
	TAXI		199	2.822	7.364,-
	GESAMT		518	8.759	25.468,-
Sonntag 7.2.1993	DOPPELBUS	37	288	4.458	18.833,-
	SOLOBUS	16	110	2.042	5.063,-
	TAXI		170	1.962	5.484,-
	GESAMT		568	8.462	29.380,-

9.1 Tourenplan-Kosten

Es ist interessant zu wissen, daß fast an jedem Tag der von uns ausgewählte kostengünstigste Tourenplan das Ergebnis einer *anderen* Generierungsstrategie war. Zwischen den realen Kosten des BZA und unseren *Tourenplankosten* liegen täglich etwa 10.000 bis 15.000 DM. Diese große Differenz ist nicht in erster Linie darauf zurückzuführen, daß beim BZA schlecht disponiert wird und bei uns gut. Zwei Gründe führen wir für diese große Kostendifferenz an:

1. Die Praxis der Fahrzeuganmietung beim BZA ist *unflexibel*.
2. Die Handdisposition kann nicht jedesmal viele Varianten durchspielen und die beste auswählen.

Man ist beim BZA froh, wenn nach 2 Tagen harter Arbeit für die mittlerweile meist über 1000 Fahrtwünsche pro Tag *ein* fertiger B-Plot an der Wand hängt.

Genau an diesen beiden Punkten setzt unsere Arbeit an. Wir wollen die Kapazität der heutigen Rechner nutzen, um für jeden Tag viele Varianten in Sekundenschnelle durchspielen zu können. Und wir wollen die Einsparungspotentiale aufzeigen, die sich bei einer Flexibilisierung der Fahrzeugeinsatzplanung ergeben.

9.1.1 Beispiel: Donnerstag, 4.2.1993

In den folgenden Tabellen, die die Ergebnisse verschiedener Dispositionsstrategien für Donnerstag, den 4.2.1993 enthalten, findet man oben jeweils die Bezugsgrößen, die Zahlen und Kosten für den Vergleichstourenplan. Als Parameter haben wir aus Platzgründen nur drei aufgeführt. Die restlichen Parameter haben wir bei dieser Auswertung konstant gelassen, um die Ergebnisse wirklich vergleichen zu können. Wir haben folgende Einstellung gewählt: Die Bestellungen werden im Tourenplan nie über ihre frühesten oder spätesten Zeiten hinaus verschoben. Zwischen den einzelnen Bestellungen in jeder Tour werden nur Verbindungen genommen, deren Fahrzeit bei Doppelbusnachfolgern kleiner als 30 Minuten, bei Solobusnachfolgern kleiner als 40 Minuten ist. Die Zwischenfahrzeiten werden auf 10 Minuten aufgerundet, Lücken im B-Plot werden gefüllt, es wird keine Depotanbindung versucht.

Alle möglichen Varianten in dieser Arbeit aufzuführen, würde jeden Rahmen sprengen. Schließlich können wir etwa 20 unabhängige Parameter-Ebenen unterscheiden, die jeweils mindestens zwei Werte annehmen können. Damit ergeben sich über 2^{20} Variationen, mit denen unser Programm für einen Tag Tourenpläne erzeugen kann.

Ergebnisse auf der Grundlage der Verknüpfungsstrategie NUR BUS Beginnen wir mit drei Tabellen, denen gemeinsam ist, daß bei der Fahrtwunschverknüpfung dieselbe Verknüpfungsvariante „NUR BUS“ gewählt wurde. D.h., Sammelfahrten und Ein- und Anbindungen werden nur auf der Menge aller Busbestellungen erzeugt.

Die Kosten der Tourenpläne für diesen Tag schwanken zwischen 39.000 DM und 44.000 DM, die Tourenanzahl zwischen 54 und 67. Die Rückwärtsstrategie weist an diesem Tag stets etwas schlechtere Ergebnisse auf. Daraus kann nicht abgeleitet werden, daß dies immer so ist. Jeder Tag ist anders, und an vielen Tagen macht die Rückwärtsstrategie das Rennen. Ebenso ist der Vergleich der *best fit*- und der *first fit*-Strategie zu werten. Bei einer Kettenlänge = 0 gewinnt *best fit*, bei einer Kettenlänge = 1 *first fit*. Relativ konstant dagegen sind die Kosten in der Tabelle „Vergleich Luftig – Normal – Eng“. Je weniger Luft in jeder Tour ist, desto billiger wird der Tourenplan, wenn man gut disponiert hat. Aber es gilt auch: je weniger Luft im Plan ist, desto anfälliger wird er im realen Fahrbetrieb sein.

VERGLEICH LUFTIG - NORMAL - ENG

VORGABE	STRATEGIE	Fahrzeugtyp	Touren-Anzahl	Betriebs-stunden	Kosten in DM
mit Fahrzeitrundung ohne Bustypnivellierung Schichtlänge = 10 h	VORWÄRTS LUFTIG KETTENLÄNGE = 0 BEST-FIT	Doppelbus	27	260	16.861,-
		Solobus	27	234	11.384,-
		Taxi		336	11.698,-
		Gesamt		830	39.943,-
dito	RÜCKWÄRTS LUFTIG dito	Doppelbus	28	272	17.640,-
		Solobus	30	258	12.189,-
		Taxi		323	10.840,-
		Gesamt		853	40.669,-
dito	VORWÄRTS NORMAL dito	Doppelbus	27	267	17.301,-
		Solobus	26	228	11.054,-
		Taxi		336	10.882,-
		Gesamt		831	39.237,-
dito	RÜCKWÄRTS NORMAL dito	Doppelbus	29	274	17.816,-
		Solobus	29	255	12.013,-
		Taxi		300	9.853,-
		Gesamt		829	39.682,-
dito	VORWÄRTS ENG dito	Doppelbus	27	263	17.093,-
		Solobus	29	242	11.578,-
		Taxi		313	9.883,-
		Gesamt		818	38.554,-
dito	RÜCKWÄRTS ENG dito	Doppelbus	29	276	17.794,-
		Solobus	30	256	12.188,-
		Taxi		288	9.144,-
		Gesamt		820	39.126,-

VERGLEICH VON BEST-FIT- UND FIRST-FIT-STRATEGIE

VORGABE	STRATEGIE	Fahrzeugtyp	Touren- Anzahl	Betriebs- stunden	Kosten in DM
mit Fahrzeitrundung ohne Bustypnivellierung Schichtlänge = 10 h	VORWÄRTS LUFTIG KETTENLÄNGE = 0 BEST-FIT	Doppelbus	27	260	16.861,-
		Solobus	27	234	11.384,-
		Taxi		336	11.698,-
		Gesamt		830	39.943,-
dito	dito FIRST-FIT	Doppelbus	28	277	17.945,-
		Solobus	25	232	11.247,-
		Taxi		358	11.688,-
		Gesamt		867	40.880,-

VERGLEICH VON KETTENLÄNGE 0, 1 UND 3

VORGABE	STRATEGIE	Fahrzeugtyp	Touren- Anzahl	Betriebs- stunden	Kosten in DM
mit Fahrzeitrundung ohne Bustypnivellierung Schichtlänge = 10 h	VORWÄRTS LUFTIG KETTENLÄNGE = 0 BEST-FIT	Doppelbus	27	260	16.861,-
		Solobus	27	234	11.384,-
		Taxi		336	11.698,-
		Gesamt		830	39.943,-
dito ohne Bustypnivellierung	dito KETTENLÄNGE = 1 BEST-FIT	Doppelbus	31	304	19.705,-
		Solobus	32	280	13.425,-
		Taxi		318	10.419,-
		Gesamt		902	43.549,-
dito mit Bustypnivellierung	dito KETTENLÄNGE = 1 BEST-FIT	Doppelbus	35	344	22.391,-
		Solobus	28	238	11.443,-
		Taxi		309	10.283,-
		Gesamt		891	44.117,-
dito ohne Bustypnivellierung	dito KETTENLÄNGE = 1 FIRST-FIT	Doppelbus	32	298	19.921,-
		Solobus	31	286	13.418,-
		Taxi		325	10.560,-
		Gesamt		909	43.899,-
dito ohne Bustypnivellierung	dito KETTENLÄNGE = 3 BEST-FIT	Doppelbus	35	325	21.083,-
		Solobus	32	266	12.608,-
		Taxi		318	10.334,-
		Gesamt		909	44.025,-

Der Vergleich von Tourenplänen, die mit einer maximalen Schichtlänge von 10, 8 und 5 Stunden erzeugt werden, soll zeigen, wie die Vorgabe Schichtlänge sich in den Kosten widerspiegelt. Sind die Kosten bei Schichtlängen von 10 und 8 Stunden noch etwa gleich, so wird der Plan bei einer maximalen Schichtlänge von 5 Stunden wesentlich billiger. Solch ein Plan, der auf eine Fahrzeugeinsatzplanung abzielt, die mit geteilten Schichten arbeitet, kostet etwa 2.000 bis 3.000 DM pro Tag weniger.

VERGLEICH SCHICHTLÄNGE 10h, 8h und 5h

VORGABE	STRATEGIE	Fahrzeugtyp	Touren-Anzahl	Betriebs-stunden	Kosten in DM
mit Fahrzeitrundung ohne Bustypnivellierung Schichtlänge = 10 h	VORWÄRTS LUFTIG KETTENLÄNGE = 0 BEST-FIT	Doppelbus	27	260	16.861,-
		Solobus	27	234	11.384,-
		Taxi		336	11.698,-
		Gesamt		830	39.943,-
dito Schichtlänge = 10 h	RÜCKWÄRTS dito	Doppelbus	28	272	17.640,-
		Solobus	30	258	12.189,-
		Taxi		323	10.840,-
		Gesamt		853	40.669,-
dito Schichtlänge = 8 h	VORWÄRTS dito	Doppelbus	36	284	18.367,-
		Solobus	34	240	11.389,-
		Taxi		298	10.601,-
		Gesamt		822	40.357,-
dito Schichtlänge = 8 h	RÜCKWÄRTS dito	Doppelbus	37	258	16.626,-
		Solobus	36	252	12.000,-
		Taxi		319	10.750,-
		Gesamt		829	39.376,-
dito Schichtlänge = 5 h	VORWÄRTS dito	Doppelbus	50	248	15.811,-
		Solobus	49	221	10.153,-
		Taxi		316	11.328,-
		Gesamt		785	37.292,-
dito Schichtlänge = 5 h	RÜCKWÄRTS dito	Doppelbus	55	260	16.238,-
		Solobus	54	246	11.167,-
		Taxi		284	10.294,-
		Gesamt		790	37.699,-

Ergebnisse auf der Grundlage der Verknüpfungsstrategie MISCH Die gleichen Tourenplan-Erzeugungsstrategien wie eben haben wir noch einmal vom Computer rechnen lassen. Der Unterschied ist: Die Eingabe für den Tourenplangenerator ist ein *anderer*

Bestellungsgraph. Die gewählte Verknüpfungsform ist: Erst werden Gruppenfahrten verknüpft. Bei allen weiteren Sammelfahrten werden nur Kandidatenmengen berücksichtigt, die mindestens eine Busbestellung enthalten. Zusätzlich muß eine der beiden Bestellungen in jeder Ein- oder Anbindung eine Busbestellung sein.

Vergleichen wir die Ergebnisse. Die Kosten sind auf gleichem Niveau geblieben. Aber die Anzahl der *Bustouren* ist gestiegen. Sie liegt jetzt zwischen 61 und 75. Es gibt jetzt mehr Bustouren, dafür sind sie aber voller. Sie enthalten mehr Taxibestellungen. Einerseits wurden bei der Verknüpfung vermehrt Taxibestellungen in Busbestellungen eingewoben, andererseits hat jede Tour mehr Lücken, denn die gleiche Busbestellungsmasse verteilt sich jetzt auf 15 % mehr Tourzeitvolumen. Diese Lücken füllen wir mit Taxibestellungen auf. Hinweis: In der vierten Zeile der Tabelle „Vergleich Schichtlänge 10h, 8h und 5h“ sieht man, daß bei einer maximalen Schichtlänge von 8 Stunden auch einmal die Rückwärtsstrategie mit 1.500 DM Vorsprung gewinnt.

VERGLEICH LUFTIG - NORMAL - ENG

VORGABE	STRATEGIE	Fahrzeugtyp	Touren-Anzahl	Betriebs-stunden	Kosten in DM
mit Fahrzeitrundung ohne Bustypnivellierung Schichtlänge = 10 h	VORWÄRTS LUFTIG KETTENLÄNGE = 0 BEST-FIT	Doppelbus	30	286	18.766,-
		Solobus	32	296	14.066,-
		Taxi		229	6.897,-
		Gesamt		811	39.728,-
dito	RÜCKWÄRTS LUFTIG dito	Doppelbus	33	294	19.208,-
		Solobus	36	312	14.964,-
		Taxi		196	6.785,-
		Gesamt		802	40.270,-
dito	VORWÄRTS NORMAL dito	Doppelbus	31	287	18.805,-
		Solobus	32	288	13.861,-
		Taxi		206	5.935,-
		Gesamt		782	38.601,-
dito	RÜCKWÄRTS NORMAL dito	Doppelbus	33	294	19.267,-
		Solobus	34	290	13.892,-
		Taxi		178	5.530,-
		Gesamt		762	38.689,-
dito	VORWÄRTS ENG dito	Doppelbus	30	283	18.484,-
		Solobus	31	280	13.534,-
		Taxi		217	5.682,-
		Gesamt		779	37.670,-
dito	RÜCKWÄRTS ENG dito	Doppelbus	34	296	19.358,-
		Solobus	36	296	14.354,-
		Taxi		166	5.006,-
		Gesamt		758	38.718,-

VERGLEICH VON BEST-FIT- UND FIRST-FIT-STRATEGIE

VORGABE	STRATEGIE	Fahrzeugtyp	Touren- Anzahl	Betriebs- stunden	Kosten in DM
mit Fahrzeitrundung ohne Bustypnivellierung Schichtlänge = 10 h	VORWÄRTS LUFTIG KETTENLÄNGE = 0 BEST-FIT	Doppelbus	30	286	18.766,-
		Solobus	32	296	14.066,-
		Taxi		229	6.897,-
		Gesamt		811	39.728,-
dito	dito FIRST-FIT	Doppelbus	31	290	19.017,-
		Solobus	34	300	14.477,-
		Taxi		230	6.785,-
		Gesamt		821	40.278,-

VERGLEICH VON KETTENLÄNGE 0, 1 UND 3

VORGABE	STRATEGIE	Fahrzeugtyp	Touren- Anzahl	Betriebs- stunden	Kosten in DM
mit Fahrzeitrundung ohne Bustypnivellierung Schichtlänge = 10 h	VORWÄRTS LUFTIG KETTENLÄNGE = 0 BEST-FIT	Doppelbus	30	286	18.766,-
		Solobus	32	296	14.066,-
		Taxi		229	6.897,-
		Gesamt		811	39.728,-
dito ohne Bustypnivellierung	dito KETTENLÄNGE = 1 BEST-FIT	Doppelbus	35	316	20.637,-
		Solobus	37	333	15.684,-
		Taxi		214	5.959,-
		Gesamt		863	42.280,-
dito mit Bustypnivellierung	dito KETTENLÄNGE = 1 BEST-FIT	Doppelbus	41	374	24.431,-
		Solobus	30	264	12.497,-
		Taxi		209	6.164,-
		Gesamt		846	43.092,-
dito ohne Bustypnivellierung	dito KETTENLÄNGE = 1 FIRST-FIT	Doppelbus	34	322	21.207,-
		Solobus	36	324	15.469,-
		Taxi		210	6.404,-
		Gesamt		856	43.080,-
dito ohne Bustypnivellierung	dito KETTENLÄNGE = 3 BEST-FIT	Doppelbus	41	354	23.330,-
		Solobus	34	302	14.466,-
		Taxi		210	5.980,-
		Gesamt		866	43.776,-

VERGLEICH SCHICHTLÄNGE 10h, 8h und 5h

VORGABE	STRATEGIE	Fahrzeugtyp	Touren- Anzahl	Betriebs- stunden	Kosten in DM
mit Fahrzeitrundung ohne Bustypnivellierung Schichtlänge = 10 h	VORWÄRTS LUFTIG KETTENLÄNGE = 0 BEST-FIT	Doppelbus	30	286	18.766,-
		Solobus	32	296	14.066,-
		Taxi		229	6.897,-
		Gesamt		811	39.728,-
dito Schichtlänge = 10 h	RÜCKWÄRTS dito	Doppelbus	33	294	19.208,-
		Solobus	36	312	14.964,-
		Taxi		196	6.098,-
		Gesamt		802	40.270,-
dito Schichtlänge = 8 h	VORWÄRTS dito	Doppelbus	41	314	20.470,-
		Solobus	45	288	13.445,-
		Taxi		188	6.088,-
		Gesamt		790	40.003,-
dito Schichtlänge = 8 h	RÜCKWÄRTS dito	Doppelbus	44	284	18.465,-
		Solobus	45	302	14.120,-
		Taxi		192	5.953,-
		Gesamt		778	38.538,-
dito Schichtlänge = 5 h	VORWÄRTS dito	Doppelbus	55	269	17.336,-
		Solobus	59	270	12.369,-
		Taxi		200	6.815,-
		Gesamt		739	36.520,-
dito Schichtlänge = 5 h	RÜCKWÄRTS dito	Doppelbus	59	280	17.680,-
		Solobus	65	290	13.338,-
		Taxi		174	5.909,-
		Gesamt		744	36.927,-

9.1.2 Beispiel: Sonntag, 7.2.1993

Als zweites Beispiel haben wir uns für einen Tag am *Wochenende* entschieden, für Sonntag, den 7.2.1993. Diese Wahl begründet sich damit, daß es im Grunde zwei Profile für die Fahrtwunsch- und Bestellungskurven gibt: Das Alltagsprofil und das Wochenendprofil.

Stellt die Kurve in der Woche von weitem betrachtet *einen* Berg da, so gibt es am Wochenende 2 oder sogar 3 Berge! Gerade an Tagen wie diesen ist eine starre Fahrzeuganmietung mit langen Schichten von 8 oder 10 Stunden fatal. Der Leerstand fast aller Busse zu den Talzeiten ist vorprogrammiert. Deswegen haben wir für den Sonntag jeweils zwei Arten von Tourenplänen einander gegenübergestellt: Tourenpläne, die mit einer maximalen Schichtlänge von 10 und von 5 Stunden erzeugt wurden. Es gibt 3 Tabellen, die sich aufgrund der vorausgegangenen Verknüpfungsstrategien in ihren Zahlen und Kosten unterscheiden.

VERGLEICH SCHICHTLÄNGE 10h und 5h

VORGABE	STRATEGIE	Fahrzeugtyp	Touren-Anzahl	Betriebs-stunden	Kosten in DM
mit Fahrzeitrundung ohne Bustypnivellierung Schichtlänge = 10 h	VORWÄRTS LUFTIG KETTENLÄNGE = 0 BEST-FIT	Doppelbus	39	248	15.911,-
		Solobus	16	145	7.060,-
		Taxi		176	5.109,-
		Gesamt		568	28.080,-
dito Schichtlänge = 10 h	RÜCKWÄRTS dito	Doppelbus	37	288	18.833,-
		Solobus	16	110	5.063,-
		Taxi		170	5.484,-
		Gesamt		568	29.380,-
dito Schichtlänge = 5 h	VORWÄRTS dito	Doppelbus	56	228	14.338,-
		Solobus	26	124	5.795,-
		Taxi		135	4.908,-
		Gesamt		487	25.041,-
dito Schichtlänge = 5 h	RÜCKWÄRTS dito	Doppelbus	54	236	15.046,-
		Solobus	27	106	4.851,-
		Taxi		132	5.338,-
		Gesamt		474	25.235,-

Grundlage dieser Tabelle ist die Verknüpfungsstrategie NUR BUS

In unserer Wochenübersicht haben wir als „kostengünstigsten“ Plan für diesen Sonntag denjenigen ausgewählt, der bei der maximalen Schichtlänge von 10 Stunden mit der Rückwärtsstrategie entstand. Er hat die wenigsten Bustouren! Es gibt, wie man sieht, andere Pläne mit gleicher Schichtlänge, die billiger sind. Aber wenn man annimmt, daß fast alle Busse, wie es bisher Praxis ist, für ihre volle 8- oder 10-Stunden-Schicht bezahlt werden, wird dieser etwas teurere Tourenplan zum kostengünstigsten B-Plot.

VERGLEICH SCHICHTLÄNGE 10h und 5h

VORGABE	STRATEGIE	Fahrzeugtyp	Touren-Anzahl	Betriebsstunden	Kosten in DM
mit Fahrzeitrundung ohne Bustypnivellierung Schichtlänge = 10 h	VORWÄRTS LUFTIG KETTENLÄNGE = 0 BEST-FIT	Doppelbus	39	266	17.210,-
		Solobus	20	174	8.180,-
		Taxi		98	2.576,-
		Gesamt		538	27.967,-
dito Schichtlänge = 10 h	RÜCKWÄRTS dito	Doppelbus	39	300	19.406,-
		Solobus	19	134	6.391,-
		Taxi		109	2.907,-
		Gesamt		543	28.704,-
dito Schichtlänge = 5 h	VORWÄRTS dito	Doppelbus	56	242	15.388,-
		Solobus	33	151	6.910,-
		Taxi		80	2.477,-
		Gesamt		473	24.775,-
dito Schichtlänge = 5 h	RÜCKWÄRTS dito	Doppelbus	56	252	16.049,-
		Solobus	32	126	5.750,-
		Taxi		87	3.052,-
		Gesamt		465	24.851,-

Grundlage dieser Tabelle ist die Verknüpfungsstrategie MISCH

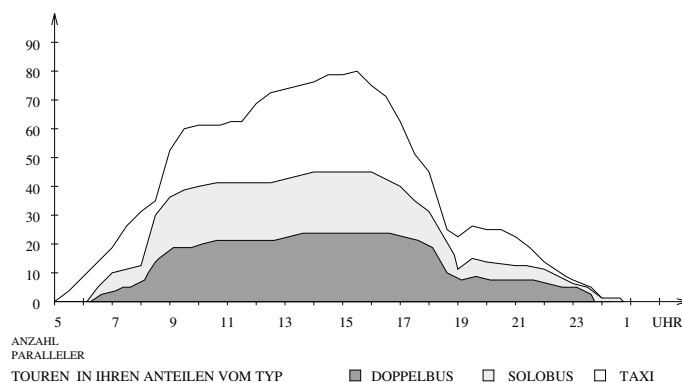
Nimmt man dagegen an, es gibt für das Wochenende die Möglichkeit, zumindest einen Teil der Fahrzeuge in geteilten Schichten fahren zu lassen, dann ist der billigste Tourenplan und B-Plot in der vorletzten Zeile der dritten Tabelle zu finden. Er kostet etwa 5.000 DM weniger bei etwa gleicher Servicequalität für die Behinderten.

VERGLEICH SCHICHTLÄNGE 10h und 5h

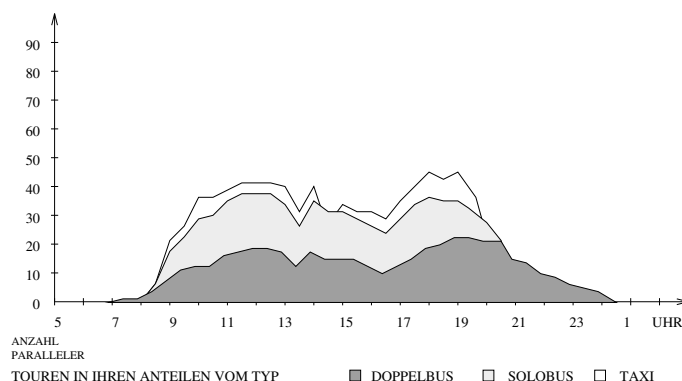
VORGABE	STRATEGIE	Fahrzeugtyp	Touren-Anzahl	Betriebs-stunden	Kosten in DM
mit Fahrzeitrundung ohne Bustypnivellierung Schichtlänge = 10 h	VORWÄRTS LUFTIG KETTENLÄNGE = 0 BEST-FIT	Doppelbus	38	258	16.639,-
		Solobus	23	198	9.484,-
		Taxi		69	1.052,-
		Gesamt		525	27.175,-
dito Schichtlänge = 10 h	RÜCKWÄRTS dito	Doppelbus	40	316	20.573,-
		Solobus	24	160	7.390,-
		Taxi		69	1.219,-
		Gesamt		545	29.182,-
dito Schichtlänge = 5 h	VORWÄRTS dito	Doppelbus	56	240	15.293,-
		Solobus	38	176	7.982,-
		Taxi		48	1.238,-
		Gesamt		465	24.513,-
dito Schichtlänge = 5 h	RÜCKWÄRTS dito	Doppelbus	57	251	15.911,-
		Solobus	38	167	7.618,-
		Taxi		44	1.346,-
		Gesamt		462	24.874,-

Grundlage dieser Tabelle ist die Verknüpfungsstrategie ALLE

Bevor wir von dem Vergleich der Tourenplankosten zu denen der B-Plot-Kosten übergehen, wollen wir noch zwei Parallelbilder betrachten.



Donnerstag, 4.2.1993. Die Anzahl paralleler Touren unseres Vergleichstourenplans. Strategie: Vorwärts, luftig, Kettenlänge = 0, *best fit*.



Sonntag, 7.2.1993. Die Anzahl paralleler Touren eines Tourenplans. Strategie: Vorwärts, luftig, Kettenlänge = 0, *best fit*.

So läßt sich die zeitliche Anordnung der Touren eines Tourenplanes darstellen. Im Unterschied zu den Bestellungskurven sehen sie *gleichmäßiger* und *dicker* aus. Sie sind gleichmäßiger, weil es nicht das gleiche ist, ob man ca. 600 bis 1.000 Bestellungen mit einer Dauer von 5 bis 50 Minuten stapelt oder ca. 80 Touren mit einer Dauer von etwa 5 bis 10 Stunden. Sie sind dicker als ihre Bestellungskurven, weil zu den Bestellungen die ganzen Fahrzeiten hinzu kommen, die *zwischen* den Bestellungen als Verbindungen in den Touren notwendigerweise existieren müssen.

Das Tourenplan-Parallelbild für den Donnerstag weist viele Taxitouren über den Bustouren auf. Dagegen sind im Sonntagsbild fast alle Taxibestellungen in den Bustouren untergekommen, weil wir in diesem Fall die Verknüpfungsstrategie ALLE gewählt haben. Jede

Fahrzeuganmietung kann auf einfache Weise ebenfalls in ein solches Parallelbild überführt werden. Wenn man verschiedene Tourenplan- und Fahrzeuganmietungsprofile untereinander vergleicht, lassen sich viele Erkenntnisse ableiten, wie die Telebusse am besten angemietet werden sollten.

9.2 B-Plot-Kosten

Unser Tourenplan, den wir für den Donnerstag als Vergleichsgröße herangezogen haben, kostet genau 39.943 DM. Sagen wir: er kostet 40.000 DM. Auf der nächsten Seite haben wir als Vergleichsgröße die Zahlen eines Tourenplans genommen, der mit einer maximalen Schichtlänge von 8 Stunden erzeugt wurde. Er umfaßt mehr Touren als der erste, kostet aber ungefähr dasselbe. In der letzten Zeile der 2. Tabelle ist zu sehen: Dieser 40.000 DM teure Tourenplan kostet als B-Plot 51.228 DM. Es sind dieselben Touren, aber jetzt werden ihnen Fahrzeuge zugeteilt, in diesem Fall genau die für den Tag angemieteten Busse. Die Taxitouren fassen wir stets als flexible Masse auf.

Dem BZA kostete der Donnerstag als B-Plot genau 52.366,99 DM. Unser Plan ist als B-Plot nach der Zuteilung der *angemieteten* Fahrzeuge nur etwa 1.000 DM günstiger als der B-Plot, der von Hand disponiert wurde.

Die beiden folgenden Tabellen sollen verständlich machen, daß ein wesentliches Ergebnis unserer Analysen und Modellrechnungen ist: Der Telebus-Fahrdienst braucht eine flexible Busanmietung!

Gehen wir die beiden Tabellen parallel zeilenweise durch. Angenommen, die Einsatzzeiten, also Schichtanfang und -ende aller Fahrzeuge, sind flexibel, wir müssen keine Depotfahrten bezahlen, die Personalbesetzung richtet sich nach dem Bedarf und die Schichtlängen sind zwar nicht teilbar aber in ihrer Dauer flexibel.

In diesem Fall entsteht ein Aufpreis von etwa 1 % dadurch, daß die Touranfänge und -enden von uns bei der Fahrzeugzuteilung auf 15 Minuten ab- bzw. aufgerundet werden. Die Frage, wann *genau* dürfen Schichten anfangen und enden, weist auf eine erste, wenn auch kleine Verteuerung hin. Der Aufpreis in dieser Zeile in der *zweiten* Tabelle beträgt 2,8 %. Der Grund ist: Im Fahrzeugangebot gibt es für unseren Plan zu wenige *kleine* Busse! Bei der Fahrzeugzuteilung müssen einzelnen Touren große Busse zugeordnet werden, obwohl sie sie vom Platzbedarf her nicht benötigen. Große Busse sind teurer als kleine Busse.

Der Blick in die nächste Zeile offenbart das nächste Problem: Die Bezahlung der Depotfahrten. Haben wir die Auswahl unter allen vorhandenen Fahrzeugen, so steigen die Kosten an diesem Donnerstag bei Berücksichtigung der Depotfahrten um weitere 2.000 DM. Diese Zahl entspricht einer Depotfahrzeit von etwa 35 Minuten pro Tour und einem Aufpreis um 5,1 %. Die Depotfahrzeit setzt sich aus der Fahrzeit vom Depot zum Anfang der Tour und der vom Ende der Tour zurück zum Depot zusammen. Wir haben beim Erzeugen der Pläne den Parameter **DEPOTANBINDUNG** ausgeschaltet, weil wir erst einmal dem Zufall eine Chance geben wollten. 35 Minuten ist also der Durchschnitt für den Zufall. Mit dem Programm können wir auch B-Plots erzeugen, die einen besseren Durchschnitt ergeben.

**ZUTEILUNG VON FAHRZEUGEN,
DEREN EINSATZZEITEN NICHT VORGEGEBEN SIND**

DISPOSITIONS- VORGABE	DISPOSITIONS- STRATEGIE	Fahrzeugtyp	Touren- Anzahl	Betriebs- stunden	Kosten in DM	
mit Fahrzeitrundung ohne Bustypnivellierung Schichtlänge = 10 h	VORWÄRTS LUFTIG KETTENLÄNGE = 0 BEST-FIT	Doppelbus	27	260	16.861,-	
		Solobus	27	234	11.384,-	
		Taxi		336	11.698,-	
		Gesamt		830	39.943,-	
FZG-ZUTEILUNGSVORGABE		AUFPREIS	Doppelbus	27	262	17.297,-
ohne Depotfahrten flexible Fahreranzahl flexible Schichtlänge		1 %	Solobus	27	234	11.339,-
			Taxi		348	11.698,-
			Gesamt		844	40.334,-
mit Depotfahrten flexible Fahreranzahl flexible Schichtlänge		1 % + 5,1 %	Doppelbus	27	276	18.426,-
			Solobus	27	254	12.275,-
			Taxi		348	11.685,-
		Gesamt		878	42.386,-	
mit Depotfahrten feste Fahreranzahl flexible Schichtlänge		1 % + 5,1 % + 4,7%	Doppelbus	27	276	18.321,-
			Solobus	27	254	14.258,-
			Taxi		348	11.685,-
		Gesamt		878	44.263,-	
mit Depotfahrten feste Fahreranzahl feste Schichtlänge		1 % + 5,1 % + 4,7 % + 5,7 %	Doppelbus	27	290	18.976,-
			Solobus	27	280	15.789,-
			Taxi		352	11.789,-
		Gesamt		922	46.554,-	

Für diese Tabellen haben wir den Zufall als Bezugsgröße genommen, um auf ein weiteres Problem hinzuweisen: Bei der Zuteilung der für den Tag *angemieteten* Fahrzeuge beträgt der Aufpreis bei den Depotfahrten 6,7 %. Er liegt also höher. Diese Steigerung liegt nicht daran, daß wir in der zweiten Tabelle B-Plots haben, die auf einem Tourenplan basieren, der mit einer maximalen Schichtlänge von 8 Stunden erzeugt wurde. Dies haben wir im übrigen nur gemacht, weil etwa 20 % der angemieteten Fahrzeuge, nämlich die Busse der karitativen Anbieter, in 8-Stunden-Schichten fahren, und diese die gleiche Zuteilungschance bekommen sollten, wie die privaten Busanbieter. Der wesentliche Grund dafür, daß die Depotfahrtskosten in der zweiten Tabelle höher liegen als in der ersten, ist: Viele Depots

haben eine so ungünstige geographische Lage, daß die Depotfahrzeiten sich immer erhöhen müssen. Es fangen eben nicht 10 % der Touren in Köpenick an und enden auch noch dort. Aber beispielsweise sind in Köpenick etwa 10 % der angemieteten Fahrzeuge stationiert.

**ZUTEILUNG DER ANGEMIETETEN FAHRZEUGE,
DEREN EINSATZZEITEN VORGEGEBEN SIND**

DISPOSITIONS- VORGABE	DISPOSITIONS- STRATEGIE	Fahrzeugtyp	Touren- Anzahl	Betriebs- stunden	Kosten in DM
mit Fahrzeitrundung ohne Bustypnivellierung Schichtlänge = 8 h	VORWÄRTS LUFTIG KETTENLÄNGE = 0 BEST-FIT	Doppelbus	36	284	18.367,-
		Solobus	34	240	11.389,-
		Taxi		298	10.601,-
		Gesamt		822	40.357,-
FZG-ZUTEILUNGSVORGABE	AUFPREIS	Doppelbus	36	287	18.996,-
ohne Depotfahrten flexible Fahreranzahl flexible Schichtlänge	2,8 %	Solobus	34	241	11.868,-
		Taxi		292	10.601,-
		Gesamt		820	41.465,-
mit Depotfahrten flexible Fahreranzahl flexible Schichtlänge	2,8 % + 6,7 %	Doppelbus	36	307	20.322,-
		Solobus	34	264	13.293,-
		Taxi		289	10.524,-
		Gesamt		861	44.139,-
mit Depotfahrten feste Fahreranzahl flexible Schichtlänge	2,8 % + 6,7 % + 11,3 %	Doppelbus	36	344	22.941,-
		Solobus	34	328	16.210,-
		Taxi		268	9.605,-
		Gesamt		940	48.765,-
mit Depotfahrten feste Fahreranzahl feste Schichtlänge	2,8 % + 6,7 % + 11,3 % + 6,2 % 27,0 %	Doppelbus	36	358	24.299,-
		Solobus	34	312	17.131,-
		Taxi		272	9.798,-
		Gesamt		942	51.228,-

Der Schritt in die nächste Zeile bringt bei der Zuteilung der angemieteten Fahrzeuge den größten Aufpreis in Höhe von 11,3 %. Das zeigt das Mißverhältnis zwischen dem Fahrerbedarf und dem Fahrerangebot auf! In unserem Plan ist die Zahl der Doppel- und Solobusse gleich. Im B-Plot des BZA vom gleichen Tag ist das Verhältnis 3:1. Dieses Mißverhältnis zieht sich durch alle Tage und hat sich anscheinend über Jahre beim BZA eingebürgert. Wir wissen nicht, ob dies darauf zurückzuführen ist, daß man sich dadurch einen besseren Service für die Behinderten verspricht, oder ob die Handdisposition, die nur zwischen Bus- und Taxibestellungen unterscheidet, nicht aber explizit zwischen Doppel- und Solobussen, die Ursache dafür ist.

In der letzten Zeile beider Tabellen lassen sich noch einmal etwa 6 % Mehrkosten ausmachen. Diese Mehrkosten betreffen wieder die Frage der Schichtformen.

Während unserer Forschungsarbeit hat sich die Anmietungspraxis beim Telebus gewandelt. Es werden mehr sogenannte E-Busse disponiert, die nicht für eine volle Schicht, sondern nur für die Einsatzdauer inklusive Depotfahrten bezahlt werden. In der Abrechnungstabelle der

BZA-Kosten haben wir die E-Busse gesondert aufgeführt. Zu Beginn unserer Arbeit gab es eigentlich nur Donnerstags und an Tagen mit einem erhöhten Fahrtwunschaufkommen E-Busse. Diese wurden als eine Notlösung aufgefaßt. Nicht zuletzt durch unser Anraten wird mittlerweile bewußter das Mittel E-Busse eingesetzt: Man hat aus der Not eine Tugend gemacht.

Gerade diese letzten beiden Tabellen, die die Kostendifferenz zwischen Tourenplänen und B-Plots aufdecken und sie auf verschiedene Strategien der Fahrzeugeinsatzplanung zurückführen, unterstreichen: Unser Ansatz hat sich gelohnt. Es ist besser, die Disposition vom Kunden, also von den Fahrtwünschen aus, anzugehen, als wie bisher die angemieteten Fahrzeuge als feste Vorgabe zu nehmen.

10 Die Unternehmensberatung

Wir haben den Betriebsablauf in der Telebus-Zentrale analysiert. Durch viele Gespräche mit den dortigen Mitarbeitern und durch unvoreingenommenes Nachdenken über die Aufgaben des Telebus-Fahrdienstes, waren wir in der Lage dem überkommenen Betriebsablauf einen neuen, vereinfachten Ablauf gegenüberzustellen (Kapitel 1). Dieser neue Ablauf kann unserer Meinung nach bis Anfang 1995 Wirklichkeit werden. Es handelt sich aber nicht nur um eine organisatorische Umstrukturierung und ein verändertes Arbeiten in der Telebus-Zentrale. Die Modellrechnungen und statistischen Auswertungen, die wir mit Hilfe des Dispositionsprogramms vorgenommen haben, zeigten uns, daß die hauptsächlichen Veränderungen beim Telebus-Service im *Fahrdienst* stattfinden müssen. Jedes Prozent Einsparung entfaltet hier eine ungemein größere Wirkung, weil der Etat des Fahrdienstes 30 Millionen DM beträgt, während die Zentrale nur ein Zehntel dessen kostet.

Wir wollen nun Maßnahmen vorschlagen und begründen, die beim Telebus-Betrieb sowohl zu Einsparungen als auch zu Serviceverbesserungen führen werden. Wir ordnen diese Maßnahmen in einen Zeitplan von März 1993 bis Ende 1994 ein.

Zu jedem unserer Vorschläge haben wir jeweils mit Hilfe des Dispositionsalgorithmus' Modellrechnungen am Beispiel der ersten Februarwoche 1993 durchgeführt. Die diesen Ergebnissen zugrundeliegenden Parametereinstellungen wurden in intensiver Diskussion mit dem BZA Ende Januar/Anfang Februar ermittelt.

Unsere Unternehmensberatung beruht auf den Grundannahmen:

- Jede wegfallende Stelle spart etwa 52.000 DM pro Jahr ein.
- Neugeschaffene Stellen mit höherer Qualifikation kosten je 80.000 DM pro Jahr.
- Für die Stundensätze der Busse und die Taxipreise wird mit den momentanen Preisen gerechnet. Durch härtere Verhandlungen (und den Vergleich mit in anderen Städten gezahlten Preisen, z.B. Wien (s. Anhang A)) sollten auch hier Preissenkungen möglich sein.

Alle anderen Kalkulationsannahmen werden im Text jeweils erwähnt.

Zusammenfassung

- Das hier vorgestellte Konzept erreicht eine Kostensenkung in der Telebus-Zentrale um insgesamt 700.000 DM pro Jahr. Das ist in diesem Bereich eine Reduktion der Verwaltungskosten um rund 23 %.

- Im Fahrdienst sind bei Befolgung unserer Vorschläge Einsparungen von mindestens 5 Millionen DM pro Jahr möglich, also eine Kostenreduktion von fast 30 %.
- Dabei wird gleichzeitig der Service für die Behinderten deutlich verbessert.
- Erstmals wird eine Kosten- und Qualitätskontrolle des Telebus-Fahrdienstes möglich.

Senkung der Verwaltungskosten

Viele der bisherigen Tätigkeiten in der Telebus-Zentrale lassen sich durch den Einsatz von EDV und eine Umorganisation der Betriebsstruktur vereinfachen. Die verbleibenden Tätigkeiten sind angenehmer und qualifizierter.

Kurzfristig lassen sich in der Telebus-Zentrale durch die Abgabe der Teletaxen-Disposition Personalkosten in Höhe von 156.000 DM jährlich einsparen. Der (bereits geplante) Umzug der Geschäftsstelle spart weitere 80.000 DM jährlich. Der Umzug kann genutzt werden, um eine neue Betriebsstruktur vorzubereiten.

Bis zum Winter 93/94 lassen sich durch die Einführung der rechnergestützten Disposition und die Vereinfachung des Taxi-Mischsystems weitere 242.000 DM jährlich an Personalkosten sparen. Rationalisierungen in Höhe von 362.000 DM Jahreskosten stehen zusätzliche Personalkosten durch Neueinstellungen im Umfang von 120.000 DM jährlich gegenüber .

Bis zum Winter 94/95 kann die neue Betriebsstruktur verwirklicht werden: Durch die Integration von Fahrtwunschannahme, Disposition und Abrechnung im Rahmen einer Neuordnung des EDV-Einsatzes und durch die Verbesserung der Fahrtwunschannahme werden weitere 208.000 DM an jährlichen Personalkosten eingespart.

Stellenplan der Telebus-Zentrale

Bereich	Anfang 1993	Sommer 1993	Ende 1993	Ende 1994
Geschäftsführung	3	3	4,5	4,5
Abrechnung	5	5	3	1,5
Fahrbetrieb FW-Annahme	11	11	20,5	18
Disposition				
Leitzentrale	19	16		
Gesamt	38	35	28	24

Kosteneinsparung im Fahrdienst

Kurzfristig lassen sich im Fahrbetrieb jährlich 730.000 DM Beifahrerkosten sparen durch eine Verringerung der Anzahl der angemieteten Doppelbusse (2 Fahrer) bei gleichzeitiger vermehrter Anmietung von Solobussen (1 Fahrer).

Durch eine flexiblere Busanmietung und die Einführung der rechnergestützten Disposition lassen sich bis zum Winter 93/94 weitere 1,8 Millionen DM einsparen. Wir rechnen damit, daß zusätzlich 20 – 30 % der verbleibenden Fahrdienstkosten durch den Einsatz mathematischer Optimierungsmethoden eingespart werden können, die zur Zeit am ZIB entwickelt werden. Das bedeutet dann eine weitere Kostenreduktion in Millionenhöhe.

Bis zum Winter 94/95 kann der Fahrdienst noch einmal um 2,5 Millionen DM jährlich verbilligt werden durch den vermehrten Einsatz von Zivildienstleistenden bei den karitativen Fahrbetrieben Lazarus-Werk, Johanniter-Unfallhilfe, Arbeiterwohlfahrt und Rotes Kreuz. Hierzu sind allerdings politische Entscheidungen erforderlich.

Serviceverbesserung für die Behinderten

Unser Konzept sieht für die Kunden nur Serviceverbesserungen vor. Diese beruhen auf dem Grundsatz, daß die Kundenwünsche unverändert erfüllt werden sollen. Nach unserer Vorstellung sind die pünktlich disponierten Fahrtwünsche die Vorgabe für die Busanmietung und nicht, wie bisher, die Busanmietung die Vorgabe für die Disposition. Daß eine solche Flexibilisierung der Busanmietung am Markt durchsetzbar ist, zeigt das Beispiel der Stadt Wien (s. Anhang A).

Die Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit des Fahrdienstes soll erheblich verbessert werden. Die Bereitschaftszeit soll statt einer Stunde etwa 10 Minuten betragen.

Die Fahrtwunschannahme soll für die Behinderten vereinfacht und für das Personal angenehmer werden. Es soll ein Telefonservice für die Behinderten sein, der Buchungen bis zum Vorabend erlaubt. Die Möglichkeit von Spontanbuchungen am Tag selber wird ausgeweitet.

Das Taxi-Mischsystem soll die Vorteile des Couponsystems mit den Vorteilen der Einzelabrechnung verbinden, so daß es für alle Beteiligten einfacher wird und trotzdem vor Mißbrauch weitgehend geschützt ist.

Controlling

Unsere Vorschläge bringen die Abrechnung mit dem Fahrdienst in Einklang.

Die Disponenten erhalten mit der rechnergestützten Disposition ein Werkzeug auch zur Leistungs- und Qualitätskontrolle an die Hand. Die Geschäftsführung erhält die Daten, um den Fahrbetrieb stets an den aktuellen Bedarf anzupassen. Der Senat erhält das Detailwissen, um politische Vorgaben an den Telebus geben zu können.

10.1 Kurzfristig verwirklichtbar (Sofortmaßnahmen)

Einsparungsmöglichkeit: 966.000 DM

- Personalkostenreduzierung in der Zentrale (3 Stellen): 156.000 DM jährlich.
- Einsparung von Busanmietungskosten: 730.000 DM jährlich.
- Einsparung an Mietkosten 80.000 DM jährlich.

Rahmenbedingungen

- Nicht mehr als durchschnittlich 1.000 Fahrtwünsche werden erfüllt (wie bisher). Die Disposition erfolgt weiterhin per Hand.

Maßnahmen

10.1.1 Taxidisposition auslagern

Vorschlag. Die Disposition der nach der Busdisposition noch verbliebenen (nicht in Telebussen untergebrachten) taxifähigen Fahrtwünsche, die bisher auf fest angemietete Teletaxen disponiert wurden, entfällt. Stattdessen werden diese Fahrtwünsche am Ende der Busdisposition an eine oder mehrere Taxizentralen gefaxt.

Der Grund für diese Veränderung ist, daß die Taxidisposition sich grundsätzlich von der Busdisposition unterscheidet. Es müssen keine Schichten gefüllt werden, sondern die Taxen fahren jede Fahrt einzeln. Durch die große Anzahl von Taxen in Berlin und die flächenmäßige Verteilung der Standorte ist eine größere Flexibilität der Auftragsausführung möglich.

Es muß vereinbart werden, daß die Taxiunternehmen die Durchführung der Fahrten garantieren und daß die Taxifahrer bereit sind, die Behinderten, wenn nötig, aus der Wohnung abzuholen und bis zum gewünschten Ziel zu bringen. Die Verträge mit den Taxizentralen oder -unternehmen müssen den Umfang und den Preis der Servicedienste festlegen.

Wir schlagen vor, das Fahren und die geleisteten Servicedienste abrechnungstechnisch voneinander zu trennen. Fahrleistungen sollen nach Taxameter bezahlt werden, Service könnte sich z.B. nach dem Tarif für das reine Warten eines Taxis richten (derzeit 0.50 DM / Minute). Dieses Geld sollte ganz dem Fahrer zustehen; er weist auf der Quittung Taxameter-Wert und Servicezeit getrennt aus. Das ist auch ein Vorteil für die spätere Kontrolle der Abrechnungen. Es muß darauf geachtet werden, daß die beteiligten Taxiunternehmen auf die Vorbestellgebühr von zur Zeit 1 DM verzichten. Im Gegenzug bekommen sie immerhin eine ziemlich feste Anzahl von täglichen Fahrten garantiert.

Vorteile

- Der Arbeitsgang Taxidisposition entfällt.
- Der Funk wird erheblich entlastet, da er sich nur noch um die Telebusse kümmern muß.

Probleme

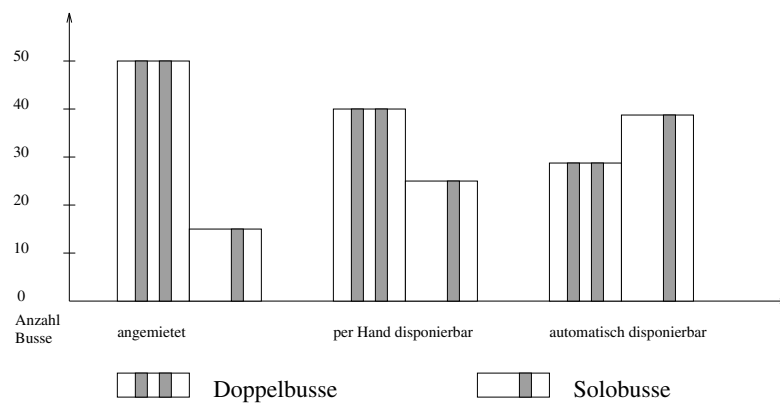
- Die Zahl der ständigen Fahrer wird eventuell unüberschaubar. Ein Kontakt existiert nur noch über die Taxi-Funkzentrale.
- Die angestammten Teletaxifahrer verlieren ihre Kalkulationsgrundlage, während der Telebus-Service gute Fahrer verliert, falls wirklich alle Fahrtwünsche an die Funkzentralen gehen.

Alternative. Mittel- und langfristig könnte auch eine nur teilweise Verlagerung der Disposition auf die Taxizentralen eine Lösung sein. Denn mit dem Einsatz der rechnergestützten Disposition werden auch für Taxenbestellungen Dispositionen erzeugt, die teilweise so gute Tagestouren darstellen, daß sie direkt so von je einem Taxifahrer gefahren werden können. Dadurch könnten einzelne Fahrer, mit denen man gerne zusammenarbeitet, gehalten oder wieder unter Vertrag genommen werden. Nur die Fahrtwünsche, für die die Rechner-Disposition keine guten Touren mehr erzeugt hatte, werden undisponiert an die Taxizentralen gegeben.

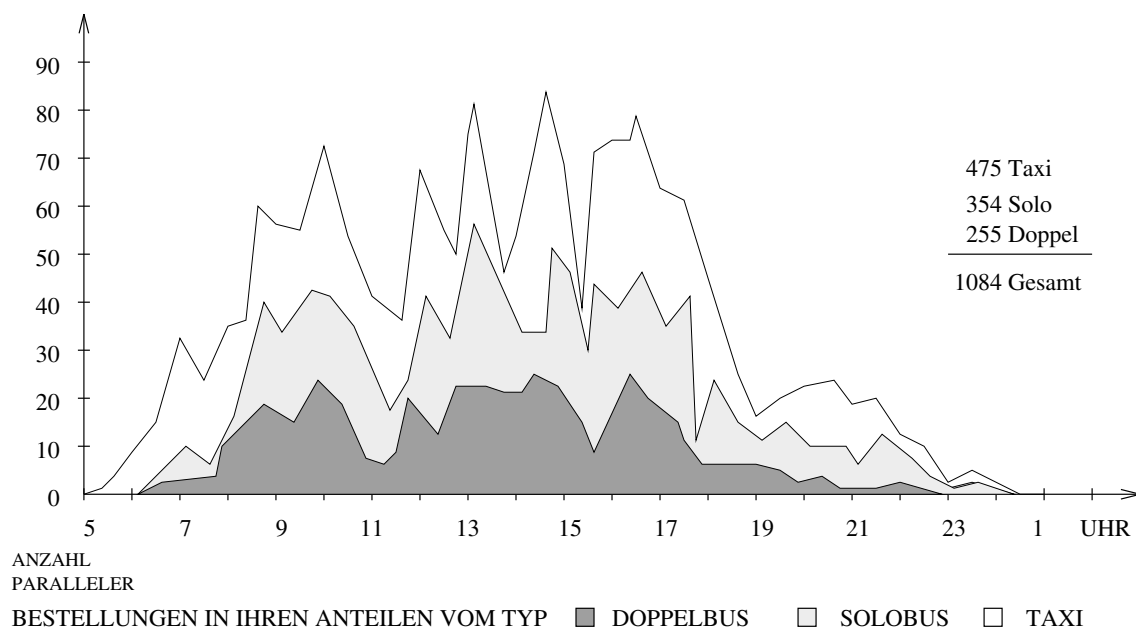
10.1.2 Busanmietung verändern

Vorschlag. Wir schlagen vor, bis zu 10 fest angemietete doppelt besetzte Busse zu Solobussen umzuwandeln.

Warum gerade 10 Busse? Die Fahrtwünsche teilen sich derzeit in durchschnittlich 40 % Bestellungen mit Treppenhilfe und 60 % ohne Treppenhilfe auf. Durch Einbindungen und das Zusammenfassen größerer Gruppen steigt der Anteil der Fahrten, die zwei Fahrer benötigen auf etwa 50%. Um eine schöne Tour mit Anschlüssen und ohne Löcher zu disponieren, müssen in jeder Doppelbus-Tour mehrere Fahrtwünsche gefahren werden, die auch einen Solobus nehmen könnten oder gar ein Taxi. So braucht man, zumindest beim Disponieren per Hand, weiterhin eine Mehrheit von Doppelbussen. 10 Doppelbusse weniger ist unserer Ansicht nach in dieser Phase das für die mit der Hand arbeitenden Disponenten verkraftbare Einsparungsmaß.



Donnerstag, 4.2.1993. Der Vergleich der Busanmietungszahlen mit dem Bedarf, der sich aus einer Disposition per Hand oder mit dem Computer ergibt.



Donnerstag, 4.2.1993. Die Fahrtwunschverteilung in den Anteilen Busbestellungen mit bzw. ohne Treppenhilfe und Teletaxibestellungen.

Vorteil. Ein Solobus ist pro Stunde etwa 20 DM billiger als ein Doppelbus. Tägliche Einsparung bei 10 Bussen à 10 Stunden: $100 \times 20 \text{ DM} = 2.000 \text{ DM}$. Das sind im Jahr 730.000 DM.

Problem. Die Arbeit der Disponenten wird erschwert, weil die Busauswahl für die Bestellungen mit Treppenhilfe eingeschränkt wird.

10.1.3 Verbesserungen in der Telebus-Zentrale

Der geplante Umzug spart ungefähr 80.000 DM im Jahr an Mietkosten. Die Verlegung der Zentrale sollte dazu genutzt werden, den Funk technisch zu verbessern (mehr Reichweite, bessere Frequenz?) und eine zuverlässige, simple und robuste Telefonanlage zu installieren, die nicht durch die Überzahl an Funktionen das Personal überfordert. Die Siemens-Highcom-Anlage, die alle diese Qualitäten (nach Auskunft der Benutzer) *nicht* hat, sollte an den Nachmieter verkauft werden.

Ein umfassendes EDV-Konzept auf der Basis marktgängiger Hard- und Software sollte erarbeitet werden. Parallel dazu muß die laufende Umstellung der EDV im Bereich Fahrtwunschannahme auf einen neueren Rechner spätestens Ende Juli 1993 abgeschlossen sein. Das neuinstallierte Programm für die Fahrtwunschannahme muß den Mitarbeitern die Möglichkeit bieten, neue Abfragen und Felder ohne zusätzliche Programmierung einzubauen. Der digitalisierte Stadtplan der SNV oder eine vergleichbar gute Modellierung ganz Berlins muß ebenfalls bis spätestens Ende Juli 1993 implementiert und dokumentiert vorliegen.

10.2 Mittelfristig verwirklichbar (bis Winter 93/94)

Einsparungsmöglichkeit: 2 Millionen DM

- Weitere Personalkostenreduzierung in der Zentrale (7 Stellen):
362.000 DM jährlich
Neues Personal einstellen: 1,5 Stellen: 120.000 DM jährlich
Einsparung insgesamt: 242.000 DM jährlich.
- Einsparung von etwa 10 % der Buskosten (60 Betriebsstunden pro Tag à 60 DM):
1,3 Millionen DM jährlich.
- Weitere Einsparung an Buskosten: 500.000 DM jährlich.

Rahmenbedingungen und Verbesserungen

- Die aufgrund eines EDV-Konzepts angeschaffte und installierte Hard- und Software wird den Betriebserfordernissen angepaßt.
- Die Busanmietung ist flexibilisiert.
- Die Anzahl der erfüllbaren Fahrtwünsche ist nicht mehr physikalisch begrenzt, sondern nur noch durch die politische Vorgabe.
- Die Vorwegbuchung ist bis zum Vortag möglich.
- Mehr Spontanbuchungen am Tag selbst sind möglich.
- Die Busse werden pünktlicher disponiert.

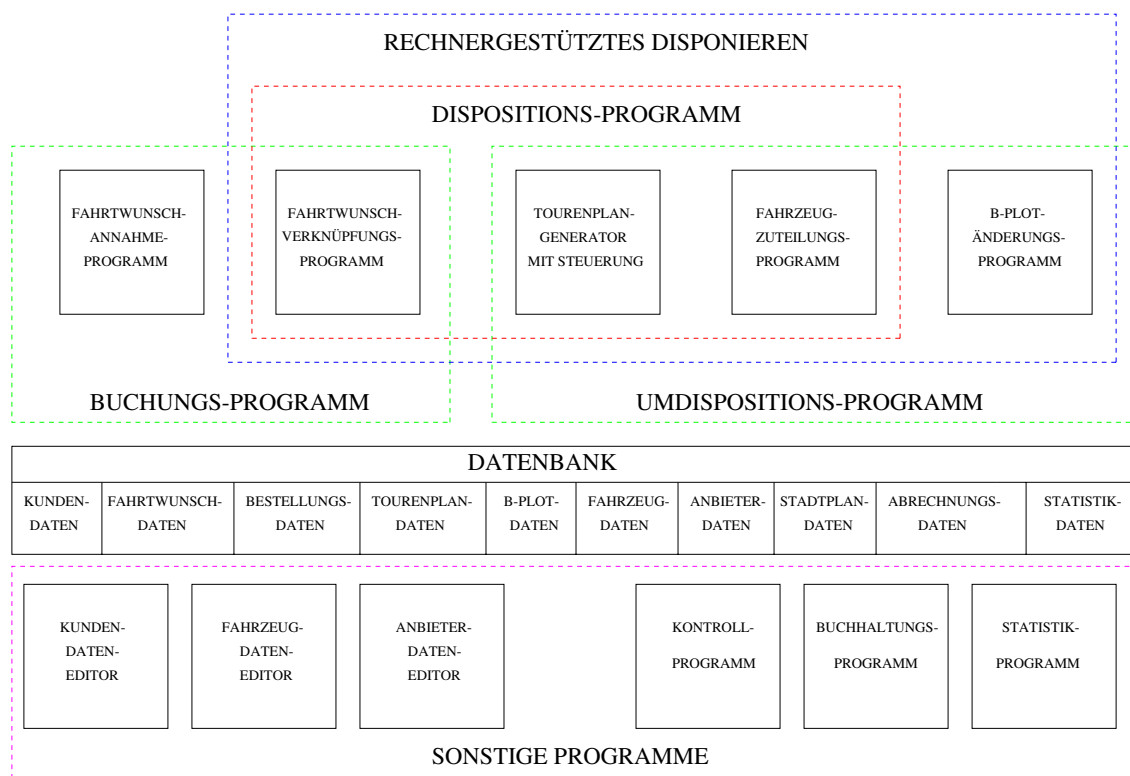
Maßnahmen

10.2.1 EDV-Einsatz in der Zentrale vereinheitlichen

Vorschlag. Um alle Vorteile einer rechnergestützten Disposition nutzen zu können, nämlich die Verbindung der bisher getrennten Arbeitsabläufe Fahrtwunschannahme, Disposition und Abrechnung, ist es zunächst notwendig, die technischen und personellen Voraussetzungen dafür zu schaffen. Aufgrund eines EDV-Konzeptes wird marktgängige Hard- und Software beschafft. Die Kosten dafür liegen im Bereich von etwa 80.000 – 150.000 DM. Die Hard- und Software wird installiert und bis zum Winter 1994/1995 schrittweise den Erfordernissen des Telebus-Betriebes angepaßt (siehe auch Kapitel 10.3).

10.2.2 Rechnergestützt disponieren

Vorschlag. Am Ende dieser Phase ist ein Dispositionsprogramm vorhanden, das eine oder mehrere Dispositionen aus den eingegangenen Fahrtwünschen berechnet. Es können Parameter eingestellt werden für die geforderte Pünktlichkeit und Zumutbarkeit einer Fahrt, für die Fülle der Busse und der Touren, für die Schichtlänge, die Ein-, Ausstiegs- und Fahrzeiten, sowie für die Preise der einzelnen Fahrzeuge. Der Disponent oder die Disponentin muß sich für einen Plan entscheiden, muß den Plan kontrollieren und ihn gegebenenfalls verändern (am Rechner). Heraus kommt am Ende ein Busblatt für jeden disponierten Bus, der an den jeweiligen Fahrbetrieb gefaxt wird, sowie ein großer B-Plot zum Aufhängen im Funkraum.



Vorteile

- Die wirklich lästigen Routinearbeiten der Disposition fallen weg (Karten reißen, sortieren, B-Plot kleben, Karten legen, 1.000 Telefaxe,...), während die Dispositionsarbeit selber aufgewertet wird.

- Eine Disposition kann jetzt in Sekunden gemacht werden. Trotzdem kann der Mensch noch in den Prozeß der Disposition eingreifen durch Vorgaben an den Computer und Korrekturen am Ergebnis.
- Es werden etwa 10% der heute benötigten Fahrzeuge eingespart werden, sowie Personal.

10.2.3 Busanmietung flexibilisieren

Vorschlag. Da sich die rechnergestützte Disposition nach den Fahrtwünschen richten soll und nicht nach den Vorgaben der Busanmietung, müssen die zugesagten Busstunden flexibel einsetzbar sein.

Ein mögliches Modell ist:

- Durch jährliche öffentliche Ausschreibungen wird der Kreis der Anbieter erweitert. Die Ausschreibungsbedingungen legen die gewünschten Anforderungen fest. Kriterien für die Auswahl von Fahrbetrieben sind die Preise, die Erfahrung, Zusagen über die Qualität von Servicediensten, die Lage der Depots, die Flexibilität bei der Auswahl von Fahrzeugtypen und der Umfang an Flexibilitätsszusagen bezüglich der Fahreranzahl, der Schichtformen (z.B. geteilte Dienste) und Einsatzzeiten (Stundenanzahl, Anfangszeiten).
- Es wird den Fahrbetrieben monatlich eine feste Anzahl von Betriebsstunden garantiert (Sockel). Der Rest der benötigten Busse wird kurzfristig (wie bisher die E-Busse), am besten am Vortag, angemietet.
- Der Fahrzeugtyp, der die Größe und Kapazität des Busses festlegt, und die benötigte Besatzung (1 oder 2 Fahrer) werden möglichst kurzfristig fixiert. Es wäre gut, wenn in jedem Depot eine Auswahl an verschiedenartigen Fahrzeugen zur Verfügung stünde.
- Die Einsatzzeiten der Busse des Sockels werden (um z.B. ± 2 Stunden) verschiebbar in ein Raster gelegt, z.B. wird man einen Bus für 10 Stunden zwischen 8 und 20 Uhr reservieren (also für 12 Stunden) und erst kurzfristig dem Fahrbetrieb die genaue zehnstündige Einsatzzeit (z.B. 9 – 19 Uhr) mitteilen.
- Es werden mehr Busse als bisher für kürzere bzw. geteilte Schichten angemietet, z.B. 4 und 4 Stunden oder 5 und 3 Stunden, insbesondere am Wochenende.
- Die Depotverteilung sollte der örtlichen Verteilung der Fahrtwünsche entsprechen. Dies könnte man fördern, indem die Schicht genau vom Beginn des ersten Fahrtwunsches bis zum Ende des letzten Fahrtwunsches in der Tour gerechnet wird und

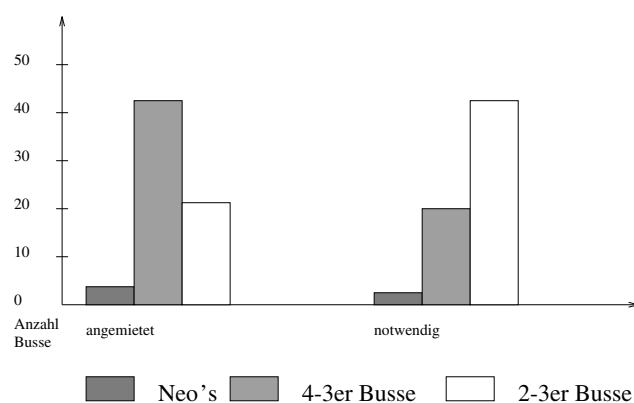
die An- und Abfahrt vom/zum Depot nicht oder nur pauschal vergolten wird, wie ja auch bei Handwerkern üblich. Das käme der von den Fahrtwünschen ausgehenden Disposition sehr entgegen, da sie sich dann um die Frage der Depotanbindung nicht mehr zu kümmern bräuchte.

- Daß eine flexible Anmietung von Bussen möglich ist, wenn man nur entsprechend verhandelt, zeigt das Beispiel der Stadt Wien (s. Anhang A).
- Dadurch, daß die rechnergestützte Disposition von den Fahrtwünschen ausgehend disponiert, werden Busse nach dem tatsächlichen Bedarf angefordert. Die Erkenntnisse über diesen tatsächlichen Bedarf müssen wieder in die Busanmietung zurückfließen; die vereinbarten Rahmenbedingungen für die Busanmietung müssen deshalb nicht nur ein flexibles Anmieten erlauben, sondern auch für kurzfristige Veränderungen offen sein.

Beispiele sind:

- Veränderung der Doppelbus/Solobus-Relation (bereits im kurzfristigen Plan enthalten).
- Veränderung der Relation 4–3er Busse (4 Rollstuhlplätze, 3 Sitzplätze) zu 2–3er Bussen. Hier schlagen wir eine Umschichtung von 15 4–3er Bussen auf 2–3er Busse vor, da gar nicht so viele größere Gruppen gleichzeitig im Bus sitzen wie große Busse vorhanden sind. Die Diskrepanz Anmietung $\leftrightarrow$ realer Bedarf ist zur Zeit ebenso kraß wie bei den Doppel- und Solobussen. Ein 2–3er Bus ist mindestens 9 DM pro Stunde billiger als ein 4–3er Bus.

Einsparungspotential: 500.000 DM.



Donnerstag, 28.1.1993. Der Vergleich der Busanmietungszahlen mit dem Bedarf, der sich aus einer von den Fahrtwünschen ausgehenden Computerdisposition ergibt.

Probleme

- Die rechnergestützte Disposition sieht auf den ersten Blick für menschliche Augen „zufälliger“ aus, da der Rechner keine Gewohnheiten kennt. Bewußte menschliche Gegenentscheidungen sind aber weiterhin möglich.
- Da kein Disponent den Plan selber entworfen hat und der B-Plot nicht mehr aufgrund von Disponentengewohnheiten jeden Tag ähnlich aussieht, muß der Funk sich an jedem Tag zunächst in den aktuellen B-Plot einarbeiten.
- Auf Fahrgewohnheiten wird keine Rücksicht genommen.
- Zum rechnergestützten Disponieren benötigt man entsprechend qualifiziertes Personal.
- Das Programm ist nur so gut wie die Datenbasis, auf der es beruht und die es benutzt. Die Fahrtwunsch- und Berechtigendaten müssen korrekt eingegeben und auf dem neuesten Stand gehalten werden.

Lösung. Wir schlagen die Schaffung von 1,5 Stellen vor: Die Stelle eines EDV-Betreuers für die Wartung und Weiterentwicklung von Hard- und Software, und eine halbe Stelle für die Datenpflege und als Ersatz für den EDV-Betreuer bei Krankheit oder Urlaub. Diese beiden Stellen sollen öffentlich ausgeschrieben werden. Ferner muß das Personal der Fahrtwunschannahme und in der Steuerzentrale bei der Einführung der rechnergestützten Disposition entsprechend geschult werden.

10.2.4 Taxi-Mischsystem verbessern

Vorschlag. Um die Abrechnung des Taxi-Mischsystems zu vereinfachen (bisher 3 Stellen), schlagen wir folgendes Verfahren vor:

Jeder Teilnehmer des Taxi-Mischsystems wird einer Taxizentrale seiner Wahl zugeordnet, die ihn nunmehr als Kunde führt und die Einhaltung seines Kontingents überwacht. Bestellt er dort (und nur dort darf er das) ein Taxi, so wird der Auftrag von der Taxizentrale ausgeführt wie ein Teletaxi-Auftrag: Die Fahrtkosten werden vom Taxameter abgelesen und der Telebuszentrale zusammen mit der Teletaxi-Abrechnung in Rechnung gestellt. Der Beleg ist die vom Taxi-Misch-Teilnehmer unterschriebene Quittung. Der Unterschied zur Teletaxi-Abrechnung ist, daß die Servicekosten sofort vom Kunden an den Taxifahrer bezahlt werden und auch nicht über Telebus nachträglich abgerechnet werden können. Die Überlegung ist hier, daß jemand, der diese Kosten nicht tragen will (falls er überhaupt

Service benötigt, was bei Nutzern des Taxi-Mischsystems wohl eher die Ausnahme ist), bis zum Vortag eine Teletaxi-Bestellung bei Telebus aufgeben kann. Der besondere Service der kostenlosen spontanen Fahrt soll auf die reine Fahrt beschränkt sein.

Vorteile

- Die Abrechnung mit 3.000 – 4.000 Nutzern pro Monat wird ersetzt durch die Abrechnung mit vielleicht 10 Taxizentralen. Einsparung: 2 Stellen in der Taxi-Mischsystem-Abrechnung.
- Die Nutzer des Taxi-Mischsystems müssen die Fahrtkosten nicht mehr vorstrecken.
- Durch die Klarstellung, daß dieses System ein reiner Fahrdienst wie normales Taxifahren ist, wird der Unterschied der beiden Systeme betont.
- Wenn über die Telebus-Zentrale nur noch die reine Fahrt abgerechnet werden kann, lassen sich die Rechnungen der Taxizentralen überprüfen (Fahrtkilometer $\times$ Kilometerpreis).

Probleme

- Die Taxizentrale muß sich bereit erklären, die Taxi-Misch-Benutzer als Kunden zu führen und deren Kontingent zu überwachen. Nur diejenige Taxizentrale, bei der ein Benutzer Kunde ist, darf den geleisteten Auftrag Telebus in Rechnung stellen.
- Die Taxifahrer erhalten durch die Quittung nur eine Art Scheck anstelle von Bargeld. Deren Kasse wird aber täglich abgerechnet. Entweder erklären sich die Fahrer zur monatlichen Begleichung ihrer Quittungen durch die Taxizentrale bereit oder die Last wird auf die Taxizentrale abgeschoben oder Telebus gewährt einen Vorschuß zur Liquiditätssicherung.
- Wie bisher auch, gibt es Möglichkeiten des Betrugs, statt durch die Behinderten jetzt durch die Taxifahrer oder -zentralen.

10.2.5 „Taxibusse“ als Puffer für Spontanbuchungen und Umdispositionen

Vorschlag. Ca. 5 Busse täglich werden nur mit taxifähigen Fahrtwünschen gefüllt, die zunächst nicht an die Taxizentralen gegeben werden („Taxibusse“). Gibt es Spontanbuchungen am Tag der Fahrt (nur Busbestellungen!), die nicht mehr in einen der laufenden

Busse hineinpassen, oder gibt es Umdispositionen von Busbestellungen wegen Ausfällen oder Störungen, so werden einfach aus den Taxibussen entsprechend viele Fahrtwünsche herausgenommen und an die Taxizentrale zum Ausrufen gegeben. Die Bus-Fahrtwünsche werden in die nun entstandenen Lücken der Taxibusse gepackt (Umdisposition per Funk). Man kann an einen festen Rhythmus denken, etwa: alle 2 Stunden wird alles, was sich an notwendigen Umdispositionen angesammelt hat, an die Telebusse und Taxizentralen herausgegeben.

Statt daß man sich also eine Reserve von nicht eingesetzten Bussen hält oder so viel „Luft“ im disponierten Plan läßt, daß alle Eventualitäten aufgefangen werden können, befindet sich die ganze „Luft“ des Tourenplans jetzt in diesen 5 Bussen. Da sie voll gefüllt sind mit Bestellungen, ergibt sich pro Taxibus nur 200 DM Unterschied zum Teletaxi, mit dem diese Fahrtwünsche sonst gefahren worden wären.

Vorteile

- Mehr Spontanbuchungen sind möglich.
- Der Busplan kann kompakter gefahren werden. Damit werden wieder Busse eingespart. Die 5 zusätzlichen Taxibusse kosten so viel wie 2 eingesparte Solobusse.
- Die 5 Taxibusse sind ein schon jetzt vorhandenes „Abfallprodukt“ der rechnergestützten Disposition.

Problem

- In der Leitzentrale entsteht mehr Arbeit durch vermehrte Spontanbuchungen und Funkkontakte.

10.3 Langfristig verwirklichtbar (bis Winter 1994/95)

Einsparungsmöglichkeit: 2,7 Millionen DM

- Personalkostenreduzierung in der Zentrale (4 Stellen): 208.000 DM jährlich.
- Einsparung von Kosten beim Fahrpersonal: 2,5 Millionen DM jährlich.

Verbesserungen

- Verbesserte Fahrtwunschannahme.
- Vereinfachte Abrechnung.

Maßnahmen

10.3.1 Fahrtwunschannahme verbessern

Vorschlag 1. Wir schlagen vor, das EDV-Programm der Fahrtwunschannahme zu verbessern, so daß die Zeit, die benötigt wird, um einen Fahrtwunsch anzunehmen, sich erheblich verkürzt. Die Idee ist, die Fahrtziele des letzten Monats jedes Kunden zu speichern, um sie sofort bei Aufruf des Berechtigten auf dem Bildschirm parat zu haben. Will der Kunde wieder eine dieser Fahrten buchen, so wird einfach diejenige letzte Fahrt auf dem Bildschirm ausgewählt, die dem heutigen Fahrtwunsch gleicht. Diese „Fahrt vom letzten Mal“ erscheint dann vollständig auf dem Bildschirm, und nur noch die Änderungen brauchen eingetragen zu werden (z.B. andere Abholzeit, anderer Rollstuhl).

Vorteile

- 85 % aller Nutzer fahren regelmäßig mit dem Telebus. Wenn wir annehmen, daß sie meistens zu einer überschaubaren Menge von Orten fahren, kann durch dieses vereinfachte Buchungsverfahren die Annahmezeit der meisten Fahrtwünsche auf unter 1 Minute verkürzt werden. Das spart Personal. Bei 1.600 Fahrtwünschen täglich würde eine reduzierte durchschnittliche Annahmezeit von einer Minute 4 Telefon-Arbeitsplätze erfordern statt 8 Arbeitsplätze bei zwei Minuten wie bisher.
- Die Arbeit wird leichter, da der Computer schon mehr Daten vorgibt, die nicht mehr eingetippt werden müssen.

- Es ist mehr persönliche Kommunikation mit den Kunden möglich, da man jetzt häufig über schon gefahrene Fahrten redet statt nur ohne Vorinformation über die neue Fahrt.

Vorschlag 2. Die Daten, die bei der Aufnahme eines Fahrtwunsches erhoben werden, sollten sich mehr an den Kundenwünschen und an den für die Disposition erforderlichen Informationen orientieren. Wir schlagen deshalb vor, im Rahmen der EDV-Neuordnung die Datenaufnahme wie folgt zu verändern:

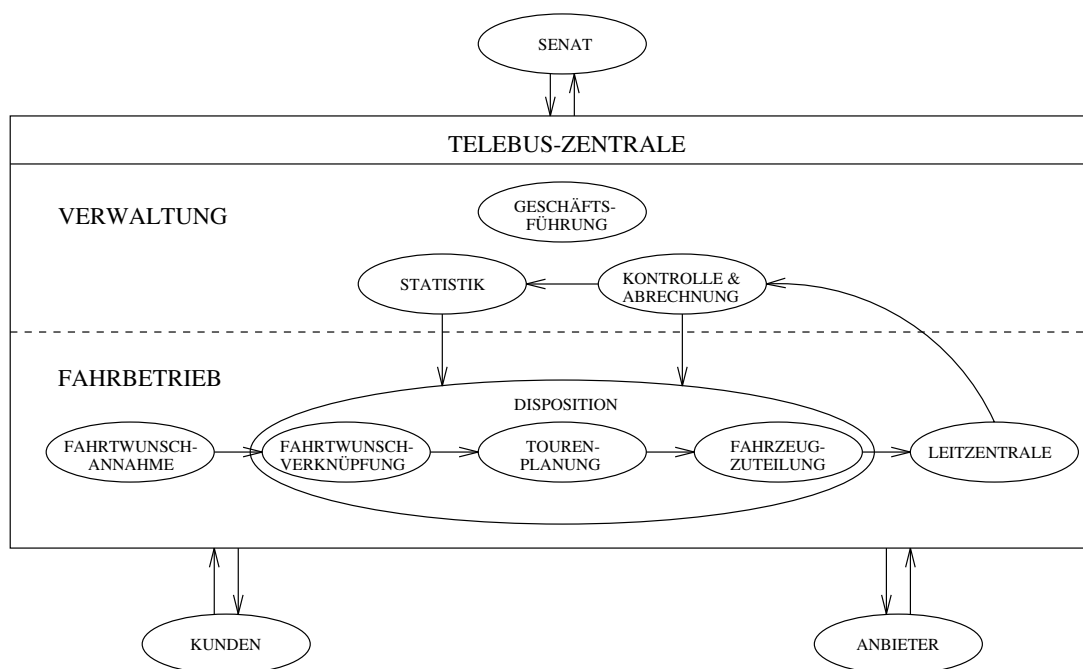
- Es wird die gewünschte Abholzeit oder Ankunftszeit im 10-Minuten-Raster entgegengenommen.
- Am Telefon wird über die Wunschzeit mit dem Kunden nicht verhandelt.
- Ist die *Ankunftszeit* die Wunschzeit, wird eine Abholzeit dem Kunden sofort mitgeteilt. Diese Abholzeit wird auf der Basis eines gut modellierten, digitalen Stadtplans unter Berücksichtigung der telebusspezifischen Parameter automatisch berechnet.
- Der Telebus-Service sichert zu, daß das Fahrzeug höchstens ± 5 Minuten verspätet oder zu früh vor Ort ist.
- Gibt es zu einem späteren Zeitpunkt Veränderungen der zugesagten Abholzeiten, wird der Kunde angerufen.
- Aus den Angaben des Kunden wird die voraussichtliche Ein- und Ausstiegszeit geschätzt (falls der Kunde die beiden Zeiten nicht selbst angeben kann) und bis auf 5 Minuten genau eingetragen. Diese Zeiten sind es, die die Disposition braucht, um nicht auf vage Informationen wie „Treppenhilfe nötig“ oder Stockwerksangaben angewiesen zu sein.
- Alle für die Disposition und für eine korrekte Abrechnung wichtigen Daten sollen standardisiert werden. In der textuellen Infozeile werden nur Vermerke für den Fahrer und den Funk festgehalten.
- Sollte durch politische Vorgaben das Kontingent der Telebusse beschränkt werden, kann durch eine schnelle Simultandisposition sofort entschieden werden, ob noch Platz ist oder nicht.

Vorteile

- Der Service für die Behinderten verbessert sich, da mehr auf die individuellen Wünsche eingegangen wird.
- Die Qualität der aufgenommenen Informationen ist nicht mehr abhängig von der Person, die den Fahrtwunsch entgegennimmt, weil alle wichtigen Daten im Bildschirmformular enthalten sind.
- Durch die Eingabe von Ein- und Ausstiegszeiten ist eine genauere Disposition möglich. Da der Computer die Kunden nicht persönlich kennt, kann er andernfalls nur mit Durchschnittszeiten arbeiten und ist damit im Nachteil gegenüber den menschlichen Disponenten.

10.3.2 Neue Fahrbetrieb-Abteilung bilden

Vorschlag. Wir schlagen vor, die Trennung von Fahrtwunschannahme und Leitzentrale aufzuweichen und eine neue „Fahrbetrieb-Abteilung“ zu schaffen.



Ein Teil des Personals der Leitzentrale (Dispo, Umdisposition, Funk) wird zeitweise auch mit der Fahrtwunschannahme betraut. Dafür bleiben die drei Schichten mit je 4 Personen besetzt, von denen, je nach Uhrzeit, Krankenstand und Anrufaufkommen, bis zu 2

in der Fahrtwunschannahme arbeiten. Nach unseren Vorstellungen existieren am Ende dieser Phase 18 Stellen in der neuen Fahrbetrieb-Abteilung: Eine Abteilungsleiter-Stelle, 12 Stellen in den 3 Schichten und 5 Stellen nur am Telefon und bei der Gruppen- und Dauerfahrtenbuchung. Hier bieten sich auch Teilzeitstellen an, z.B. 3 ganze und 4 halbe Stellen.

Vorteile

- Die Disponentenschicht darf nicht zu sehr ausgedünnt werden, da die Disposition und die Fahrdienstbetreuung das Herz des Telebus-Betriebs darstellen. Hier muß auch bei Ausfällen alles noch funktionieren. Diese Arbeiten können nicht von Aushilfskräften gemacht werden.
- Die Qualität der Disposition hängt von der Qualität der Daten ab, die die Fahrtwunschannahme aufnimmt. Gleichzeitig müssen die Erkenntnisse aus den Rückmeldungen der Fahrer am Funk in die Disposition zurückfließen. Eine hohe Qualität der Daten ist deshalb am besten erreichbar, wenn es eine möglichst geringe personelle Trennung zwischen der Fahrtwunschannahme und denjenigen gibt, die die Daten nachher benutzen müssen und mit den Ergebnissen am Tag konfrontiert sind.
- Umgekehrt kann die Fahrtwunschannahme die Kunden besser befragen und Daten erfassen, wenn sie die Probleme der Disposition kennt.
- Durch das Einspringen der Disponenten-Schicht bei der Fahrtwunschannahme kann auf das zu verschiedenen Zeiten unterschiedlich hohe Anrufaufkommen besser reagiert werden.
- Es ist bei Krankheit von Telefonisten besser, jemanden der besser bezahlten Disponenten auf diese Tätigkeit zu setzen als umgekehrt reine Telefonisten in die Leitzentrale.
- Die Fahrtwunschannahme ist ein Bildschirmarbeitsplatz. Je mehr sie mit anderen Tätigkeiten durchsetzt ist, desto weniger ermüdend ist diese Arbeit, was wiederum der Qualität zugute kommt.

Problem

- Von den Mitarbeitern in der neugeschaffenen Fahrbetrieb-Abteilung werden Motivation und Teamgeist erwartet.

10.3.3 Rechnergestützt umdisponieren

Vorschlag. Spontanbuchungen und Stornierungen am Tag selbst haben eine Umdisposition zur Folge. Diese Umdispositionen kann der Rechner vornehmen, zumindest aber muß dem Rechner die Änderung mitgeteilt werden, um den im Rechner gespeicherten B-Plot auf dem neuesten Stand zu halten. Das ist die Voraussetzung, um die wirklich gefahrenen Fahrten später korrekt abrechnen zu können.

Bei der Umdisposition im Rechner reicht es in den meisten Fällen, Stornierungen einfach als Ausfälle ohne Neudisposition zu verbuchen, während mit spontanen Fahrtwünschen Lücken im B-Plot gestopft oder die Taxibusse (siehe mittelfristige Planung) gefüllt werden. Bei Umdispositionen, die durch Ausfälle im Fahrdienst nötig werden, stehen die Taxibusse als Ersatz zur Verfügung.

Vorteile

- Alle Daten für die Abrechnung sind in der EDV erfaßt.
- Der Rechner findet eventuell Lücken im B-Plot oder auch neue Einbindungen, die der Mensch so schnell nicht sieht.
- Dem Kunden kann bei einer Spontanbuchung sofort die Abholzeit mitgeteilt werden, ohne daß lange Überprüfungen des B-Plots zum Auffinden einer Lücke notwendig sind.

Problem

- Nicht nur im Rechner sondern auch auf dem im Funkraum aushängenden großen Wand-B-Plot muß die Änderung notiert werden, um auch diesen aktuell zu halten. Diese Arbeit bleibt also bestehen.

10.3.4 Rechnergestützt abrechnen

Vorschlag. Die Abrechnung wird im Rahmen der EDV-Neuordnung mit den Daten der Disposition verknüpft. Die im Rechner zuletzt gespeicherte Disposition sollte auch die wirklich gefahrene sein. So kann durch geeignete Software die Kostenrechnung automatisiert und mit Hilfe vielerlei gespeicherter Daten die Kalkulation vereinfacht werden.

Vorteile

- Personaleinsparung.
- Arbeitserleichterung (Arzt- und Arbeitsfahrten können automatisch aussortiert werden, gefahrene Stunden müssen nicht mehr aus dem B-Plot herausgesucht werden etc.).
- Die Kontrolle der eingehenden Rechnungen nicht nur für die Telebusse sondern auch für die Teletaxen ist jetzt möglich.

10.3.5 Zivildienstleistende als Fahrer bei den karitativen Fahrdiensten

Vorschlag. Wir schlagen vor, daß die karitativen Fahrdienste (AWO, Johanniter, Lazarus, DRK) im Fahrpersonal vermehrt Zivildienstleistende einsetzen bis hin zur vollständigen Übernahme dieses Teils des Fahrdienstes (zur Zeit etwa 40% der Gesamtfahrleistung) durch Zivildienstleistende. Gleichzeitig sollten die karitativen Fahrdienste vorwiegend doppelt besetzte Busse anbieten.

Voraussetzung. Die gesetzlichen Hemmnisse im Land Berlin müssen beseitigt werden. In Berlin ist für die Behindertenbeförderung ein Personenbeförderungsschein notwendig. In vielen (allen?) anderen Bundesländern ist dies für Zivildienstleistende nicht notwendig. Dort werden die Behinderten von jeher durch Zivildienstleistende gefahren.

Vorteile

- Ein Zivildienstleistender kostet pro Monat etwa 500 DM (Auskunft vom Bundesamt für den Zivildienst) und kann dafür ca. 35 Stunden pro Woche fahren. Das sind 140 Betriebsstunden im Monat für 500 DM. 40% der zur Zeit monatlich gefahrenen 19.000 Betriebsstunden sind 7600 Betriebsstunden. Diese kosten, im Doppelbus von zwei Zivildienstleistenden gefahren, 55.000 DM im Monat. Das macht 660.000 DM pro Jahr.

Angenommen, ein Fahrer kostet den Betrieb bisher 20 DM pro Stunde, ein Beifahrer 15 DM pro Stunde. Dann kosten die 7600 Betriebsstunden im Doppelbus 266.000 DM im Monat. Das macht 3,19 Millionen DM pro Jahr.

Die Einsparung beträgt mithin ca. 2,5 Millionen DM jährlich.

- Zivildienstleistende sind hochmotiviert, denn diese Art von Arbeit (Fahrdienste) gehört im Allgemeinen zu den gefragtesten Zivildienststellen.

- Durch die zeitliche Befristung jedes einzelnen Zivi-Arbeitsvertrags kann flexibel auf Änderungen der Nachfrage reagiert werden.

11 Adieu, Dinosaurier oder: Wie rationalisiert man im öffentlichen Dienst?

Am Schluß dieser Arbeit, nach allen Ideen, Konzepten und Programmen, wollen wir uns fragen: Wie läßt sich dieses Konzept verwirklichen? Unsere Idee ist ja, offensiv zu rationalisieren, also mit dem positiven Ziel des besseren *und* billigeren Telebusbetriebs im Sinn. Wie wirken die Mechanismen des Öffentlichen Dienstes dieser Idee entgegen? Um diese Frage zu beleuchten, wollen wir einmal schlaglichtartig auf die drei Methoden schauen, die bisher von den Politikern vorwiegend benutzt werden, um Einsparungen im Haushalt zu erreichen:

Globale Mittelkürzung. Die beliebteste Spar-Methode ist, einer Verwaltung oder einem öffentlichen Unternehmen global den Haushalt zu kürzen. Die Entscheidung, wo diese Mittelkürzung zu Buche schlagen soll, wird von den Politikern auf das öffentliche Unternehmen abgewälzt. Ein aktuelles Beispiel für diese Methode sind die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG). Die BVG soll 1994 250 Millionen DM einsparen. Die Reaktion der BVG darauf folgt exakt dem rituellen Verhalten in einer solchen Situation: Die BVG schlägt vor, das Angebot ihrer Dienstleistungen zu verkleinern. Es sollen U-Bahn-Strecken eingestellt, Straßenbahnlinien stillgelegt und die Abstände der Fahrzeuge auf einer Linie vergrößert werden.¹ Ziel dieser Vorschläge ist es, die öffentliche Meinung gegen die politischen Vorgaben aufzubringen. Die Bürger sollen die Politiker zwingen, der BVG ihren Etat in unveränderter Größe zu gewähren.

Schließung. Die Idee des „Etats“, einer jährlichen festen Geldsumme, die mindestens vollständig ausgegeben werden muß, führt dazu, daß öffentliche Unternehmen nie von sich aus Vorschläge machen, wo sie Mittel einsparen könnten. Die Abschaffung einer öffentlichen Dienstleistung ist die radikale Antwort des Politikers darauf. Das aktuelle Beispiel ist die Schließung des Berliner Schiller-Theaters. Das Angebot dieses Dienstleistungsunternehmens wird dabei naturgemäß vollständig beseitigt. Die Reaktion darauf ist der unmittelbare öffentliche Aufschrei. Jede Verkleinerung der staatlichen Dienste ist eine Bedrohung der Gesellschaft durch „den Staat“. Die Gesellschaft fragt nicht, ob *sie* sich diese Theater noch leisten kann oder will. Der Abwehrmechanismus des „abgewickelten“ Unternehmens funktioniert auch noch im Sterben: Selbst nach der Schließungsverfügung werden keine eigenen Vorschläge präsentiert, die zu Kostensenkungen führten. Die Solidarität der anderen „Unternehmen“ der Branche (hier: die anderen Bühnen Berlins) beschränkt sich auf die Unterstützung dieses Abwehrkampfes. Eigene Mittel werden nicht zur Disposition gestellt.

¹Tagesspiegel vom 29.6.1993

Privatisierung. Es gibt staatliche Unternehmen, die zu teuer arbeiten aber nicht einfach abzuschaffen sind. Diese werden privatisiert. Ein aktuelles Beispiel ist die Post. Wie verringert das privatisierte Unternehmen sein Defizit? Durch Gebührenerhöhungen – die jetzt nur noch marktwirtschaftlich begründet werden müssen und nicht mehr auch sozial –, durch Rationalisierung und durch die Verschlechterung des Angebots. Im Falle der Post durch die Abschaffung von Brief-Dienstleistungen und die Schließung von Postämtern. Immerhin wird in diesen, privatisierten, Betrieben auch intern rationalisiert. Idealerweise merkt der Kunde von einer internen Rationalisierung nichts. Anders bei der Post: Die entscheidende Idee der internen Rationalisierung bei der Post ist die Einführung der neuen Postleitzahlen. Dies hat zur Folge, daß sich die *Kunden* umstellen müssen. Daran erkennt man das – private – Monopol.

Wie werden Kostensenkungen in der Industrie erreicht? Es geht darum, die Produkte – Waren oder Dienstleistungen – zu verkaufen. Dabei soll ein möglichst hoher Gewinn erzielt werden. Sollen die Kosten gesenkt werden, muß man dort sparen, wo sie verursacht werden. Es wird also an den Stellen rationalisiert, die die Herstellung des Produkts verteuern. Die Verbesserung des Produkts und sein möglichst vielfacher Verkauf, sind dabei die Vorgaben. Anders als im öffentlichen Unternehmen wird der Kostendruck nicht allein durch die Verschlechterung des Angebots auf den Kunden abgewälzt.

In der öffentlichen Leistungsverwaltung² scheint es geradezu ein Naturgesetz zu sein, daß Mittelkürzungen Einschränkungen oder Verteuerungen der angebotenen Dienstleistung nach sich ziehen. Um diesem Reflex Alternativen entgegenzustellen, versuchen die verantwortlichen Politiker seit einiger Zeit, private Unternehmensberatungen mit der Überprüfung von öffentlichen Unternehmen zu beauftragen. Bei der BVG hat z.B. die Firma Bossard Consultants ein Einsparungspotential in Höhe von 65,5 Millionen DM ausgemacht, das allein mit sofort verwirklichtbaren Maßnahmen in der BVG-Verwaltung erreicht werden könnte.³ Nach außen hin vermittelt die BVG allerdings den Eindruck, sie hätte alle Einsparungsmöglichkeiten überprüft und sähe keine Möglichkeit, die oben skizzierten Angebotsverschlechterungen abzuwenden.

Eine interessante Frage ist, ob und wie solche Gutachten und Konzepte im öffentlichen Dienst verwirklicht werden. Unser Eindruck ist, daß Unternehmensberatungs-Gutachten für Verwaltungen oder öffentliche Unternehmen tendenziell eher in der Schublade verschwinden oder im Parteienstreit aufgerieben werden als entsprechende Gutachten in der privaten Wirtschaft. Vom Schul-Gutachten in Nordrhein-Westfalen, das Millioneneinsparungen versprach, hat man schon lange nichts mehr gehört. Und auch das Gutachten,

²Leistungsverwaltung soll hier denjenigen Teil der Vollzugsverwaltung meinen, der staatliche *Leistungen* vergibt. Wir wollen darunter auch öffentliche Dienstleistungsunternehmen verstehen (z.B. BVG).

³Quelle: „Signal“, Mitarbeiterzeitung der BVG, Ausgabe Mai 1993.

das für den Telebus-Betrieb angefertigt wurde (RKW[1987]), hat anscheinend nicht zur Kostensenkung dort geführt.

Das kann zwei Gründe haben: Entweder die Unternehmensberatungen sind zu sehr an die Beratung privater Unternehmen gewöhnt und machen für die Strukturen öffentlicher Unternehmen unsinnig aussehende Vorschläge, oder es ist einfach strukturell nicht vorgesehen, daß der öffentliche Dienst kostengünstiger arbeiten kann. Beides sind aber Sichtweisen auf dasselbe Problem: Welches Interesse hat die öffentliche Hand, bei sich selbst zu sparen? Und: Was heißt sparen dort eigentlich?

Wir haben versucht, uns im Rahmen *unserer* Unternehmensberatung diese Fragen zu stellen. Rudimentäre Gedanken dazu sind in unser Konzept eingeflossen. Wir wollen sie, als Thesen, allgemeiner, nicht nur für den Telebus-Service, formulieren. Wir glauben, daß diese Aussagen in ähnlicher Weise für die gesamte Leistungsverwaltung gültig sind.

These 1: Verwaltungen sind die Dinosaurier der modernen Zeit. Sie wissen es. Aber sie warten ab. Und werden dabei immer teurer. Sie repräsentieren den Zustand unserer deutschen Gesellschaft: „In den Strukturen übersatt und überalimentiert, im Geistigen ratlos, im Lebendigen hilflos.“⁴ In der Telebus-Zentrale werden Arbeiten verrichtet, die jeder der Beteiligten für unsinnig hält. Z.B. notiert der Funker, wenn sich ein Busfahrer am Ende seiner Schicht vom Dienst abmeldet, die Anzahl der beförderten Begleitpersonen und der gefahrenen Kilometer. Dies geschieht aufgrund einer vor Jahren ergangenen Anordnung der Geschäftsführung. Die Ergebnisse dieser Arbeit interessieren keinen Menschen. Die unsinnige Arbeit wird weiter gemacht, weil diese Anordnung nie zurückgenommen wurde. Eine Unternehmensberatung darf sich nicht darauf beschränken, solch sinnlose Arbeit anzuprangern. Denn sie ist nur der Ausdruck eines Arbeitsmusters. Dieses Muster heißt Desinteresse, das dazugehörige Verwaltungsprinzip ist der „Dienstweg“.

These 2: Einsparungen im öffentlichen Dienst sind keine Frage des Sparvolumens, sondern der politischen Verkaufbarkeit. Verwaltungen haben keinen Grund zum Sparen, weil sie nicht bankrott gehen können. Zudem gilt ihr Dienst als unverzichtbar, und die starke Durchsetzung der öffentlichen Verwaltungen mit Beamten betont den strukturellen Ewigkeitscharakter jeder einzelnen Verwaltungsstelle. Politiker brauchen Erfolge in der Öffentlichkeit. Ein Minister, der einen Teil seines Etats einspart, ist ein schlechter Minister, weil man unterstellt, er habe sich die Einsparungen aufnötigen lassen. Es sei denn, er bekommt etwas, das er positiv verkaufen kann.

These 3: Politisch verkaufbar ist nur die Verbesserung der Dienstleistung, nicht die Ersparnis an sich. Würde die Sozialsenatorin verkünden, daß der Telebus-Service ab sofort 5 Millionen DM weniger kostet, würden ihr alle unterstellen, sie habe dies dadurch

⁴Gerhard Stadelmaier: „Adieu, Dinosaurier“, in: Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 24.6.1993.

erreicht, daß die Qualität der Leistung herabgesetzt wurde, getreu dem angeblichen proportionalen Zusammenhang von Leistung und ihren Kosten. Stattdessen sollte sie verkünden, daß sie eine Serviceverbesserung für die Behinderten erwirkt hat. Daß das Bessere auch weniger kostet, interessiert eigentlich nur ihre Senatskollegen.

These 4: Im öffentlichen Dienst bedeutet Rationalisieren Flexibilität schaffen. Sparen läßt sich in der öffentlichen Verwaltung nur durch die Veränderung der Arbeitsabläufe, der „Muster“. Deshalb müssen diese prinzipiell veränderbar sein. In der privaten Wirtschaft sind die Schlagworte „Unternehmenskultur“ und „Corporate Identity“ seit einigen Jahren im Gespräch. Dort hat man gelernt, daß die Beschäftigten ein Rationalisierungsprogramm mitgestalten und mitbestimmen müssen, soll es Erfolg haben. Erfolg heißt, daß die Dienstleistung für die Bürger sich verbessert.

These 5: Flexibel verwalten können ist Voraussetzung für Bürgernähe. Der Grund, warum überhaupt noch Menschen in der Leistungsverwaltung beschäftigt sind, ist: Sie allein verfügen über die nötige Flexibilität, dem Einzelfall gerecht zu werden, Spielräume auszunutzen und so dem Bürger zu dienen. Die zunehmende Automatisierung zerstört diese Möglichkeit einer „menschlichen“ Verwaltung zusehends. Starre Computerprogramme führen dazu, daß der „Einzelfall“, die Ausnahme, *technisch* nicht mehr vorgesehen ist. Der Sachbearbeiter ist nicht mehr Herr der Entscheidung, sondern sein Computer. Das neueste Rundschreiben der Senatsverwaltung für Soziales an alle Telebus-Berechtigten⁵ ist dafür beispielhaft. Die Firma PCDS hat die Fahrtwunschannahme in der Telebus-Zentrale auf die neuen Postleitzahlen umgestellt. Deshalb können Fahrtwünsche „aus technischen Gründen nur noch unter Bekanntgabe der neuen Postleitzahlen“⁶ erfüllt werden. Das heißt, daß die Behinderten „bereits vor dem Anruf ihre neue Postleitzahl und die des Zielortes ihrer Fahrt kennen oder notiert haben“⁷ müssen. Warum müssen sie überhaupt Zahlen nennen und nicht Bezirksnamen, falls der Straßename nicht eh eindeutig ist? Wir sagen: der Computer muß sich dem Menschen anpassen. Der Computer ist nicht Herr, sondern Diener. Die Formulierung „aus technischen Gründen“ ist Unsinn, da die Computer sich ja nicht selbst programmieren.

These 6: Informatiker müssen nicht Automaten programmieren, sondern Werkzeugkästen hinterlassen. Computer sind universell einsetzbare Maschinen. Sie können durch Programmierung zu einem Automaten werden, der eine vorher genau definierte Aufgabe zu lösen vermag. Was ist, wenn sich die Aufgabe ändert? In der öffentlichen Verwaltung gibt es nicht die Kontinuität des Chefs, der die „Firmenpolitik“ festlegt, sondern die Aufgaben ändern sich mit den politischen Zielen. Diese ändern sich bei veränderten Machtkonstellationen. Beim Telebus-Service, beispielsweise, haben wir es mit einer Gemengelage

⁵Senatsverwaltung für Soziales: „Information zum Fahrdienst für Behinderte“, Brief von Staatssekretär Armin Tschoepe an alle Telebus-Berechtigten vom 4.6.1993.

⁶Senatsverwaltung für Soziales, a.a.O. S. 3.

⁷Senatsverwaltung für Soziales, a.a.O. S. 3.

aus verschiedenen Interessen zu tun: Busbetreiber, Taxiunternehmer, behindertenpolitische Gruppen und die Telebus-Zentrale selbst üben Druck auf verschiedene Stellen im Senat aus, die dann wiederum die zuständige Abteilung in der Sozialverwaltung unter Druck setzen. Diese gibt Anweisungen an die Telebus-Zentrale. So verändern sich Vorgaben und Rahmenbedingungen. Der Computer aber muß auch unter veränderten Bedingungen noch funktionieren, sonst ist er keine Hilfe, sondern ein Hemmschuh. Wir schlagen deshalb vor, bei einem EDV-Einsatz in öffentlichen Betrieben nicht mit einem Automaten als Black Box anzukommen, sondern mit einem Werkzeugkasten. Dieser bildet einen Rahmen für die gewünschten Funktionen. Die gewünschten Programme werden erst im Betrieb zusammen mit den Beschäftigten eingerichtet. Dadurch entsteht eine kreative Atmosphäre, die dazu führt, daß das Programm, mit Hilfe des zurückgelassenen Werkzeugkastens, auch nach der Installation mit Phantasie flexibel benutzt wird.

Zu einer Theorie der Unternehmensberatung aus der Analyse ihrer Praxis

Rationalisierung im öffentlichen Dienst wird das Thema der kommenden Jahre sein. Dieser Rationalisierungsschub muß, wie in der privaten Wirtschaft, für die Modernisierung der Verwaltung und die Verbesserung ihres Dienstleistungsangebots genutzt werden. Um dies zu erreichen, müssen die Verwaltungen sparen *wollen*. Das gelingt nur, wenn das Sparen dort einer Idee und einem Konzept folgt. Wir halten es für lohnenswert, Ideen und Konzepte für die Unternehmensberatung und Rationalisierung zu entwickeln, die auf die Strukturen öffentlich verwalteter Unternehmen eingehen und ihnen eine Idee an die Hand geben, wie eine effiziente und bürgernahe Verwaltung aussehen könnte, in der es auch Spaß macht zu arbeiten. Um dahin zu gelangen, müßte man den bisherigen Prozeß der Analyse und Beratung durch Unternehmensberatungsfirmen erforschen, müßte deren Gutachten für öffentliche Betriebe mit denen für die private Wirtschaft vergleichen und die Geschichte ihrer Verwirklichung, Verwässerung oder Verwesung untersuchen. Diese empirischen Ergebnisse, die auch und gerade den Einsatz von Computern untersuchen sollen, könnten zu einer praktikablen Theorie der Unternehmensberatung im öffentlichen Dienst führen; zumindest zu einer neuen Theorie des EDV-Einsatzes dort. Ein lohnendes Projekt?

Literaturverzeichnis

- Achatz, H., Kleinschmidt, P., Paparizzos, K.: *A Dual Forest Algorithm For The Assignment Problem*. Working Paper, Universität Passau, 1989.
- Assad, A.: *Modeling and Implementation Issues in Vehicle Routing*. In: Golden, B., Assad, A. (ed.): *Vehicle Routing: Methods and Studies*. Studies in Management Science and Systems, Band 16. North Holland, Amsterdam, 1988.
- Bixby, R., Gregory, J., Lustig, J., Marsten, R., Shanno, D.: *Very Large Scale Optimization: A Case Study in Combining Interior Point and Simplex Methods*. Unveröffentlichtes Manuskript, 1991.
- Bodin, L., Golden, B., Assad, A., Ball, M.: *Routing and scheduling of vehicles: The state of the art*. Computers & Operations Research 10 (1983) 63–211.
- Bodin, L., Sexton, T.: *The multi-vehicle subscriber dial-a-ride problem. The delivery of urban services*. TIMS Studies in the management Sciences 22 (1986) 73–76.
- Borndörfer, R., Grötschel, M., Klostermeier, F., Küttner, Ch.: *Telebus-Disposition: Ein Konzept zur Serviceverbesserung bei gleichzeitiger Kostensenkung*. Konrad Zuse-Zentrum für Informationstechnik, Technical Report TR 93–3 (März 1993).
- Cullen, F., Jarvis, J., Ratliff, H.: *Set Partitioning Based Heuristics for Interactive Routing*. Networks 11 (1981) 125–143.
- Desrochers, M., Desrosiers, J., Solomon, M.: *A Column Generation Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Window Constraints*. Operations Research 40 (1992) 342–354.
- Desrosiers, J., Dumas, Y., Soumis, F.: *A Dynamic Programming Solution of the Large-Scale Single-Vehicle Dial-a-Ride Problem*. Am. J. Math. and Mgmt. Sciences 6 (1986) 301–325.
- Dijkstra, E. W.: *The problem of the next permutation*. In: *A discipline of programming*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1976, 107–110.
- Hoffman, K., Padberg, M.: *Solving Airline Crew-Scheduling Problems by Branch-and-Cut*. Unveröffentlichtes Manuskript, 1992.
- Jaw, J., Odoni, A., Psaraftis, H., Wilson, N.: *A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows*. Transportation Research 20B (1986) 243–257.
- Jungnickel, D.: *Graphen, Netzwerke und Algorithmen*. B.I. Wissenschaftsverlag Mannheim, Wien, Zürich. 2. Auflage, 1990.

Lenstra, J., Rinnooy Kan, A.: *Complexity of vehicle routing and scheduling problems*. Networks 11 (1981) 221–227.

Rationalisierungs-Kuratorium der Deutschen Wirtschaft e.V. (RKW):

RKW-Bericht über die Untersuchung und Planung zur Effizienz-Steigerung und Kosten-Senkung beim Berliner Zentrallausschuß für Soziale Aufgaben e V. (...) in der Zeit vom 14. Oktober bis 15. Dezember 1987. Interner Bericht. Berlin, 1988.

Roy, S., Rousseau, J. M., Lapalme, G., Ferland, J.: *Routing and Scheduling for the transportation of disabled persons – The Algorithm*. TP 5596E, Transport Canada, Transport Development Centre, Montreal, 1984.

Anhang A

Behinderten-Fahrdienst Wien*

Die Selbsthilfeorganisation “club handicap” betreibt in Wien einen Freizeitfahrdienst für Behinderte, den “Fahrdienst Handicap” (FH). Einer der Autoren hatte Gelegenheit, diesen Fahrdienst kennenzulernen, der im folgenden kurz beschrieben werden soll.

Ziel des FH. Ziel des FH ist es, Freizeitfahrten für Menschen durchzuführen, die den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) wegen einer körperlichen Behinderung¹ nicht nutzen können. Arbeits- und Krankenfahrten werden in Wien bisher von gewerblichen Personenbeförderungsunternehmen durchgeführt².

Umfang des Fahrdienstes. 1992 wurden 243.000 Freizeitfahrten durchgeführt (1991: 195.000), täglich 650 bis maximal 900. Bei 1,7 Mio. Einwohnern gibt es 6.000 berechnete Benutzer³, davon 2.000 mit eigenem PKW; etwa 3.500 Berechnete nutzen den FH.

Zuwendungsträger. Zuwendungsträger für den FH ist die Abteilung MA12 des Magistrats der Stadt Wien; die (gedeckelten) Zuwendungen betrugen 1991 36 Mio. ÖS, für 1992 wird mit insgesamt etwa 50 Mio. ÖS gerechnet. Daneben erzielt der FH noch Einnahmen aus von ihm erhobenen Fahrpreisen in Höhe des ÖPNV-Tarifs für Einzelfahrscheine und für Monatskarten, die zur Durchführung von 60 Fahrten berechnen. Dieser “Selbstbehalt” erbrachte 1992 3 Mio. ÖS. Der FH argumentiert, daß die von ihm vertretenen Behinderten keine besondere Behandlung wünschen, sondern ein Recht auf Beförderung mit öffentlichen Nahverkehrsmitteln haben⁴. Für den FH als Ersatz für den ÖPNV sei demzufolge ein Fahrpreis zu entrichten. Weiterhin ist die Einführung eines Jahresbeitrags für die computerlesbare Mitgliedskarte geplant.

Übersicht: Organisation des Fahrdienstes. Der FH unterhält eine Telefonzentrale, bei der die Berechneten ihre Fahrtwünsche anmelden. Der FH sammelt diese, disponiert sie und gibt sie zur Ausführung an gewerbliche Subunternehmer weiter⁵. Der Fahrbetrieb wird mit einer Funkzentrale betreut, die hauptsächlich Spontanfahrtwünsche aufnimmt, disponiert und an die Fahrzeuge weitergibt.

Fahrtwunschannahme. Die Fahrtwünsche müssen bis zum Vorabend des gewünschten Fahrtages angemeldet werden. Aufgenommen werden die gewünschte Abfahrtszeit im 15 Minuten-Raster, Start- und Zielort, Rollstuhltyp (kein, Falt- oder sonstiger Rollstuhl), ob ein zweiter Helfer außer

* Autor: Ralf Borndörfer, aus: Borndörfer, Grötschel, Klostermeier und Küttner[1993]

¹Der FH befördert keine geistig Behinderten.

²Geplant: Ausweitung der Zuständigkeit des FH auf Krankenfahrten

³Berechnung durch das Gesundheitsamt der Stadt Wien

⁴Nach Ansicht des Magistrats gibt es keinen gesetzlichen Anspruch auf einen Behindertenfahrdienst.

⁵Bis zum 1. Januar 1993 konnte bei Äußerung eines Fahrtwunsches ein Subunternehmer gewählt werden bzw. sogar direkt bei diesem ohne Einschaltung des FH bestellt werden, so daß der FH bis Ende 1992 täglich nur etwa 400 oder 45–60% der Fahrtwünsche aufnahm.

dem Fahrer nötig ist sowie Zusatzinformationen wie etwa Stockwerk etc. Falls möglich, werden von der Funkzentrale am Fahrttag selbst eingehende Fahrtwünsche (Spontanfahrtwünsche) berücksichtigt.

Busanmietung. Der FH versteht sich als Fahrdienst für Schwerbehinderte und benutzt deshalb ausschließlich Spezialbusse. Diese Busse werden samt Fahrer von gewerblichen Subunternehmern angemietet. Die Anmietungsbedingungen werden jährlich durch eine vom Magistrat durchgeführte Ausschreibung neu festgesetzt. 1992 galten folgende Konditionen: Die Subunternehmer verpflichten sich, bis zu einer festgelegten Obergrenze jeden Tag eine gewisse Beförderungskapazität bereitzustellen und eine Zentrale zu besetzen. Der FH verpflichtet sich nicht, irgendwelche Leistungen in irgendeinem Umfang in Anspruch zu nehmen. Am Vorabend jedes Einsatztages erhalten die Subunternehmer per Telefax die Fahrzeugeinsatzpläne für die ihnen zugewiesenen Fahrten. In Wien sind Einsatzschichten von in der Regel 12 bis zu 14 h täglich möglich. Die Vergütung erfolgt unabhängig von der zurückzulegenden Strecke zu Pauschalpreisen für jede beförderte Person. Die Tarife betragen 230 ÖS für Rollstuhltransporte und 125 ÖS für Behinderte ohne bzw. umsetzbare Behinderte mit Faltrollstuhl; der durchschnittliche Fahrpreis betrug 1992 162 ÖS. Eine Vergütung für Leerfahrten gibt es nicht. Der FH arbeitet zur Zeit mit 8 Partnern zusammen. Durch Ausnutzung seiner Monopolstellung bei der Zuteilung entsprechender Quoten und Ausnutzung der starken Zunahme der Behindertenbeförderung in den letzten Jahren hat es der FH verstanden, einen Nachfragermarkt zu schaffen und mit mehreren ersetzbaren Anbietern zu kooperieren.

Einige Bemerkungen erscheinen hier angebracht. Die Fläche von Wien beträgt 225 km² (Berlin: 883 km²), die durchschnittliche Fahrstrecke pro Beförderung 10–12 km (Berlin: 18–20 km), die durchschnittliche Beförderungsleistung fast 2 Fahrten/h/Bus (1,7 Rollstuhlfahrten/h/Bus)⁶ (Berlin: 1,0 Fahrten/h). Die Subunternehmer bezahlen ihre Fahrer für Rollstuhlfahrten mit 40 ÖS/h⁷ (netto), für andere Fahrten pro Kopf.⁸

Hilfsdienst. Ein- und Ausstiegs- bzw. Treppenhilfen, für die neben dem Fahrer ein zweiter Helfer erforderlich sind, werden von einem FH-eigenen Hilfsdienst durchgeführt. Der Hilfsdienst besteht aus 5 Personen und ist mit eigenen PKWs ausgerüstet. Ein Helfer verdient 13.000 ÖS/Monat; insgesamt betrugen die Lohnkosten 1992 1 Mio. ÖS.

Disposition. Der FH verfügt über ein selbsterstelltes vollautomatisches Dispositionsprogramm zur Fahrzeugeinsatzplanung. Eine Handdisposition gibt es nicht. Dieses Programm ist in der Lage, innerhalb von etwa 10 Minuten 1.000 bis zum Vorabend angemeldete Fahrtwünsche zu disponieren. Das Vorgehen ist sehr einfach. Die Fahrtwünsche werden nach Abfahrtszeiten sortiert, An- und Abfahrtsort werden lediglich bezirksweise⁹ berücksichtigt. Das Programm wählt zufällig

⁶50% der Fahrten sind Fahrten von Bezirken innerhalb des Rings in den angrenzenden zentralen ersten Bezirk, die Stadtmitte, also Fahrten über nur eine Bezirksgrenze hinweg.

⁷Kein Druckfehler. Der FH plant, sich bei der nächsten Ausschreibung für eine Erhöhung des Satzes auf 80 ÖS/h einzusetzen.

⁸Der FH will in Zukunft mit eigenen Fahrzeugen noch kostengünstiger arbeiten und plant eine Vergütung von 11.000 ÖS/Monat (netto) für seine Fahrer.

⁹Wien ist in 23 Bezirke aufgeteilt.

ein verfügbares Auto aus und weist ihm den ersten Fahrtwunsch zu; gibt es einen zweiten zeitgleichen Fahrtwunsch mit identischem Start- und Zielbezirk, so wird er ebenfalls dem Fahrzeug zugewiesen. Die benötigte Fahrzeit für einen Fahrtwunsch wird je nach Tageszeit auf 30 bzw. 45 Minuten festgesetzt, für zwei Fahrtwünsche auf 1 h. Mit einer "Greedy-Heuristik" wird dem Fahrzeug nun ein zeitlich und örtlich möglichst günstiger Anschlußauftrag zugewiesen. Zunächst werden zeitlich unmittelbar anschließende Fahrtwünsche mit Start im Endbezirk des letzten Auftrags ausgewählt. Gibt es keine solchen, so wird in der unmittelbaren Nachbarschaft des Bezirks nach zeitlich anschließenden Fahrtwünschen gesucht ("Bezirkslogik"). Gibt es auch diese nicht, so macht das Fahrzeug eine Pause von bis zu einer Stunde; fallen dann immer noch keine Aufträge an, so wird der Einsatzplan des Fahrzeugs beendet. Der Einsatzplan wird außerdem nach einer Schichtlänge von in der Regel 12 h abgeschlossen. Dieses Vorgehen wird solange für immer weitere Fahrzeuge wiederholt, bis alle Fahrtwünsche disponiert sind. Das Dispositionsprogramm des FH hat die Eigenschaft, daß für die 4 bis 5 zuletzt disponierten Fahrzeuge relativ viele und lange Pausen geplant werden. Diese werden am Fahrtag für die Erfüllung von Spontanfahrtwünschen benutzt, die diesen Fahrzeugen online manuell zugewiesen werden.

Abrechnung mit den Subunternehmern. Bei Antritt und Beendigung einer Beförderung muß der Mitgliedsausweis des Berechtigten durch ein entsprechendes Lesegerät¹⁰ gezogen werden, das die Mitgliedsnummer des Besitzers und die Uhrzeit abspeichert. Das Gerät wird periodisch zur Zentrale des FH gebracht, wo die gespeicherten Daten automatisch ausgelesen werden. Aufgrund dieser Daten wird mit den Subunternehmern abgerechnet. Es werden lediglich Fahrten vergütet, deren Antritt und Beendigung korrekt protokolliert ist. Ein Prüfprogramm erstellt eine Liste von Fahrten, deren Anfangs- oder Endzeiten signifikant von der Disposition abweichen.

EDV. Der FH verwendet einen Philips P9000 Mehrbenutzerrechner mit etwa 20 Terminals; das Betriebssystem ist Unix¹¹. Die Software besteht aus einem Modul zur Fahrtwunschannahme mit einer einfachen Eingabemaske, dem Dispositionsprogramm, einem Modul zur Abrechnung der von den Unternehmern durchgeführten Fahrten und deren Überprüfung sowie einer Stammdaten- und Fahrzeugverwaltung, Programmen zum Drucken von Rechnungen etc. und zur Erstellung einer Vielzahl verschiedenster Statistiken bis hin zur Effizienz einzelner der eingesetzten Fahrzeuge oder Fahrer. Im wesentlichen werden dabei eine Benutzerstammdaten-, eine Fahrzeug- und für jeden Betriebstag eine Fahrtwunschdatei sowie eine Datei mit den durchgeführten Fahrten verwaltet; es handelt sich dabei um zeilenorientierte Textdateien. Es ist geplant, die EDV der Subunternehmer über Standleitungen an die des FH anzukoppeln, um die Übermittlung der Fahrzeugeinsatzplanung und die Abrechnung zu vereinfachen.

Verwaltung. Der FH beschäftigte 1992 30 Mitarbeiter; 5 im Hilfsdienst, zwei Schichten à 3 Telefonisten für die Fahrtwunschannahme, zwei Schichten à 2 Mitarbeiter in der Funkbetreuung, wobei ein Mitarbeiter Spontanfahrtwünsche annimmt und disponiert und der zweite der eigentliche Funker ist und einen EDV-Fachmann, die restlichen Mitarbeiter für sonstige Verwaltungstätigkeiten sowie für die Vereinsverwaltung des club handicap. Mit wenigen Ausnahmen

¹⁰Die Subunternehmer müssen diese Geräte auf eigene Kosten in ihren Fahrzeugen installieren.

¹¹Geplant ist die Anschaffung eines neuen Unix-Mehrbenutzerrechners mit 64MB Hauptspeicher und 2GB Festplatte.

beschäftigt der FH ausschließlich extrem schwerbehinderte Mitarbeiter, wofür zum Teil besondere Infrastrukturmaßnahmen wie etwa Terminals mit extrem vergrößernder Schrift für Sehbehinderte etc. notwendig sind. Die Verwaltungskosten betrugen 1992 8 Mio. ÖS inklusive des Hilfsdienstes, das durchschnittliche Nettogehalt eines Mitarbeiters 13.000 ÖS/Monat.

Der Telebus-Service in der Presse