



Lehrstuhl für Verkehrstechnik  
Technische Universität München  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch

Schriftenreihe Heft 4

Silvio Nocera

Steuerung des Sektorbetriebs bei  
nachfrageabhängiger ÖPNV-Bedienung

München 2004

Die Deutsche Bibliothek – CIP Einheitsaufnahme

Nocera, Silvio:

Steuerung des Sektorbetriebs bei  
nachfrageabhängiger ÖPNV-Bedienung

Hrsg.: Fritz Busch, München, 2004

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrstechnik  
der Technischen Universität München, Heft 4

Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2004

ISBN 3-937631-03-8

Copyright ©

Lehrstuhl für Verkehrstechnik der Technischen Universität München 2004

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Druck: digitalreprint GmbH, Bad Feilnbach

ISBN 3-937631-03-8

ISSN 1612-9431

Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München, 80333 München

Telefon: 089 / 289 – 22438, Telefax: 089 / 28 55 77, E-Mail: [info@vt.bv.tum.de](mailto:info@vt.bv.tum.de)

Internet: [www.vt.bv.tum.de](http://www.vt.bv.tum.de)

Bei der vorliegenden Veröffentlichung handelt es sich um die Dissertation von  
Herrn Dr.-Ing. Silvio Nocera

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günther Leykauf, TU München

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. i. R. Dr.-Ing. Peter Kirchhoff, TU München
2. Professor Michael G.H. Bell MSc, PhD FIHT FICE,  
Imperial College of Science, U.K.
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch, TU München



## Danksagung

Während meiner Zeit an der Technischen Universität München war die berufliche und private Zusammenarbeit mit den Kollegen des Lehrstuhls für Verkehrs- und Stadtplanung (und danach des Lehrstuhls für Verkehrstechnik) sehr fruchtbar. Ich werde die freundliche Münchner Atmosphäre nie vergessen können.

Daher möchte ich mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die in irgendeiner Form zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben: Vor allem für die Entwicklung dieses Verfahrens war die Hilfe der Kollegen Dipl.-Ing. Uli Lange und Dipl.-Ing. Antonios Tsakarestos wirklich wichtig.

Den Referenten danke ich für ihre Unterstützung.

Prof. Michael Bell hat mir eine gute Gastfreundschaft bei dem „Imperial College London“ gewährt. Auf meiner Reise nach England haben mir die Empfehlungen von Professor Bell und seinen Assistenten gezeigt, dass die Grundidee von STRIDER nicht so schlecht war. Professor Bells Kenntnis der „Shortest-Path-Algorithmen“ hat mir erlaubt, die bibliographische Analyse des Kapitels 4 zu verbessern.

Meinen besonderen Dank bekommt Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fritz Busch für die großartige Zusammenarbeit am Lehrstuhl für Verkehrstechnik der Technischen Universität München. Seine konkrete Weltvision ist immer einen wirksamen Vergleich gewesen. Die von Professor Busch empfohlenen Anmerkungen über die Struktur der Datenbank und die Verwendung der Randbedingung des Suchwinkels haben STRIDER deutlich verbessert.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinem Mentor Univ.-Prof. i.R. Dr.-Ing. Peter Kirchhoff bedanken. Während meiner Zeit an seinem Lehrstuhl hat er mich mit seiner Begeisterung angesteckt und mir bei einigen kniffligen Problemen schnell und manchmal unkonventionell weitergeholfen. Seine Empfehlungen und Korrekturen haben die Idee eines Ingenieurs in eine Dissertation transformiert, und haben es erlaubt, dass der Traum eines Mannes Realität wurde.



## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>v</b>
<b>1 Erweiterung der Bedienungsformen des ÖPNV</b>	<b>1</b>
<b>2 Merkmale nachfrageabhängiger ÖPNV-Bedienung</b>	<b>5</b>
<b>3 Aufgabenstellung für die Steuerung des Sektorbetriebs</b>	<b>13</b>
<b>4 Analyse bestehender Verfahren</b>	<b>19</b>
4.1 Algorithmen zur Suche des kürzesten Weges	19
4.1.1 Branch-and-Bound-Verfahren	19
4.1.2 Heuristische Verfahren	22
4.1.3 Heuristische Metastrategien	25
4.1.4 Shortest Path Algorithm und Algorithmus von Floyd	31
4.1.5 Auswahl des Verfahrens	32
4.2 Vehicle Routing Problem (Tourenplanung)	33
4.2.1 Grundlagen	33
4.2.2 Mathematische Formulierung des VRP	33
4.2.3 Exakte Verfahren für VRP	37
4.2.4 Heuristische Verfahren für VRP	38
4.2.5 Auswahl des Verfahrens	42
<b>5 Beschreibung des Verfahrens STRIDER</b>	<b>43</b>
5.1 Formulierung einer praktikablen Zielfunktion	43
5.2 Ablauf des Verfahrens	47
5.2.1 Aufgabenstellung	47
5.2.2 Eingangsgrößen	48
5.2.3 Ausgangslösung für die Fahrtrouten	49
5.2.4 Verbesserung der Ausgangslösung	53
5.2.5 Paarweise Verknüpfung der Fahrtrouten	55
5.2.6 Rechentechnisches Vorgehen	57
5.3 Kenngrößen zur Beurteilung der Qualität der Lösung	59
<b>6 Beispielsrechnungen</b>	<b>61</b>
6.1 Sektorbetrieb im allgemeinen ÖPNV	61
6.2 Sensitivitätsanalyse	67
6.3 Schülerbeförderung	71
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>75</b>





## Zusammenfassung

Angesichts der geringen Verkehrsnachfrage und des Zwangs, Kosten zu sparen, treten nachfragegesteuerte Betriebsweisen im ÖPNV des ländlichen Raums immer stärker in den Vordergrund. Nachfragegesteuerter Betrieb heißt, dass bei einem Fahrzeugumlauf nur diejenigen Haltestellen bedient werden, an denen Fahrgäste ein- oder aussteigen. Dementsprechend müssen Fahrtwünsche angemeldet und die Fahrtrouten aufgrund der jeweils vorliegenden Fahrtwünsche für jeden Umlauf neu gebildet werden. Viele Landkreise betreiben neben herkömmlichem Linienbetrieb in den Tagesrandverkehrszeiten nachfragegesteuerte Anrufsammeltaxi-Systeme (AST), um zu diesen Zeiten überhaupt noch ÖPNV-Leistungen anbieten zu können. Oft wird auf eine ÖPNV-Bedienung außerhalb der Hauptverkehrszeit ganz verzichtet.

Seit den Probefahrten des RUFBUS-Systems in Friedrichshafen und des RETAX-Systems in Wunstorf Anfang der 70-er Jahre gibt es eine Reihe von Versuchen, nachfragegesteuerte Betriebsformen nicht nur als Alternative zum herkömmlichen Linienbetrieb einzusetzen, sondern Linienbetrieb und nachfragegesteuerten Betrieb miteinander zu integrieren. Diese integrierte Betriebsform findet allerdings bisher nur geringes Interesse, einerseits, weil die Fragen des Wettbewerbs im ÖPNV noch ungeklärt sind und der Mut zu Neuem deshalb begrenzt ist und andererseits, weil die Steuerung des nachfragegesteuerten Betriebs als aufwendig und problematisch angesehen wird.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Steuerung des Sektorbetriebs. Er verbindet verstreut liegende Siedlungen abseits der Hauptverkehrsstraßen mit einem zentralen Ort und kommt insbesondere bei geringer Verkehrsnachfrage in flächigen Siedlungsstrukturen in Frage. Sektorbetrieb dient i.d.R. gleichzeitig Zubringersystem zu oder Verteilersystem von höherrangigen ÖPNV-Systemen, welche die zentralen Orte miteinander verbinden.

Im ersten Teil der Arbeit werden ein Überblick über nachfragegesteuerte Betriebsformen gegeben sowie die bisherigen Vorgehensweisen bei der Verarbeitung der Fahrtwünsche und der Bildung von Fahrtrouten aufgezeigt. Aus diesen Ausführungen leitet sich die Notwendigkeit ab, ein neues Verfahren für die Steuerung des Sektorbetriebs zu entwickeln.

Das Schema der Steuerung des Sektorbetriebs ist nachfolgend dargestellt:

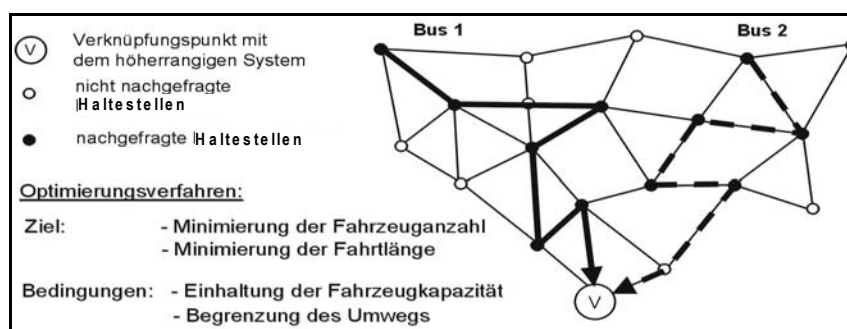


Abb. 0-1: Schema der Steuerung des Sektorbetriebs

Für die Lösung der o.g. Aufgabe gelten die folgenden Ziele:

- Bedienung der Fahrgäste auf möglichst kurzen Wegen,
- Minimierung des betrieblichen Aufwandes für die Beförderung der Fahrgäste.

Da diese beiden Ziele gegenläufig sind, handelt es sich um ein Optimierungsproblem.

Die Lösung dieser Aufgabe unterteilt sich in die beiden Stufen:

- Ermittlung der Anzahl der für die jeweiligen Bedienungszeitpunkte benötigten Fahrzeuge (off-line),
- Zuordnung der Fahrtwünsche zu den eingesetzten Fahrzeugen und Bildung von Fahrtrouten (on-line).

Die beiden Stufen des Verfahrens laufen nach derselben Algorithmik ab. Der Unterschied besteht darin, dass die Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge in der ersten Stufe ermittelt werden muss und für die zweite Stufe Eingangsgröße ist.

Für die Lösung dieser Aufgabe kann auf Verfahren des Operation Research zurückgegriffen werden, wie sie im Güterverkehr schon seit längerem zur Tourenplanung in Gebrauch sind. Diese methodischen Ansätze werden ausführlich dargestellt und im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit für die vorliegende Aufgabenstellung geprüft.

Eine grundlegende Verfahrenskomponente ist die Suche des kürzesten Wegs zwischen Netzknoten. Hierfür wird ein Algorithmus von FLOYD verwendet. Für die Zuordnung der Fahrtwünsche zu den Fahrzeugen und die Bildung von Fahrtrouten für die einzelnen Fahrzeuge steht keine unmittelbar anwendbare Methode zur Verfügung. Aufbauend auf den vorhandenen Ansätzen wird ein heuristisches Verfahren entwickelt, das zwar kein exaktes Optimum liefert, aber eine Lösung, deren Genauigkeit für den praktischen Betrieb ausreicht.

Als Ausgangspunkt des Verfahrens werden eine Zielfunktion entwickelt und die Randbedingungen zusammengestellt. Dabei zeigt sich, dass eine algorithmische Formulierung der Zielfunktion, bei der die einzelnen, z.T. gegenläufigen Einzelziele auf einen Nenner gebracht werden, nicht möglich, zumindest aber nicht handhabbar ist. Aus diesem Grunde werden Vereinfachungen vorgenommen, wie sie bei heuristischen Verfahren üblich sind. Die Zielfunktion wird zerlegt in eine hierarchisch ablaufende Minimierung folgender Einzelkomponenten:

- Minimierung der Kosten für die Vorhaltung von Fahrzeugen und Fahrern,
- Minimierung der Kosten für die Erbringung der Fahrleistung.

Das Ziel, die Umwege bei der Beförderung der Fahrgäste zu minimieren, wird in die Randbedingung verwandelt, dass ein bestimmter, politisch vorgegebener Umwegfaktor nicht überschritten werden darf. Dieser Umwegfaktor wird in der Weise variabel gehandhabt, dass er von einem im Normalbetrieb angestrebten Grenzwert bis zu einem noch akzeptierten Grenzwert erhöht werden kann, wenn andernfalls zusätzliche Fahrzeuge benötigt würden. Erst wenn dieser maximale Grenzwert ausgeschöpft ist und eine Beförderung der Fahrgäste innerhalb der bestehenden Randbedin-

gungen dennoch nicht möglich ist, muss ein zusätzliches Fahrzeug – ggf. in Form eines zusätzlich geordneten Taxis – eingesetzt werden.

Der Sektorbetrieb ist i.d.R. als Zu- und Abbringer mit einem höherrangigen ÖPNV-System verknüpft und weist deshalb Anschlüsse mit diesem System auf. Die Anschlüsse bestehen meist in beiden Richtungen, jeweils ausgerichtet auf das höchstrangige Zentrum. Aus den Anschlusszeiten ergibt sich für den Sektorbetrieb die maximal zur Verfügung stehende Fahrzeit zwischen dem Verlassen des Verknüpfungspunktes und der Rückkehr zum Verknüpfungspunkt. Aus diesem Grunde muss bei der Verknüpfung der Fahrtrouten vom Verknüpfungspunkt in die Fläche (Hinfahrt) und umgekehrt (Rückfahrt) sowie ihrer Zuordnung zu den Fahrzeugen diese größtmöglich Fahrzeit beachtet werden. Es können nur solche Fahrtrouten miteinander verknüpft und Fahrzeugen zugeordnet werden, bei denen die Summe der Fahrzeiten einschließlich Puffer- und Übergangszeiten unterhalb der größtmöglichen Fahrzeit liegt.

Weitere Randbedingungen ergeben sich aus dem Fassungsvermögen der Fahrzeuge und der Forderung, die an einer Haltestelle wartende Fahrgastgruppe nicht auf mehrere Fahrzeuge aufzuteilen, sondern in einem Fahrzeug aufzunehmen.

Vor dem ersten Betrieb, d.h. bei der Bestimmung der Anzahl der erforderlichen Fahrzeuge müssen für die Anzahl der an den Haltestellen zusteigenden oder aussteigenden Fahrgäste Annahmen getroffen werden, oder es muss auf diesen Optimierungsschritt verzichtet und gleich eine bestimmte Anzahl von Fahrzeugen gegriffen werden. Erst während des laufenden Betriebs ist die Anzahl der Fahrtwünsche zu den verschiedenen Bedienungszeitpunkten und an den einzelnen Haltestellen aufgrund der Anmeldungen bekannt, so dass die Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge korrigiert werden kann.

Die Fahrzeiten zwischen den Haltestellen lassen sich anfangs nur aus den Entfernungen zwischen den Haltestellen und der zu erwartenden Fahrgeschwindigkeit schätzen. Während des Betriebs werden sie kontinuierlich gemessen, so dass die Schätzungen korrigiert werden können.

Um die Komplexität des Verfahrens und damit den Rechenaufwand zu begrenzen, wird die Lösung der Aufgabe in folgende Schritte zerlegt:

- Entwicklung einer Ausgangslösung für die Fahrtrouten,
- Verbesserung der Ausgangslösung für die Fahrtrouten,
- Paarweise Verknüpfung der Fahrtrouten.

Der durch diese Zerlegung entstehende Genauigkeitsverlust erscheint im Hinblick auf die dadurch erreichte Aufwandsreduzierung vertretbar. Obwohl der Sektorbetrieb zunächst als Teil des allgemeinen ÖPNV gedacht ist, lässt er sich auch für die Abwicklung des Schülerverkehrs nutzen. Der Schulstandort entspricht dabei dem Verknüpfungspunkt mit dem höherrangigen System.

Abschließend wird das Verfahren an Fallbeispielen aus dem Landkreis Grafschaft Bentheim demonstriert. Im Rahmen dieser Berechnungen werden auch Sensitivitätsanalysen zwischen einer Modifikation der Eingangsgrößen und der Veränderung der Ergebnisse angestellt.



# 1 Erweiterung der Bedienungsformen des ÖPNV

Die Entwicklung und Verbreitung des Pkw nach dem Zweiten Weltkrieg hat sowohl das Verkehrsgeschehen als auch die Siedlungsstruktur nachhaltig verändert.

Für den Einzelnen ist der Pkw das beste Verkehrsmittel: Er ist schnell, komfortabel, jederzeit verfügbar und ermöglicht es, nahezu alle Orte direkt und auf kürzestem Wege zu erreichen. Nachteilig ist allerdings die Umweltbelastung, die mit der Nutzung des Pkw verbunden ist. Sie äußert sich in Form von Abgas- und Lärmbelastungen, Unfällen sowie Beeinträchtigungen des Stadtbildes. Wenn Pkw's in hoher Konzentration auftreten, gehen die genannten Vorteile verloren und die Nachteile vervielfachen sich.

Der ÖPNV weist im Vergleich mit dem Pkw deutliche Nachteile auf: Er ist langsamer, befördert die Fahrgäste nur kollektiv und nicht individuell, verkehrt nur zu bestimmten Zeitpunkten und erfordert häufig ein Umsteigen sowie mehr oder weniger lange Fußwege zwischen den Haltestellen und den Orten der Aktivitäten. Mit dem Vordringen des Pkw hat der ÖPNV deshalb an Bedeutung verloren. Eine Verbesserung der Verkehrsqualität ist zwar grundsätzlich möglich, verursacht aber hohe Kosten, die insbesondere bei einer geringen Nachfrage nicht vertretbar sind. Die Nachteile des ÖPNV sind in ihrer Art mit denen des Pkw vergleichbar. Sie vermehren sich aber nicht bei einer höheren Inanspruchnahme des Verkehrsmittels, wie dies beim Pkw der Fall ist, sondern bleiben bis zu bestimmten Sprungstellen gleich.

Da die Vorteile des Pkw nur bei geringer Nachfragekonzentration voll zur Wirkung kommen und der ÖPNV nur bei hoher Nachfragekonzentration wirtschaftlich eingesetzt werden kann, bietet sich eine Aufgabenteilung zwischen dem motorisierten Individualverkehr (MIV) und dem ÖPNV an:

- Vorrangige Benutzung des ÖPNV bei Fahrten in Räumen hoher Verkehrskonzentration (z.B. Berufsverkehr in die Innenstadt oder Freizeitverkehr zu Großveranstaltungen).
- Gleichrangige Benutzung von Pkw und ÖPNV bei Fahrten in Räumen mittlerer Verkehrskonzentration (z.B. Berufsverkehr in den Außenbereichen der Stadt, Einkaufs- und Erledigungverkehr).
- Benutzung des Pkw bei Fahrten in Räumen geringer Verkehrskonzentration z.B. Freizeitverkehr am Wochenende).

Eine vorrangige Benutzung des ÖPNV bei Fahrten in Räumen hoher Verkehrskonzentration ist erfahrungsgemäß nur erreichbar, wenn dort neben einer hohen Verkehrsqualität des ÖPNV die Nutzung des Pkw durch Restriktionen, wie Parkgebühren oder Straßenbenutzungsgebühren gedämpft wird. In Räumen mittlerer und geringer Verkehrskonzentration sind restriktive Maßnahmen gegenüber der Pkw-Benutzung verkehrspolitisch nicht vertretbar. Hier muss entweder ein hoher Pkw-Anteil in Kauf genommen oder eine ÖPNV-Verkehrsqualität geboten werden, die unter Nutzen-Kosten-Gesichtspunkten eigentlich nicht vertretbar ist. Auch bei einer Begrenzung des ÖPNV-Angebots muss eine Mindestbedienung geboten werden, um die Mobilität derjenigen

Personen zu sichern, die nicht über einen Pkw verfügen oder ihn nicht fahren können, wollen oder dürfen.

Eine wichtige Entwicklungsaufgabe beim ÖPNV liegt deshalb darin, das Nutzen-Kosten-Verhältnis bei mittlerer und geringer Verkehrsnachfrage zu verbessern. Dies kann nur gelingen, wenn über den traditionellen Linienverkehr hinaus kostengünstigere und gleichermaßen attraktive Bedienungsformen zum Einsatz kommen.

Bezüglich der Siedlungsstruktur fördert der Pkw die Suburbanisierung, d.h. die Erweiterung der Siedlungsfläche über die Stadtgrenzen hinaus ins Umland. Dies führt, sofern der Prozess der Suburbanisierung ungesteuert erfolgt, zu einer Zersiedlung der Landschaft und einem Verlust der ökologischen Ausgleichsflächen zwischen den Siedlungsflächen. Da der ÖPNV in seiner traditionellen Form solche Siedlungsstrukturen weder qualitativ noch wirtschaftlich zufriedenstellend erschließen kann, entsteht durch die Suburbanisierung eine Zwangsläufigkeit zur Pkw-Benutzung, die bei ihrer Bündelung im Stadtgebiet zu den o.g. negativen Folgen führt. Auch hier kann eine nahezu ausschließliche Pkw-Benutzung nur vermieden werden, wenn über den traditionellen Linienverkehr hinaus kostengünstigere und gleichermaßen attraktive Bedienungsformen zum Einsatz kommen.

Um die negativen Wirkungen einer übermäßigen Pkw-Nutzung sowohl direkt im Verkehrsablauf als auch indirekt über die Veränderung der Siedlungsstruktur zu vermeiden, wird schon seit längerem nach Wegen gesucht, die Eigenschaften des ÖPNV näher an diejenigen des Pkw heranzuführen. Diese Bemühungen laufen unter den Stichworten „Individualisierung des ÖPNV“, „unkonventioneller ÖPNV“ und „Paratransit“. Gemeint sind damit ÖPNV-Systeme, die sich von der Starrheit des konventionellen Linienbetriebs befreien und unter Nutzung der heutigen Möglichkeiten der Telematik hinsichtlich ihrer räumlichen und zeitlichen Ausprägung stärker nachfrageorientiert agieren.

Die drei herausragenden attraktivitätsbegrenzenden Merkmale des traditionellen ÖPNV sind:

- Der Zugang/Abgang kann nur an bestimmten Punkten (Haltestellen, Bahnhöfe) erfolgen, die im Interesse einer hohen Beförderungsgeschwindigkeit möglichst weit auseinander liegen.
- Der Zeitpunkt der Beförderung ist festgelegt, wobei die Beförderungshäufigkeit sehr stark von der Verkehrsnachfrage abhängt.
- Der Linienweg ist festgelegt und verläuft wiederum im Interesse einer hohen Beförderungsgeschwindigkeit möglichst gestreckt; Ziele abseits dieser Linie sind nur durch Umsteigen oder durch längere Fußwege erreichbar.

Vordringliches Ziel einer Weiterentwicklung des ÖPNV muss es daher sein, diese Nachteile zu verringern. Damit würde der ÖPNV in seinen Qualitätsmerkmalen näher an den Pkw heranrücken. Der Weg zu diesem Ziel führt zu einer Erweiterung der Bedienungsformen in Richtung auf eine nachfrageabhängige Bedienung der Haltestellen. Sie kann insbesondere bei geringer Verkehrsnachfrage einen großen Beitrag zum Abbau der o.g. Nachteile leisten, ohne dass dadurch zusätzliche Kosten entstehen. Damit wäre eine Verbesserung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses zu erreichen.

Die in Mitteleuropa praktizierten Systeme mit einer nachfrageabhängigen Bedienung der Haltestellen gehen zurück auf den US-amerikanischen „Dial-a-Bus“. In Anlehnung an diese Systeme wurden Anfang der 70er Jahre in Friedrichshafen und Wunstorf zwei Pilotprojekte mit nachfrageabhängiger Haltestellenbedienung durchgeführt, die von den dortigen Landkreisen getragen und vom damaligen Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) unter Beteiligung der Industriefirmen DORNIER und MBB finanziert wurden.

Während in Friedrichshafen eine flächenhafte, von räumlichen Restriktionen freie Nachfragesteuerung erfolgte, hatte das Projekt in Wunstorf eher einen bandartigen Charakter und diente als Zubringersystem zur Regionalbahn nach Hannover. Über diese Projekte ist in der vom BMFT herausgegebene Reihe „Nahverkehrsforschung“ mehrfach berichtet worden.

Unabhängig von diesen spektakulären und kostenintensiven Pilotprojekten mit staatlicher Förderung entwickelte FIEDLER seit Mitte der 70er Jahre das System des Anrufsammeltaxis (AST), das vielfache erfolgreiche Anwendung fand. Bei AST handelt es sich um ein System, das wie in Wunstorf bandförmige Strukturen aufweist und als Ersatz oder Ergänzung des herkömmlicheren Linienverkehrs in Räumen und Zeiten sehr geringer Verkehrsnachfrage eingesetzt wird.

Die Projekte Friedrichshafen und Wunstorf scheiterten, als die Förderung durch das BMFT aufhörte. Der verkehrliche und technische Anspruch war, wie bei vielen staatlich geförderten Projekten, zu hoch gewesen, als dass sich die Projekte ohne die Förderung selbst hätten tragen können. Auch war angesichts der verfestigten Monopolstrukturen im ÖPNV die Zeit für derartige Systeme noch nicht reif. Das Projekt in Wunstorf lief in modifizierter Form noch einige Zeit weiter.

In Deutschland griff der Automobilhersteller VW die Idee des nachfragegesteuerten Busbetriebs auf und installierte ein System im nördlichen Emsland, allerdings mit sehr speziellen, auf die örtliche Topographie ausgerichteten Merkmalen. Über dieses System, das aber ebenfalls bisher keine weitere Verbreitung gefunden hat, berichtet MEHLERT (1998).

Erfolgreicher und in der Schweiz in zunehmender Verbreitung befindlich ist das von der Postauto-Gesellschaft der Schweiz entwickelte System „PUBLICAR“, das bandartige Strukturen aufweist und den Linienbetrieb bei geringer Verkehrsnachfrage ersetzt und ergänzt.

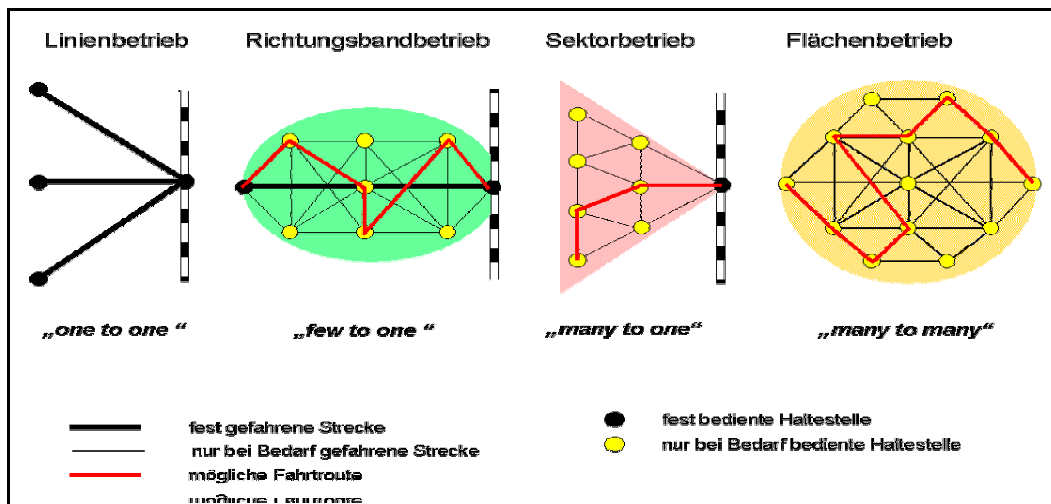
Das bekannte und oft zitierte „Burtbus-System“, das aus den Niederlanden stammt und in Deutschland unter dem Namen „Bürgerbus“ Verbreitung gefunden hat, gehört nicht in die Kategorie der Systeme mit nachfrageabhängiger Haltestellenbedienung.





## 2 Merkmale nachfrageabhängiger Bedienung

Aufgrund der Erfahrungen aus den Pilotprojekten Friedrichshafen und Wunstorf hat KIRCHHOFF (1987) versucht, die unterschiedlichen Formen der Haltestellenbedienung in Betriebsformen zu fassen:



Quelle: MOBINET-Abschlussbericht zum Arbeitsbereich A (2003)

Abb. 2-1: Betriebsformen mit unterschiedlicher Art der Haltestellenbedienung

Die dargestellten Betriebsformen haben unterschiedliche Merkmale hinsichtlich:

- Lage und Bedienungsmodalitäten der Haltestellen;
- Art der Sicherung der Bedienungs- und Beförderungsqualität;
- Handhabung des Systems durch die Fahrgäste und den Betrieb.

Der Fahrmodus betrifft die Zuordnung von Haltestellen zu Bedienungseinheiten, ihre Bedienungsmodalitäten bei jeder Fahrt oder nur bei Nachfrage sowie die Zeitbindung der Bedienung. Diese Festlegungen haben großen Einfluss auf die Kosten.

Maßgebende Kriterien der Bedienungs- und Beförderungsqualität sind:

- Erschließungswirkung;
- Schnelligkeit/Direktheit;
- Bereitstellung eines ausreichenden Platzangebots.

KIRCHHOFF (1987) hat diese Betriebsformen nicht als isoliert und als alternativ angesehen, sondern hat versucht, sie in Anpassung an die räumliche und zeitliche Ausprägung der Verkehrsnachfrage miteinander zu integrieren. Dabei bezog er auch den herkömmlichen Linienbetrieb mit ein. An die Stelle des Alternativ-Einsatzes trat der Sowohl-als-auch-Einsatz. Diese Integration bezeichnete er als flexiblen Einsatz der verschiedenen Betriebsformen oder einfacher als „flexible Betriebsweise“.

## 2.1 Haltestellenkonfiguration

### Linienbetrieb

Beim Linienbetrieb fahren Fahrzeuge zu festgelegten Zeitpunkten von einer Anfangshaltestelle zu einer Endhaltestelle und bedienen die zwischen der Anfangs- und Endhaltestelle liegenden Zwischenhaltestellen. Unabhängig von der Verkehrsnachfrage werden alle Zwischenhaltestellen bei jeder Fahrt angefahren. Primäre Verkehrsfunktion des Linienbetriebs ist die Verbindungsfunktion.

Um kurze Fahrzeiten zu erreichen, sollte die Linienführung möglichst gestreckt sein. Die Erschließungswirkung für die umgebende Fläche ist dann jedoch verhältnismäßig gering. Der häufig zu beobachtende Versuch, die Erschließungswirkung zu verbessern, indem die Linie mäandriert oder wechselweise über unterschiedliche Routen fährt, geht zu Lasten der Übersichtlichkeit des Linienverlaufs, reduziert die Bedienungshäufigkeit der bei einzelnen Fahrten ausgelassenen Haltestellen und verlängert die Beförderungsdauer. Die Ziele Erschließungswirkung und Schnelligkeit stehen hier in Konflikt zueinander.

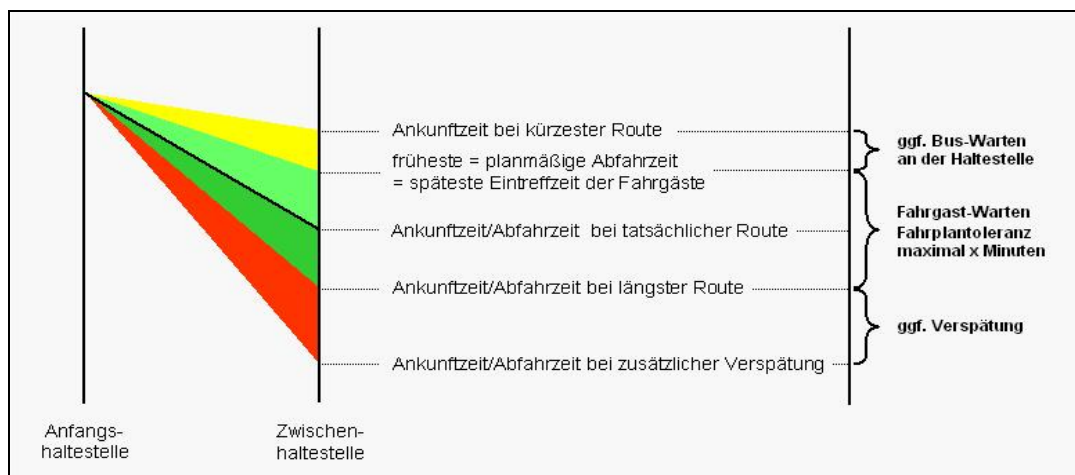
Die Umwegzeit zwischen Anfangs- und Endhaltestelle resultiert aus der Lage der Zwischenhaltestellen und ist das Ergebnis des Linienentwurfs. Wenn eine bestimmte Umwegzeit nicht überschritten werden soll, hat dieser Grenzwert unmittelbaren Einfluss auf die Anordnung der Haltestellen und damit auf den Linienverlauf.

### Richtungsbandbetrieb

Beim Richtungsbandbetrieb fahren Fahrzeuge wie beim Linienbetrieb zu festgelegten Zeitpunkten von einer Anfangshaltestelle zu einer Endhaltestelle. Von den Zwischenhaltestellen werden im Gegensatz zum Linienbetrieb nur diejenigen bedient, an denen Einsteigewünsche oder Aussteigewünsche bestehen. Ggf. können auch einzelne Zwischenhaltestellen fest bedient werden, insbesondere dann, wenn die Route wegen der Form des Straßennetzes zwangsläufig an dieser Haltestelle vorbeiführt. In einem solchen Fall unterteilt sich das Richtungsband in mehrere Teil-Richtungsbander. Trotz dieser eingeschränkten Bedienung der Zwischenhaltestellen erfüllt auch der Richtungsbandbetrieb eine Verbindungsfunktion. Die beim Linienbetrieb erhobene Forderung, die Haltestellen entlang einer möglichst geradlinigen Verbindung zwischen der Anfangs- und Endhaltestelle anzulegen, um eine möglichst kurze Fahrzeit zu erreichen, verliert beim Richtungsbandbetrieb an Bedeutung, weil bei geringer Verkehrsnachfrage nur ein geringer Teil der Zwischenhaltestellen bedient zu werden braucht und der Zeitverlust durch die Bedienung abseits liegender Haltestellen damit gering bleibt. Die Zwischenhaltestellen können deshalb in Form eines Korridors rechts und links der kürzesten Verbindung angeordnet werden. Wegen der geringen Anfahrwahrscheinlichkeit der einzelnen Haltestelle kann die Haltestellendichte gegenüber dem Linienbetrieb erhöht werden, so dass sich die Erschließungsqualität erhöht. Im Gegensatz zum Linienbetrieb führt die Erhöhung der Haltestellendichte bei gleichbleibender Verkehrsnachfrage nicht zu einer Verlängerung der Fahrzeit zwischen Anfangs- und Endhaltestelle.

Ein Richtungsbandbetrieb kann auch als „Linienbetrieb mit nachfragegesteuerten Abweichungen“ bezeichnet werden. Die jeweils zu fahrende Route und die daraus resultierende Fahrzeit ergeben sich aus den zufällig vorhandenen Fahrtwünschen. Die Fahrzeit zwischen der Anfangshaltestelle und den folgenden Haltestellen bekommt damit eine stochastische Komponente. Sie weist Schwankungen auf, die nicht nur aus Fahrzeitschwankungen zwischen benachbarten Haltestellen resultieren, sondern auch aus Schwankungen aufgrund der Zufälligkeit von Größe und Struktur der Verkehrsnachfrage.

Um die Schwankungen in den Abfahrtszeiten nicht zu groß werden zu lassen, wird eine frühest zulässige Abfahrtszeit definiert (= im Fahrplan angegebene Abfahrtszeit), die ein früher ankommendes Fahrzeug abwarten muss. Eine spätere Ankunft bei Bedienung vieler vorhergehender Haltestellen ist dann keine Verspätung, sondern eine systemspezifische Fahrplantulanz. Erst danach treten Verspätungen auf. Diese Zusammenhänge sind nachfolgend dargestellt:



Quelle: MOBINET-Abschlussbericht zum Arbeitsbereich A (2003)

**Abb. 2-1:** Definition von Abfahrtszeiten bei nachfrageabhängiger Haltestellenbedienung

Analoges gilt auch für die Umwegzeit zwischen Anfangs- und Endhaltestelle. Sie hängt nicht nur von der Lage der Zwischenhaltestellen ab, sondern auch von der Wahrscheinlichkeit, mit der bestimmte Routen auftreten. Wenn eine bestimmte Umwegzeit nicht überschritten werden soll, so kann diese Forderung wegen des stochastischen Charakters des Richtungsbandbetriebs nicht absolut, sondern nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eingehalten werden. Beim Entwurf eines Richtungsbandes muss die Wahrscheinlichkeit des Auftretens bestimmter Umwegzeiten aus der Lage der Zwischenhaltestellen und der zu erwartenden Größe und Struktur der Verkehrsnachfrage abgeleitet werden. Die Fahrzeitschwankungen und die Umwegzeiten begrenzen die Breite des Richtungsbandes. Wenn bei einer beabsichtigten Haltestellenkonstellation Grenzwerte für die Fahrzeitschwankungen und die Umwegzeiten nicht eingehalten werden können, ist es notwendig, mehrere Fahrzeuge gleichzeitig nebeneinander einzusetzen – in einem solchen Fall entsteht eine Übergangsform zum Sektorbetrieb (s. dort) –, oder das vorgesehene Richtungsband ist in zwei Richtungsbander aufzuteilen, die beide dieselbe Anfangs- und Endhaltestelle aufweisen aber voneinander abweichende Zwischenhaltestellen bedienen.

### **Sektorbetrieb**

Der Sektorbetrieb dient als Zubringer von Fahrten aus der Fläche zu einer herausgehobenen Haltestelle des Netzes, die meist Anschlusspunkt an ein höherrangiges ÖPNV-System ist, sowie in umgekehrter Richtung als Verteiler von Fahrten von einer herausgehobenen Haltestelle in die Fläche. Die Haltestellen in der Fläche werden dabei nur bedient, wenn dort Einsteige- oder Aussteigewünsche bestehen. Im Gegensatz zum Linien- und Richtungsbandbetrieb weist der Sektorbetrieb nur eine aus dem Netz der übrigen Haltestellen herausgehobene Haltestelle auf, die je nach Verkehrsrichtung Anfangs- oder Endhaltestelle der Fahrt ist.

Um die Fahrzeitschwankungen und die Umwegzeiten nicht zu groß werden zu lassen – hier gilt analoges wie beim Richtungsband – muss der Sektor in seinem Winkel begrenzt werden. Diese Begrenzung kann jedoch entfallen, wenn mehrere Fahrzeuge gleichzeitig eingesetzt werden. Sie haben dieselbe Anfangs- oder Endhaltestelle, teilen sich aber die in der Fläche zu bedienenden Haltestellen. Grundsätzlich kann der Sektor bis zu einer Kreisfläche um den Verknüpfungspunkt ausgedehnt werden. Durch die nachfragegesteuerte Überlappung der einzelnen Fahrzeuge über die gesamte Kreisfläche lässt sich sicherlich die wirtschaftlichste Lösung finden. Die Übersichtlichkeit für den Fahrgast und auch für den Betrieb wird dadurch jedoch beeinträchtigt, so dass es ohne ausreichende Erfahrungen ratsam ist, unter Inkaufnahme etwaiger höherer Kosten die Sektorbreite zu begrenzen. Diese Aufteilung auf die einzelnen Fahrzeuge braucht nicht schon offline bei der Planung des Sektors festgelegt zu werden, sondern ergibt sich online bei der Festlegung der Routen für die einzelne Fahrt. Dadurch bleibt das System flexibel. In Zusammenhang mit der Festlegung der Routen ist auch zu ermitteln, wie viele Fahrzeuge für die jeweilige Fahrt parallel zueinander eingesetzt werden müssen (vgl. folgenden Abschnitt „Kapazitätsnachweis“).

Verbindungen der Haltestellen in der Fläche untereinander gehören nicht zum planmäßigen Angebot, sondern ergeben sich nur zufällig, wenn eine entsprechend der Fahrtwünsche gebildete Route über die betreffenden Haltestellen führt. Hierin liegt ein wesentlicher Unterschied zum Richtungsbandbetrieb.

### **Flächenbetrieb**

Beim Flächenbetrieb gibt es keine Anfangs- oder Endhaltestelle, sondern alle Haltestellen sind gleichrangig. Sie werden nur bedient, wenn entsprechende Fahrtwünsche vorliegen. Es gibt auch keine festgelegten Bedienungszeiten, sondern die Bedienung erfolgt schnellstmöglich nach der Anmeldung eines Fahrtwunsches. Bei der Bildung der Fahrtroute wird aus Kostengründen versucht, möglichst viele Fahrtwünsche auf ein Fahrzeug zu bündeln. Diese Bündelung findet ihre Grenze in der Wartezeit zwischen dem Zeitpunkt der Anmeldung eines Fahrtwunsches bis zum Zeitpunkt der Bedienung dieses Fahrtwunsches, dem Umweganteil an der Beförderungsdauer sowie der Kapazität der Fahrzeuge. Diese Größen sind insoweit voneinander abhängig, als dass größere Fahrzeuge nur sinnvoll sind, wenn die beiden anderen Größen genügend Spielraum lassen. Zulässige Wartezeit und Umwegfaktor sind Kriterien der Angebotsqualität. Um Nachfrageschwankungen berücksichtigen zu können, muss eine entsprechende Fahrzeugreserve vorgehalten werden. Der Flächenbetrieb ist für den Fahrgast zwar komfortabler, für den Betreiber jedoch kostenaufwendiger als der Rich-

tungsbandbetrieb und der Sektorbetrieb. Der Flächenbetrieb kommt nur in Frage, wenn die Verkehrsnachfrage gering ist und keine räumliche Strukturierung auf herausgehobene Haltestellen aufweist.

## 2.2 Steuerung des Betriebsablaufs

Die Steuerung des Betriebsablaufs dient dazu, die dem Fahrgast im Fahrplan angebotene Bedienungs- und Beförderungsqualität sicherzustellen. Die wichtigsten Merkmale der angebotenen Qualität sind:

- Beförderungsdauer (von der planmäßigen Abfahrt an der Einstiegshaltestelle bis zu Ankunft an der Ausstiegshaltestelle),
- Bereitstellung einer ausreichenden Anzahl von Plätzen in den Fahrzeugen.

Beim herkömmlichen Linienbetrieb sind die zu fahrenden Routen, die Abfahrts- und Ankunftszeiten an den Haltestellen sowie die Größe des eingesetzten Fahrzeuges im Fahrplan festgelegt. Dies geschieht vor Betriebsbeginn unter Berücksichtigung von Umfang und Struktur der Verkehrsnachfrage sowie dem zu erwartenden Fahrtablauf (bei straßengebundenem ÖPNV unter Berücksichtigung der Störungen durch den allgemeinen Straßenverkehr). Dennoch können Störungen auftreten. Um solche Störungen frühzeitig zu erkennen und die Störfolgen zu minimieren, werden Betriebsleitsysteme eingesetzt. Die Wirkungsweise von Betriebsleitsystemen im Linienbetrieb ist nicht Gegenstand der vorliegenden Thematik. Auf sie wird deshalb nicht näher eingegangen.

Bei der nachfrageabhängigen Bedienung der Haltestellen kommen zu solchen Störungen weitere Unsicherheiten hinzu, die aus der Ausrichtung des Fahrtablaufs an der Verkehrsnachfrage resultieren und die angebotene Bedienungs- und Beförderungsqualität beeinträchtigen können: Der Verlauf der Route sowie die daraus resultierenden Abfahrts- und Ankunftszeiten an den Haltestellen liegen bei den nachfragegesteuerten Betriebsformen nicht planmäßig fest, sondern müssen aufgrund der aktuellen Fahrtwünsche erst gebildet werden. Dies erfolgt mit Hilfe spezieller Steuerungsverfahren, die in ihrer Funktion über die erwähnten Betriebsleitsysteme hinausgehen.

Bei der Verarbeitung der Fahrtwünsche und den daraus abgeleiteten Routen muss sichergestellt werden, dass vorgegebene Grenzwerte für die Beförderungsdauer bzw. entsprechende Umwegzeiten nicht oder nur mit einer geringen Wahrscheinlichkeit überschritten werden. Diese Forderung schränkt die Bedienungsfähigkeit von Fahrtwünschen ein.

Bei einer höheren Verkehrsnachfrage müssen im Sektor- und Flächenbetrieb wegen deren geringen Bündelungsfähigkeit zusätzliche Fahrzeuge eingesetzt werden. Die Bereitstellung einer ausreichenden Anzahl von Fahrzeugen ist umso kritischer, je geringer das Fassungsvermögen der Einzelfahrzeuge ist. Durch den generellen Einsatz größerer Fahrzeuge ist dieses Problem nicht zu lösen, denn der Einsatz größerer Fahrzeuge ist von vorn herein teurer als der Einsatz kleiner Fahrzeuge.

Eine Möglichkeit, diesen Zielkonflikt zu entschärfen, besteht darin, die Fahrzeuggröße nicht auf seltene Belastungsspitzen auszulegen, sondern bei Überlastungen fallweise zusätzliche Fahrzeuge einzusetzen. Da die ständige Vorhaltung von möglicherweise zusätzlich benötigten Fahrzeugen in etwa gleich teuer ist wie eine von vornherein vorgesehene größere Fahrzeuganzahl oder ein von vornherein vorgesehenes größeres Fahrzeug, erscheint es sinnvoll, bei gelegentlichen Überlastungen Taxis hinzuzuziehen. Dies ist zwar im einzelnen Fall teuer, insgesamt aber billiger, wenn solche Fälle hinreichend selten auftreten. Hierbei handelt es sich um ein Optimierungsproblem.

Steuerungstechnisch ist der Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge (Taxis) bei drohenden Überlastungen einfach: Dadurch, dass bei einer nachfrageabhängigen Bedienung der Haltestellen alle Fahrtwünsche angemeldet werden müssen, erkennt die Steuerungszentrale bei der Routenbildung drohende Überlastungen und kann rechtzeitig Taxis ordern.

Grundlagen der Steuerung der Fahrten sind die Fahrtwünsche der Fahrgäste. Ein Fahrtwunsch ist gekennzeichnet durch die Einstiegshaltestelle, die Ausstiegshaltestelle und die gewünschte Abfahrzeit. Beim Flächenbetrieb sind die Abfahrzeiten frei wählbar und werden im Rahmen der zugesagten maximalen Wartezeiten erfüllt. Beim Richtungsbandbetrieb und beim Sektorbetrieb sind sie mit vorgegebenen Toleranzen im Fahrplan festgelegt.

### **Richtungsbandbetrieb**

Beim Richtungsbandbetrieb müssen vor Beginn einer Fahrt, d.h. vor Abfahrt von der Anfangshaltestelle, alle Einstiegshaltestellen bekannt sein. Die Anmeldung erfolgt durch den Fahrgast über Telefon oder Internet an die Steuerungszentrale. In der Steuerungszentrale wird unmittelbar vor der Abfahrt an der Anfangshaltestelle aus den gewünschten Einstiegshaltestellen und den ggf. schon vorliegenden gewünschten Ausstiegshaltestellen die Fahrtroute für die betroffene Fahrt gebildet. Die gewünschte Ausstiegshaltestelle kann entweder zusammen mit der Einstiegshaltestelle angemeldet oder dem Fahrer beim Einstieg in das Fahrzeug genannt werden. Der Fahrer gibt eine solche Anmeldung in sein Terminal ein. Durch den Fahrzeugrechner wird der Ausstiegswunsch in die Fahrzeugroute eingefügt und bei Abfahrt von der betreffenden Haltestelle automatisch an die Steuerungszentrale übertragen. Die Fahrtroute wird durch den Fahrzeugrechner verändert, wenn beim Einstieg eine Ausstiegshaltestelle genannt wird, die noch nicht in der bisherigen Route enthalten ist. Diese Routenkorrektur ist möglich, weil die Grenzwerte für die Beförderungsdauer nicht online überwacht werden, sondern bereits bei der Konfiguration des Richtungsbandes berücksichtigt sind. Lediglich hinsichtlich der Fahrzeugkapazität muss der Steuerungsrechner in der Leitzentrale bei jeder Nachmeldung einer Ausstiegshaltestelle prüfen, ob eine Überlastung des Fahrzeugs droht, und im Überlastungsfall ein zusätzliches Fahrzeug ordern.

Die Bildung von Fahrtrouten ist beim Richtungsbandbetrieb recht einfach: Beim Entwurf des Richtungsbandes wird zwischen der Anfangs- und Endhaltestelle die kürzeste Route ermittelt, die über alle dem Richtungsband angehörenden Haltestellen verläuft. Damit ergibt sich eine Reihenfolge der Haltestellen über die Maximalroute. Bei der online Bildung der zu fahrenden Route werden alle nicht zu bedienenden Haltestellen herausgestrichen und die verbleibenden Haltestellen mit Fahrgastwechsel der Reihe nach bedient (vgl. KIESLICH, 1999). Damit ergibt sich zwar nicht die mathe-

matisch kürzeste Route, es entsteht aber eine Route, die der kürzesten Route hinreichend nahe kommt und für die praktische Anwendung ausreicht.

### **Sektorbetrieb**

Beim Sektorbetrieb muss nach den beiden Fahrtrichtungen unterschieden werden: Vom Verknüpfungspunkt zum höherrangigen System aus in die Fläche und umgekehrt. Für die erstgenannte Richtung ist der Verknüpfungspunkt definitionsgemäß einzige Einsteigehaltestelle. Vor Abfahrt von dieser Einsteigehaltestelle müssen alle gewünschten Ausstiegshaltestellen bekannt sein. Im Gegensatz zum Richtungsband wird der Sektor von mehreren Fahrzeugen gleichzeitig bedient, und vor Abfahrt muss die Aufteilung der Fahrtwünsche auf die verschiedenen Fahrzeuge vorgenommen werden. Dies kann nur in der Steuerungszentrale geschehen. Da es sich um Rückfahrten nach Hause handelt, werden die gewünschten Ausstiegshaltestellen von den Fahrgästen i.d.R. nicht telefonisch angemeldet, sondern erst beim Einstieg genannt. Die Fahrer müssen die gewünschten Ausstiegshaltestellen an die Zentrale senden und erhalten von dort die auf ihr Fahrzeug entfallenden Fahrten zurück. Es wird bei diesen Verfahren nicht zu vermeiden sein, dass einige Fahrgäste mit Zielen, die in Grenzbereichen der einzelnen Fahrzeuge liegen, das Fahrzeug wechseln müssen.

Für die Fahrt aus der Fläche zum Verknüpfungspunkt gibt es keine definierte Anfangshaltestelle. Damit ist für jedes Fahrzeug die Endhaltestelle bei der Fahrt in die Fläche gleichzeitig Anfangshaltestelle für die Rückfahrt. Sofern von dieser Haltestelle kein Fahrtwunsch für die Rückfahrt vorliegt, ist eine Leerfahrt zur nächsten nachgefragten Haltestelle erforderlich; dies kann im Extremfall auch der Verknüpfungspunkt selber sein. In diesem Fall findet eine Leerfahrt zurück zum Verknüpfungspunkt statt.

Die Ermittlung der Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge ist keine Steuerungs- sondern eine Entwurfsaufgabe. Hierfür muss der Verkehrsablauf mit einer gemessenen oder geschätzten Verkehrsnachfrage simuliert werden.

### **Flächenbetrieb**

Beim Flächenbetrieb ist die Steuerung schwieriger, weil es keine Anfangs- oder Endhaltestelle gibt, sondern alle Haltestellen gleichrangig sind, und der Betrieb kontinuierlich ohne Bindung an bestimmte Abfahrtszeiten abläuft. Aus diesen Gründen reicht es nicht aus, dass bei der Anmeldung eines Fahrtwunsches zunächst nur die gewünschte Einstiegshaltestelle genannt wird und die gewünschte Ausstiegshaltestelle erst beim Einstieg in das Fahrzeug mitgeteilt wird. Der Fahrtwunsch muss vielmehr insgesamt angemeldet werden.

Grundsätzlich sind für die Steuerung des Flächenbetriebs Verfahren des Operation Research geeignet. Angesichts der Komplexität der Randbedingungen sind Optimierungsverfahren aber nicht praktikabel, so dass heuristische Verfahren zum Einsatz kommen müssen.

Für einen Fahrtwunsch wird in einem ersten Schritt untersucht, welches der schon eingesetzten Fahrzeuge in der Lage ist, neben den schon in Beförderung befindlichen Fahrtwünschen und den schon auf das Fahrzeug gebuchten Fahrtwünschen den neuen Fahrtwunsch im Rahmen der zulässi-

gen Wartezeiten an den Haltestellen und der zulässigen Umwege sowie der Kapazität der Fahrzeuge mit zu erledigen. Wenn ein solches Fahrzeug vorhanden ist, wird der neue Fahrtwunsch in die Route dieses Fahrzeugs eingefügt und die Qualität der Lösung analysiert. Dem Fahrzeug mit dem besten Ergebnis wird der neue Fahrtwunsch endgültig zugeordnet. Wird kein Fahrzeug gefunden, das die o.g. Bedingungen erfüllt, muss für den neuen Fahrtwunsch ein zusätzliches Fahrzeug eingesetzt oder – was selbstverständlich so weit wie möglich vermieden werden sollte – der Fahrtwunsch abgelehnt werden. Der Fahrgast ist anschließend über das Ergebnis, d.h. die vorgesehene Abfahrtszeit an der Einstieghaltestelle sowie – wegen der Vielzahl der kreuz und quer fahrenden Fahrzeuge – die Nummer des ihn befördernden Fahrzeugs zu informieren. Sofern der Fahrgast das Angebot z.B. wegen der späteren Abfahrtszeit nicht annimmt, ist der gesamte Dispositionsprozess rückgängig zu machen.

Das Steuerungsverfahren für den Sektorbetrieb liegt hinsichtlich seiner Komplexität zwischen dem Steuerungsverfahren für den Richtungsbandbetrieb und dem Steuerungsverfahren für den Flächenbetrieb. Da es für die Steuerung des Sektorbetriebs nach Kenntnis des Verfassers noch kein praktikables Steuerungsverfahren gibt, ist es Ziel der vorliegenden Arbeit, ein solches zu entwickeln. Dabei wird bezüglich der Anwendung unterschieden nach:

- Sektorbetrieb als Zubringerfunktion zu Verknüpfungspunkten mit höherrangigen ÖPNV-Systemen;
- Sektorbetrieb als Zubringerbetrieb zu Schulen.

Der Unterschied zwischen den beiden Anwendungsfällen ist nicht methodisch-algorithmischer Art sondern nur ein Problem der Größenordnung, der Anzahl der Fahrgäste und des Fassungsvermögens der Fahrzeuge.



### 3 Aufgabenstellung für die Steuerung des Sektorbetriebs

Die Aufgabenstellung für die Steuerung des Sektorbetriebs ist in der nachfolgenden Abbildung schematisch dargestellt:

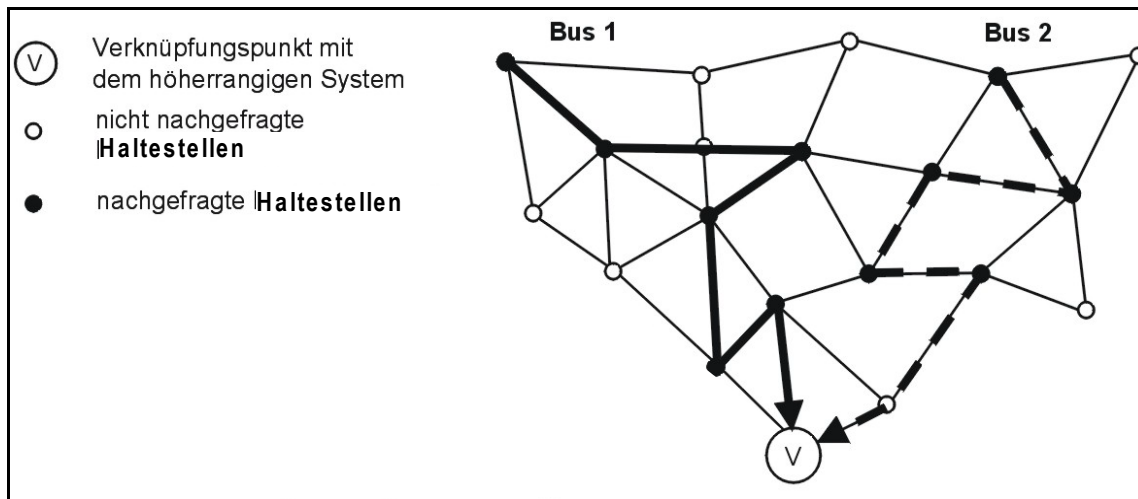


Abb. 3-1: Schema der Steuerung des Sektorbetriebs

Sie besteht darin, Fahrgäste von Haltestellen, die in der Fläche verteilt sind, zu einer zentralen Haltestelle – i.d.R. ein Verknüpfungspunkt mit einem höherrangigen ÖPNV-System – und umgekehrt zu befördern. Dabei wird unterstellt, dass eine Bedienung der Haltestellen zu bestimmten Zeitpunkten erfolgt, die in einem Fahrplan festgelegt und den Fahrgästen bekannt gemacht sind. Im Interesse der Merkbarekeit des Fahrplans sollten die Bedienungszeiten getaktet sein. Bedient werden nur diejenigen Haltestellen, bei denen zu dem betreffenden Bedienungszeitpunkt eine Verkehrsnachfrage besteht. Die Fahrtwünsche müssen von den Fahrgästen unter Angabe der Einstiegs- und Ausstiegshaltestelle und des gewählten Bedienungszeitpunktes rechtzeitig, d.h. mit einer bestimmten Frist vor dem Bedienungszeitpunkt angemeldet werden. Die Abfahrt von den in der Fläche liegenden Haltestellen sowie die Ankunft an diesen Haltestellen können wegen des nachfragegesteuerten Betriebs nicht exakt sondern innerhalb eines Zeitintervalls angegeben werden.

Die Lösung dieser Aufgabe unterteilt sich in die beiden Stufen:

- Ermittlung der Anzahl der für die jeweiligen Bedienungszeitpunkte benötigten Fahrzeuge (off-line),
- Zuordnung der Fahrtwünsche zu den eingesetzten Fahrzeugen und Bildung von Fahrtrouten (on-line).

Die beiden Stufen des Verfahrens laufen nach derselben Algorithmik ab. Der Unterschied besteht darin, dass die Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge in der ersten Stufe ermittelt werden muss und für die zweite Stufe Eingangsgröße ist.

Das Verfahren ist für die beiden Fahrtrichtungen dasselbe: Bei der Fahrtrichtung vom Verknüpfungspunkt aus in die Fläche wird nicht mit Einsteigern, sondern mit Aussteigern gearbeitet.

Bei der Festlegung der Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge müssen Sprünge zwischen benachbarten Bedienungszeitpunkten vermieden werden. Der Unternehmer kann nicht ohne zusätzliche Kosten den Fahrzeugeinsatz ständig verändern. Aus diesem Grund müssen die Ergebnisse jeweils innerhalb der verschiedenen Verkehrszeiten des Tages (HVZ1, NVZ, HVZ2, SVZ) geglättet werden.

Sollte es zum Schluss der Zuordnung nicht mehr möglich sein, die verbleibenden Fahrgäste einem Fahrzeug zuzuordnen, weil die Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge nicht ausreicht, müssen durch die Leitzentrale zusätzliche Fahrzeuge zur Bedienung dieser Haltestelle(n) herbeigeschafft werden. Dies sind im einfachsten Fall Taxis aus dem allgemeinen Taxibetrieb.

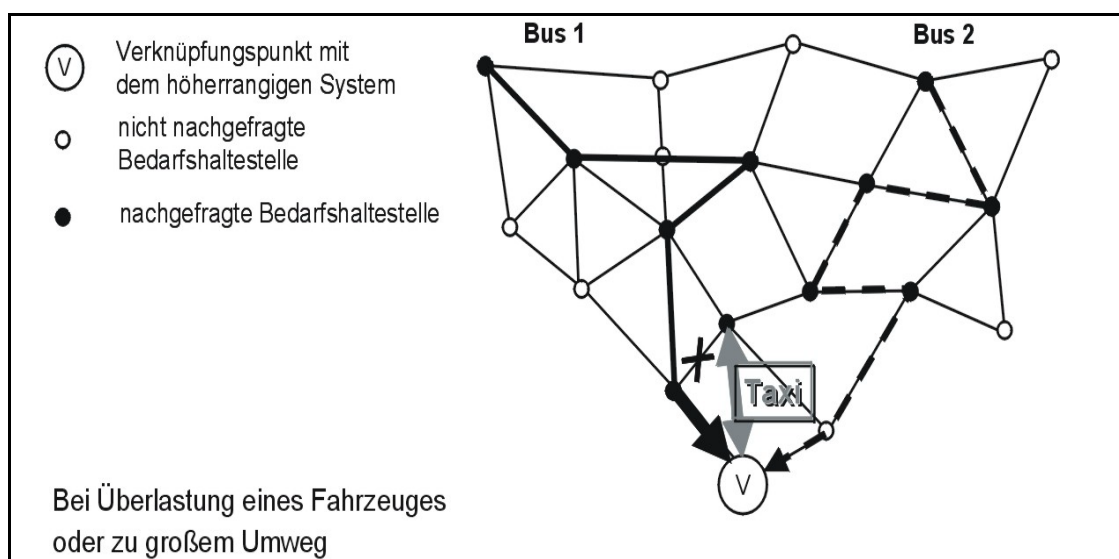


Abb. 3-2: Einsatz eines zusätzlichen Taxis

Trotz des höheren Einzelpreises des Taxi-Einsatzes ist es billiger, wenn dadurch die Bereithaltung eines weiteren ÖPNV-Fahrzeugs eingespart wird, allerdings unter der Voraussetzung, dass ein solches Ereignis selten ist.

Der Sektorbetrieb ist i.d.R. mit einem höherrangigen System, z.B. einem herkömmlichen Linienbetrieb entlang qualifizierter Straßen oder unmittelbar mit einem über das Einsatzgebiet hinausreichenden Schienenpersonennahverkehr (SPNV) verknüpft. Neben der räumlichen Verknüpfung besteht dabei meist auch eine zeitliche Verknüpfung. Sie verläuft i.d.R. in Richtung auf das höchstrangige Zentrum des Einsatzgebietes oder einen Bahnhof des SPNV und umgekehrt.

Die beidseitige zeitliche Verknüpfung bedingt, dass der Sektorbetrieb sowohl an die Ankunftszeit des übergeordneten Systems anknüpft als auch an seine Abfahrtszeit. Aus diesem Grund sind die Umlaufdauer der Fahrzeuge innerhalb des Sektors und damit die Ausdehnung des Sektors begrenzt.

Für die Lösung der o.g. Aufgabe gelten die folgenden Ziele bzw. Randbedingungen:

- Bedienung der Fahrgäste auf möglichst kurzen Wegen,
- Minimierung des betrieblichen Aufwandes für die Beförderung der Fahrgäste,
- Bedienung jeder nachgefragten Haltestelle nur durch ein einziges Fahrzeug,
- Begrenzung der Fahrzeit auf die Zeitdifferenz zwischen Ankunft und Abfahrt des übergeordneten Systems.

Der betriebliche Aufwand setzt sich zusammen aus den Kosten für die Vorhaltung der erforderlichen Fahrzeuge und Fahrer sowie den Kosten für die Fahrleistung der Fahrzeuge. Wegen der Dominanz der Kosten für die Fahrzeuge und die Fahrer muss versucht werden, primär diese Aufwandskomponente möglichst gering zu halten, d.h. mit möglichst wenig Fahrzeugen auszukommen.

Die Bedienung einer Haltestelle durch nur ein Fahrzeug wird als wichtig angesehen, um die Gruppe der dort zusteigenden Fahrgäste nicht aufzusplitten und die bei einer Bedienung durch mehrere Fahrzeuge möglicherweise entstehenden Irritationen zu vermeiden.

Die Zeitdifferenz hängt vom Fahrplan des übergeordneten Systems ab, der seinerseits aus der Netzgeometrie und der Bedienungshäufigkeit resultiert.

Eingangsgrößen sind:

- Anzahl und Lage der Haltestellen,
- Netz der befahrbaren Wege,
- Fahrzeiten zwischen den Haltestellen,
- Größe der einzusetzenden Fahrzeuge (Anzahl der Sitzplätze),
- Bedienungshäufigkeit (z.B. 1-Std-Takt),
- Verkehrsnachfrage an den Haltestellen je Bedienungszeitpunkt.

Die in der Stufe 1 ermittelte Anzahl der benötigten Fahrzeuge ist eine zusätzliche Eingangsgröße für die Stufe 2 der Aufgabenstellung.

Die Verkehrsnachfrage in Form der je Bedienungszeitpunkt an den einzelnen Haltestellen zusteigenden Fahrgäste liegt zu Beginn der Planung i.d.R. nicht vor. Sie ist auch durch Befragungen nicht verlässlich zu ermitteln. Aus diesem Grund muss die Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge zunächst gegriffen werden. Dabei sollte bewusst überdimensioniert werden, um Kapazitätsprobleme in der Anfangsphase zu vermeiden. Sobald über einen gewissen Zeitraum hinweg aus dem laufenden Betrieb Daten über Umfang und Struktur der Fahrtwünsche vorliegen, sollte eine Berechnung der Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge nach der Stufe 1 des Steuerungsverfahrens nachgeholt und die Anzahl der bis dahin eingesetzten Fahrzeuge angepasst, d.h. i.d.R. reduziert werden. Ebenso sind solche Berechnungen neu durchzuführen, wenn sich die Verkehrsnachfrage geändert hat. Durch eine kontinuierliche Erfassung der Fahrtwünsche im laufenden Betrieb werden diese Daten aktuell gehalten.

Ergebnis dieses Zuordnungsprozesses sind folgende Größen:

- Mittlerer Umwegfaktor für die Beförderungsdauer der Fahrgäste,
- Mittlere Abweichung zwischen der im Fahrplan ausgegebenen Abfahrtszeit und der tatsächlichen Abfahrtszeit an der Einstiegshaltestelle,
- Mittlere Auslastung der Fahrzeuge,
- Länge der gefahrenen Routen,
- Zeitbedarf für die Routen.

Die beiden ersten Größen sind Indikatoren für die Bedienungs- und Beförderungsqualität und die beiden nächsten Größen Indikatoren für die Wirtschaftlichkeit des Betriebs. Mit der letztgenannten Größe muss die Bedingung des beidseitigen Anschlusses an das übergeordnete System erfüllt sein.

Da der Grenzwert für den zulässigen Umwegfaktor bei der Planung mehr oder weniger willkürlich gesetzt werden muss, sollte bei der Ermittlung der Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, um ein Gefühl über den Zusammenhang zwischen Kosten (Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge) und Beförderungsqualität (Umwegfaktor) zu bekommen.

Obwohl der Sektorbetrieb zunächst als Teil des allgemeinen ÖPNV gedacht ist, lässt er sich auch für die Abwicklung des Schülerverkehrs nutzen. Der Schulstandort entspricht dabei dem Verknüpfungspunkt mit dem höherrangigen System. Auch hier sollte die Sektorbreite nicht zu groß gewählt werden, um die Übersichtlichkeit zu erhalten.

Für den Schülerverkehr braucht das Steuerungsverfahren nur offline in der Stufe 1 durchgeführt zu werden. Die Verkehrsnachfrage ist in Form der Schüler-Schule-Zuordnung bekannt. Der Anteil der Schüler, die das Fahrrad benutzen (häufig nur bei gutem Wetter) oder von ihren Eltern gefahren werden, lässt sich relativ leicht ermitteln und bei der Abschätzung der Nachfrage berücksichtigen.

Grundsätzlich sind für die Steuerung solcher Steuerungsaufgaben Verfahren der Tourenplanung geeignet. Sie werden hauptsächlich im Güterverkehr verwendet und müssen hier auf den Personenverkehr übertragen werden.

Unter „Tourenplanung“ – oft mit VRP (Vehicle Routing Problem) abgekürzt – versteht man die Ermittlung eines Satzes von Wegen für eine Fahrzeugflotte, die eine Anzahl von Kunden (bzw. Lagern) mit bestellten Waren bedient. Unter Berücksichtigung von Randbedingungen müssen die an einer Sammelstelle entstehenden und endenden Wege so ausgewählt werden, dass die Gesamtkosten so niedrig wie möglich werden. Jeder Kunde muss dabei genau einmal bedient werden. Ferner werden die zu beliefernden Kunden den Fahrzeugen so zugeteilt, dass die Fahrzeugkapazitäten nicht überschritten werden.

Die Steuerung des Sektorbetriebs im ÖPNV erfordert die Lösung folgender Aufgaben:

- Suche des kürzesten Weges von der Einstiegshaltestelle zum Verknüpfungspunkt bzw. umgekehrt,
- Zuordnung der Fahrtwünsche zu Fahrzeugen,
- Bildung der Fahrtrouten für die einzelnen Fahrzeuge.

Die Lösung der erstgenannten Aufgabe ist Grundlage für die Lösung der beiden anderen Aufgaben. Sie stellt eine grundlegende Methode innerhalb des Operation Research dar und findet z.B. Anwendung bei der Routenbildung im Straßenverkehr und im Güterverkehr. Die für die vorliegende Problemstellung infrage kommenden Verfahren werden in Kapitel 4.1 beschrieben.

Die beiden anderen Aufgaben müssen im Zusammenhang gelöst werden. Hierfür findet man Ansätze ebenfalls im Operation Research unter dem Stichwort „Vehicle Routing Problem“. Die einschlägigen Verfahren sind in Kapitel 4.2 dargestellt.

Während für die Suche des kürzesten Weges Verfahren unmittelbar übernommen werden können, müssen die Ansätze des „Vehicle Routing Problem“ für die vorliegende Aufgabenstellung modifiziert und erweitert werden. Dies erfolgt in Kapitel 5, das den methodischen Schwerpunkt dieser Arbeit bildet.

Wie bei den meisten kombinatorischen Problemen ist der Rechenaufwand zur Lösung des VRP sehr groß. Die Anzahl der benötigten Rechenoperationen wächst meist überproportional mit dem Systemumfang. Zahlreiche Problemlösungstechniken (Heuristiken, genaue mathematische Programmierung und kombinatorische Annäherungen) sind zur Lösung des VRP vorgeschlagen worden. Die erfolgreiche Anwendung der genauen mathematischen Programmierungen ist bis jetzt jedoch nur auf kleine Probleme begrenzt. Aus diesem Grund sind effiziente heuristische Methoden zur Lösung solcher Probleme besser geeignet.

Das Verfahren wird in Kap. 6 an einem Beispiel des allgemeinen ÖPNV und der Schülerbeförderung angewendet. Dabei wird auch eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, die zeigt, welche Auswirkungen eine Veränderung der Randbedingung des maximal zulässigen Umwegs auf die Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge und die Länge der zu fahrenden Route hat.



## 4 Analyse bestehender Verfahren

### 4.1 Algorithmen zur Suche des kürzesten Weges

Im Bereich der Logistik hat man häufig mit Problemen zu tun, die sich mit der Routesuche befassen. Zur Lösung solcher Probleme (z.B. Single Source- und Fixkosten-Transportprobleme, Traveling Salesman-, Briefträger- und Tourenplanungsprobleme) werden Verfahren der linearen, kombinatorischen oder nichtlinearen Optimierung genutzt. Nur ein kleiner Teil der Probleme lässt sich exakt lösen. Hierfür eignen sich vorwiegend Branch-and-Bound Verfahren. Bei den meisten Problemen muss man sich jedoch mit suboptimalen Lösungen begnügen, die mit Hilfe von heuristischen oder metaheuristischen Verfahren erreicht werden können.

#### 4.1.1 Branch-and-Bound-Verfahren

##### Branching (Verzweigen von Problemen)

Die Branch-and-Bound Technik ist eine „*divide-et-impera*“ Methode, die ein Problem  $P_0$  in einer Reihe von Teilproblemen  $P_1, P_2, \dots, P_k$  unterteilt, und getrennt löst. Jedes Teilproblem  $P_i$  ( $i = \{1, 2, \dots, k\}$ ) besitzt weniger zulässige Lösungen als  $P_0$ .

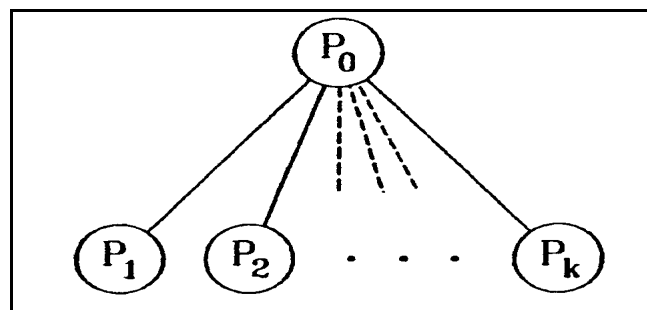
Für die Menge aller zulässigen Lösungen  $L(P_i)$  jedes Teilproblems  $P_i$  muss die Beziehung

$$L(P_0) = \bigcup_{i=1}^k L(P_i) \quad (1)$$

gelten. Um rechenaufwendige Komplexität zu sparen, sollten die Lösungsmengen  $L(P_i)$  disjunkt sein, d.h. es sollte gelten

$$L(P_i) \cap L(P_j) = \emptyset \quad \forall i, j = 1, \dots, k \text{ mit } i \neq j$$

Normalerweise lassen die Probleme eines solchen Verzweigungsprozesses sich in Form eines Entscheidungsbaums darstellen:



Quelle: Domschke (1997)

Abb. 4-1: Verzweigen eines Problems

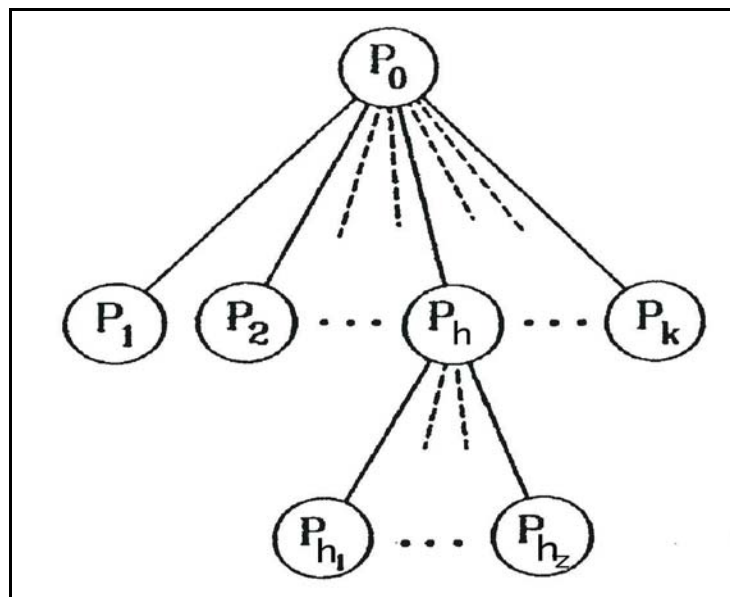
Dieser Prozess ist iterativ: d.h. jedes Teilproblem  $P_i$  kann weiter in den Teilproblemen  $P_h$  zerlegt werden, für deren Lösungsmengen die Beziehungen

$$L(P_i) = \bigcup_{h=1}^z L(P_h)$$

und möglichst auch

$$L(P_{h_1}) \cap L(P_{h_2}) = \emptyset \quad \forall h_1, h_2 = 1, \dots, z \text{ mit } h_1 \neq h_2$$

erfüllt sind.



Quelle: Domschke (1997)

Abb. 4-2: Zusätzliche Verzweigung eines Problems

Ein Problem ist vollständig verzweigt, wenn es so in Teilprobleme zu zerlegen ist, dass die Bedingung (1) gilt. Alle Probleme eines Lösungsbaumes  $T$ , die noch nicht vollständig verzweigt wurden, bezeichnet man als Endprobleme von  $T$ .

$T$  sei ein Lösungsbaum eines Problems  $P_0$ . Die Vereinigung der zulässigen Lösungen aller Endprobleme von  $T$  ist  $L(P_0)$ . Die beste zulässige Lösung dieser Gruppe ist die optimale Lösung von  $P_0$ .

### **Bounding (Ermittlung von Schranken und Ausloten von Problemen)**

Falls der Verzweigungsprozess fortgesetzt wird, bis jedes Endproblem höchstens noch eine zulässige Lösung besitzt, bezeichnet man ihn als vollständige Enumeration aller zulässigen Lösungen von  $P_0$ .

Meist ist aber eine so weitgehende Verzweigung nicht erforderlich. Um die Anzahl der Kalkulationen so weit wie möglich zu reduzieren, berücksichtigt man im Laufe eines B&B-Verfahrens bestimmte Schranken für den Wert einer optimalen Lösung von  $P_0$  bzw. von Teilproblemen  $P_h$ .



In einer Minimierungsoperation sind folgende Schranken zu unterscheiden:

- Der Wert  $\bar{F}$  der aktuell besten (d.h. der besten bis jetzt gefundenen) zulässigen Lösung von  $P_0$  ist eine obere Schranke für den Wert der optimalen Lösung von  $P_0$ .
- Für jedes Problem  $P_h$  ( $h=1,2,\dots, z$ ) kalkuliert man eine untere Schranke  $\underline{F}_h$  für den Wert  $F_h^*$  der optimalen Lösung von  $P_h$ , d.h. es gilt  $\underline{F}_h \leq F_h^*$ .

Eine untere Schranke  $\underline{F}_h$  für ein Problem  $P_h$  lässt sich wie folgt kalkulieren: Man relaxiert eine oder mehrere Nebenbedingungen von  $P_h$  so, dass das dadurch entstehende Problem  $P'_h$  mit deutlich geringerer Komplexität als  $P_h$  gelöst werden kann.

Durch das Löschen der Nebenbedingungen wird die Lösungsmenge  $L(P_h)$  auf  $L(P'_h)$  erweitert. Da  $L(P_h) \subseteq L(P'_h)$  ist, stellt der Wert der optimalen Lösung von  $P'_h$  eine untere Schranke  $\underline{F}_h$  für  $F_h^*$  dar. Ein solches Problem bezeichnet man als Relaxation oder als relaxiertes Problem von  $P_h$ . Der Verzweigungsprozess lässt sich durch die Lösung relaxierter Probleme und die Ermittlung von oberen und unteren Schranken beschränken.

$P'_h$  sei die gebildete Relaxation eines beliebigen Problems  $P_h$ . In folgenden Fällen ist eine weitere Verzweigung von  $P_h$  nicht mehr notwendig:

- Falls die optimale Lösung von  $P'_h$  keinen niedrigeren  $F_h \geq \bar{F}$  als die aktuell beste zulässige Lösung von  $P_0$  besitzt, gilt dasselbe auch für die optimale Lösung von  $P_h$ .
- Für die optimale Lösung von  $P'_h$  wird eine zulässige und damit auch optimale Lösung von  $P_h$  gefunden, deren Zielfunktion  $\underline{F}_h$  kleiner als  $\bar{F}$  ist. In diesem Fall wird  $\bar{F} := \underline{F}_h$  gesetzt und die erhaltene Lösung als aktuell beste Lösung von  $P_0$  gespeichert.
- Falls  $P'_h$  keine zulässige Lösung besitzt, ist auch  $L(P_h) = \emptyset$ .

Liegt einer dieser drei Fälle vor, bezeichnet man das Problem als ausgelotet. Eine weitere Verzweigung findet nicht statt. Sind alle Endprobleme ausgelotet, endet das B&B Verfahren. Die beste Lösung, die bis dahin ermittelt worden ist, stellt die optimale Lösung dar.

Die Vorteile dieser Methode sind:

- Es wird die optimale Lösung des Problems berechnet,
- die Anzahl der Rechenoperationen ist begrenzt,
- eine Zwischenlösung ist eventuell verfügbar.

Die Nachteile sind:

- Die Lösungsdauer hängt von der Suchstrategie ab,
- es besteht die Gefahr, alle Möglichkeiten durchspielen zu müssen (völlige Enumeration),
- die Suchzeit ist ggf. zu lang, um das Ergebnis noch sinnvoll verwenden zu können.

Vor allem wegen des letzten Nachteils benutzt man heuristische Verfahren.

### 4.1.2 Heuristische Verfahren

Das Wort „heuristisch“ kommt vom griechischen Verb „*ηευρισκειν*“ (heuriskein = herausfinden). Heuristiken werden vor allem benutzt, um Probleme zu lösen, deren Lösungsräume sehr groß sind, und deswegen keine analytische Lösung möglich ist. Der Nachteil der meisten Heuristiken ist, dass sie nur eine sub-optimale Lösung liefern und kein Nachweis der Lösungsgüte relativ zum globalen Optimum gegeben werden kann.

Nach DOMSCHKE (1997) lässt sich die Menge der heuristischen Verfahren in die folgenden wesentlichen Klassen unterscheiden:

- Eröffnungsverfahren,
- Lokale Suchverfahren / Verbesserungsverfahren,
- Unvollständig ausgeführte exakte Verfahren,
- Relaxationsbasierte Verfahren.

#### Eröffnungsverfahren

Mittels Eröffnungsverfahren werden zulässige Anfangslösungen bestimmt. Die Güte dieser Anfangslösungen ist häufig von der Art und Weise des Verfahrens und vom investierten Rechenaufwand abhängig. Die Anfangslösungen werden anschließend durch lokale Suchverfahren oder exakte Verfahren verbessert. Im Rahmen von B&B-Verfahren werden Eröffnungsverfahren sowohl zur Bestimmung einer zulässigen Lösung als auch zur Ermittlung von Schranken eingesetzt.

Eröffnungsverfahren teilt man in zwei Kategorien (DOMSCHKE, 1997):

- Greedy oder myopisch sind Verfahren, die in jedem Verfahrensschritt versuchen, nach größtmöglicher Verbesserung des Zielfunktionswertes zu streben.
- Das Gegenteil sind vorausschauende Eröffnungsverfahren, die in jedem Schritt kalkulieren, welche Modifizierungen in den nachfolgenden Schritten zur Verbesserung der erzielbaren Lösungsgüte führen.

#### Lokale Suchverfahren / Verbesserungsverfahren

Die lokalen Suchverfahren beginnen mit einer Lösung des Problems, die entweder zufällig oder mit der Hilfe eines Eröffnungsverfahrens kalkuliert wurde. In jeder Iteration verbessert das Verfahren die in Moment beste Lösung  $x_1$  in einer Lösung  $x_2$  der Nachbarschaft  $\mathcal{N}(x_1)$ .

Sind  $v$  das Verfahren,  $S$  der Definitionsbereich,  $x_1$  und  $x_2$  zwei verschiedene Lösungen des Problems und  $\mathcal{N}(x_1)$  die Nachbarschaft der Lösung  $x_1$ , mit  $x_2 \in \mathcal{N}(x_1)$ , so heißt dies:

$$v: S \rightarrow v(S) : x_1 \mapsto x_2 \in \mathcal{N}(x_1) \subseteq v(S)$$

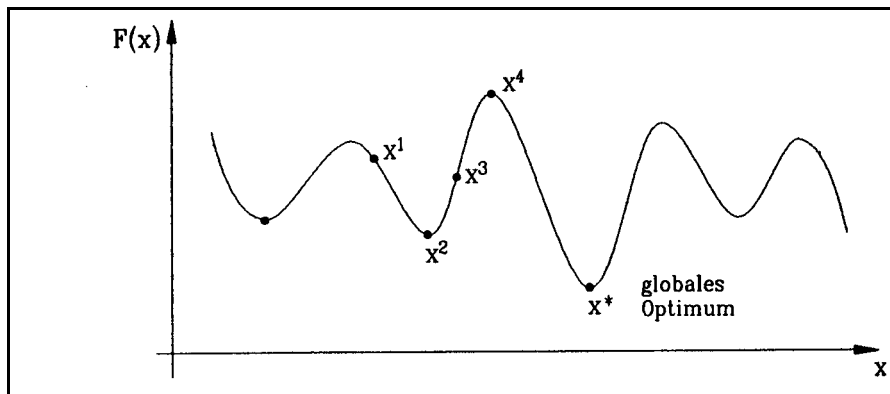
Zwei bekannte Vorgehensweisen in Verbesserungsverfahren sind das Vertauschen und das Verschieben von Elementen innerhalb einer bestimmten Reihenfolge.

Die Nachbarschaft kann zufällig oder systematisch durchsucht werden. Im letzten Fall folgt die Systematik einer vorgegebenen Reihenfolge der Numerierung oder einer Prioritätsregel.

Das Ziel eines Verbesserungsverfahrens ist es, eine Lösung in der Nachbarschaft zu finden, die einen besseren Zielfunktionswert hat. Als Auswahlstrategie hat man normalerweise zwei Möglichkeiten: Entweder wird die erste verbessernde Lösung gewählt („first fit Strategie“), oder die Nachbarlösung wird vollständig untersucht, und die Lösung gewählt, die zur größten Verbesserung des Zielfunktionswerts führt („best fit Strategie“).

Verbesserungsverfahren enden, sobald in einer Iteration keine verbessernde Nachbarlösung mehr gefunden wird. Diese gefundene Lösung nennt man ein lokales Optimum. Der Zielfunktionswert eines lokalen Optimums ist per definitionem nicht besser als der eines globalen Optimums. Auf dem Weg vom lokalen zum globalen Optimum müssen deswegen auch schlechtere Lösungen als das lokale Optimum zugelassen werden. Heuristiken, die diese Möglichkeit haben, nennt man lokale Suchverfahren.

Den Unterschied zwischen lokalen Suchverfahren und Verbesserungsverfahren mit Hilfe des nächsten Bildes (DOMSCHKE, 1997) demonstriert, in dem der Verlauf einer zu minimierenden Funktion  $F(x)$  in Abhängigkeit von einer Funktion  $x$  dargestellt wird. Wenn die erste Suche beim Punkt  $x^1$  landet, dann kann ein Verbesserungsverfahren bis zur Lösung  $x^2$  gehen. Um das globale Optimum  $x^*$  zu kalkulieren, ist ein lokales Suchverfahren notwendig.



Quelle: Domschke (1997)

Abb. 4-3: Definition eines globalen Optimums

Eröffnungs- und lokale Suchverfahren lassen sich in deterministische und stochastische Verfahren unterteilen. Mit denselben Ausgangsdaten ergibt sich bei einem deterministischen Verfahren auch bei mehrfacher Anwendung immer dieselbe Lösung; Demgegenüber haben stochastische Verfahren immer zufällige Komponenten, die in der Regel bei wiederholter Anwendung des Verfahrens zu unterschiedlichen Lösungen führen.

Um die Güte der kalkulierten Lösung abschätzen zu können, gibt es normalerweise zwei verschiedene Methoden:

- Man testet die zu erwartende mittlere Abweichung des Zielfunktionswertes vom bekannten Optimum oder von der besten bekannten Lösung. Das Problem dieser Methode ist, dass es Einzelfälle geben kann, in denen das Verfahren eine überdurchschnittlich große Abweichung hat. Dies würde zu einer falschen Auslegung der Güte der Ergebnisse des Verfahrens führen;
- Man berechnet, welche prozentuale Abweichung des Zielfunktionswertes es in Bezug auf den schlechtesten erwarteten Fall (Worst Case Analyse) gibt. Das Problem liegt hier in der Unwahrscheinlichkeit der denkbar ungünstigen Problemlage, auf welche die Worst-Case-Schranke gegründet wird.

### Unvollständig ausgeführte exakte Verfahren

Als heuristisches Verfahren gilt auch ein unvollständig ausgeführtes exaktes Verfahren. Ein B&B-Verfahren kann vor seinem Ende abgebrochen werden. So ist es z.B. denkbar, dass man Teilprobleme von der Liste ausschließt, wenn sie nicht „viel“ besser sind als die aktuelle Lösung oder dass man ein Rechenzeitlimit setzt. DOMSCHKE (1997) erklärt den Vorteil einer solcher Methode gegenüber den oben geschilderten Heuristiken folgendermaßen: „Bricht man ein B&B-Verfahren ab, nachdem zulässige Lösungen ermittelt wurden, aber noch bevor alle Endprobleme des Lösungsbaumes ausgelotet sind, so ergibt die Differenz aus der aktuellen oberen Schranke  $\bar{F}$  und der kleinsten unteren Schranke  $\underline{F}$  aller nicht ausgeloteten Teilprobleme ein Maß für die maximale Abweichung der aktuell besten Lösung vom Optimum“.

### Relaxationsbasierte Verfahren

In vielen Fällen lässt sich aus der Lösung einer Relaxation eine zulässige Lösung des Ausgangsproblems gewinnen. Ergänzt oder verändert man die Lösungselemente, können bislang verletzte, relaxierte Bedingungen wieder erfüllt werden.

Das beste Beispiel dieser Technik ist die sogenannte Lagrange-Relaxation. DOMSCHKE (1997) sagt dazu: „Gemessen an heuristischen Eröffnungs- und lokalen Suchverfahren besteht auch hier ein Vorteil darin, dass durch Vorhandensein von unteren Schranken für Zielfunktionswerte die Güte der besten erhaltenen Lösung abgeschätzt werden kann“.

### 4.1.3 Heuristische Metastrategien

Der Unterschied zwischen einem heuristischen Verfahren und einer heuristischen Metastrategie ist, dass letztere vorübergehend auch Verschlechterung von Lösungen akzeptiert, um zu versuchen, das globale Optimum zu finden. Die bekanntesten Beispiele dieser Strategien sind Simulierte Abkühlung (Simulated Annealing - SA), Tabu Search (TS) und Genetische Algorithmen (GA).

#### Simulierte Abkühlung (SA)

Wie viele Bezeichnungen auf dem Gebiet der Ingenieurwissenschaft kommt der Name dieser Methode aus einer Analogie mit der Physik nämlich dem physikalischen Abkühlungsvorgang in der Thermodynamik. Sie basiert auf einer Methode, die von METROPOLIS et al. im Jahr 1953 entwickelt wurde, um einen Gleichgewichtszustand für große Teilchensysteme bei einer bestimmten Temperatur zu finden.

Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein System, das sich in einem thermodynamischen Gleichgewichtszustand befindet, eine bestimmte Energie  $E$  hat, wird mittels Wahrscheinlichkeitsgesetz von Boltzmann erklärt:

$$\text{Prob}(E) = C \exp(-E/kT), \quad (2)$$

in der  $T$  die Temperatur des Systems,  $k$  die Konstante von Boltzmann und  $C$  eine normalisierende Konstante sind:

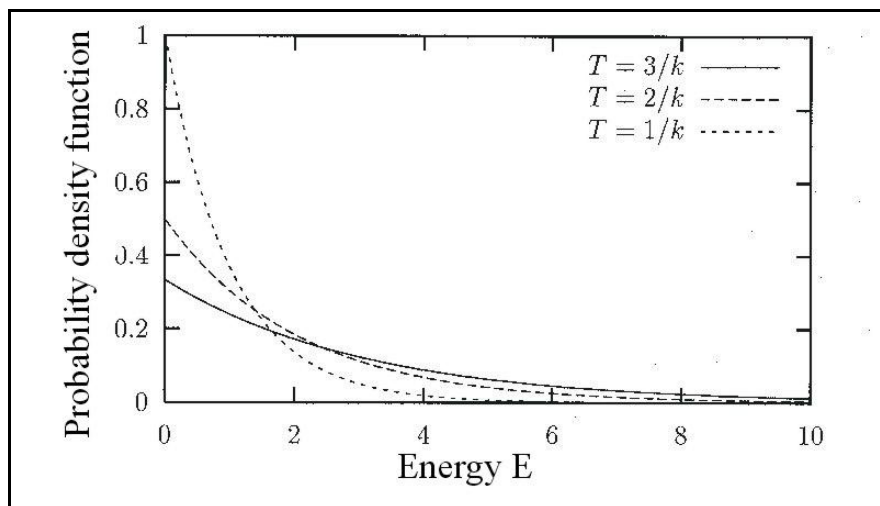


Abb. 4-4: Boltzmann'sches Wahrscheinlichkeitsgesetz

Je niedriger die Temperatur gestellt wird, desto geringer ist die Möglichkeit, dass das System in einer Konfiguration hoher Energie ist. Wenn  $T \rightarrow 0$ , ist das System in seinem Gleichgewichtszustand.

Das Werk von METROPOLIS und seinen Kollegen bestand darin, diese Prinzipien in numerische Kalkulationen einzubauen. Sie haben herausgefunden, dass ein thermodynamisches System seine Konfiguration von einem Zustand  $z_1$  mit Energie  $E_1$  zu einem Zustand  $z_2$  mit Energie  $E_2$  mit einer Wahrscheinlichkeit:

$$p = \min(\exp[-(E_2 - E_1)/kT], 1) \quad (3)$$

ändern kann.

Es ist zu beobachten, dass wenn  $E_2 \leq E_1$ , dann  $p = 1$ . Dies bedeutet, dass jede negative Änderung akzeptiert wird, d.h. das System kann seinen Zustand immer dann ändern, wenn die Energie der neuen Konfiguration kleiner ist als die der vorigen Konfiguration. Das folgende Bild zeigt, die Wahrscheinlichkeit, dass ein neuer Zustand akzeptiert wird, abhängig von  $\Delta E = E_2 - E_1$ , für manche T:

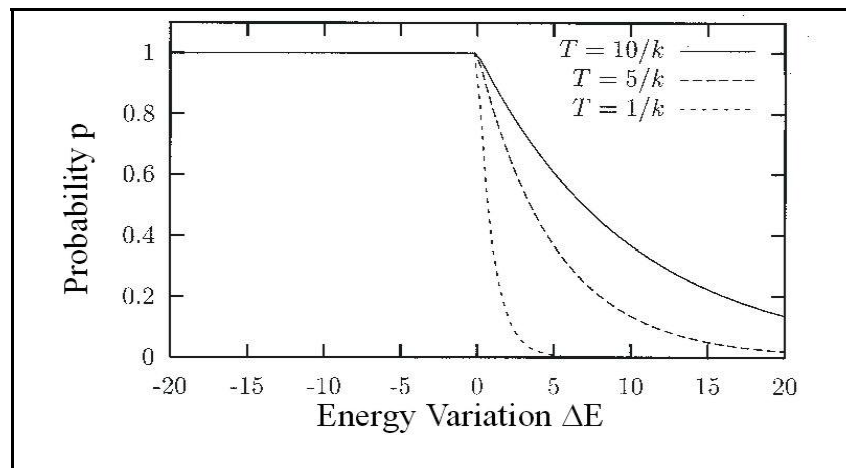


Abb. 4-5: Wahrscheinlichkeit, in Abhängigkeit der Energieänderung des Systems einen neuen Status zu akzeptieren

Je kleiner T ist, desto kleiner ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zustand akzeptiert wird, der die Energie des Systems vergrößert.

Um das Verhalten eines thermodynamischen Systems zu simulieren und den Gleichgewichtszustand zu kalkulieren, ist eine Methode entwickelt worden, die unter dem Namen „Algorithmus von Metropolis“ bekannt ist. Der Algorithmus besteht darin, dem System Störungen aufzulegen, die mit einer von der Energie des Systems abhängigen Wahrscheinlichkeit (3) akzeptiert werden.

KIRKPATRIK hat beobachtet, dass dieser Algorithmus adaptiert werden könnte, um eine größere Anzahl von Minimierungsproblemen zu lösen. Er hat eine Analogie zwischen diesen Problemen und der Abkühlung und Kristallisierung der Materialien herausgefunden.

Um ein Material kristallisieren zu lassen, muss man es erwärmen und danach langsam abkühlen. Wenn der Abkühlungsprozess langsam genug ausgeführt wird, verteilen sich die Moleküle im Form eines perfekten Kristalls. Dies ist der minimale Energiezustand für das System. Falls der Abküh-

lungsprozess schneller ausgeführt wird, fällt die Wahrscheinlichkeit, dass das Kristall perfekt wird, drastisch, und das System erreicht nicht den minimalen Energiezustand. Am wichtigsten ist in diesem Prozess die Geschwindigkeit, mit der das Material abgekühlt wird: Wenn sie niedrig genug ist, haben die Moleküle unabhängig von der Temperatur die Möglichkeit, sich umzuverteilen und einen Gleichgewichtszustand zu erreichen. Diese langsame Abkühlung beschreibt das Konzept von „Annealing“.

Ein beliebiges Minimierungsproblem kann mit Hilfe des Konzeptes des „Annealing“ wie folgt beschrieben werden:

$$\begin{cases} \min E(X) \\ X \in \Omega \end{cases},$$

wobei  $E$  die minimierende Kostenfunktion und  $\Omega$  der Raum der möglichen Konfigurationen des Problems sind.

Die Analogie dieses Problems zu dem Kristallisierungsprozess eines Materials betrachtet die Funktion  $E$  als die Energie eines thermodynamischen Systems und den Raum der möglichen Konfigurationen  $\Omega$  als die Gesamtheit der erreichbaren Zustände.

Um das thermodynamische System zu simulieren, benutzt man den Algorithmus von METROPOLIS, in dem der Ausdruck  $kT$  der Gleichung (3) von einem Kontrollparameter  $T$  ersetzt wird:

$$p = \min(\exp[-\Delta E/T], 1) \quad (4)$$

Obwohl der Parameter  $T$  keine Größe mehr ist, welche die originale physikalische Bedeutung von Temperatur hat, behält er aber auch im informatorischen Feld den ursprünglichen Namen.

Nachdem eine Anzahl von Störungen erzeugt wurde, die das System zu einer Gleichgewichtskonfiguration führen, wird die Temperatur sehr langsam niedriger gestellt, um für jedes  $T$  eine Gleichgewichtskonfiguration des Systems zu finden.

Wie im Kristallisierungsprozess eines Materials, wenn die Temperatur sehr hoch ist und langsam niedriger gestellt wird, gewährleistet es die Anwendung dieser Methode, eine Konfiguration zu erreichen, deren Wert das globale Minimum der zu minimierenden Funktion (4) ist.

Folgendes ist die Grundlage dieses Algorithmus:  $x_1$  sei eine Anfangslösung und  $x_2$  eine Lösung der Nachbarschaft  $N(x_1)$ . Falls der Zielfunktionswert von  $x_2$  besser als der von  $x_1$  ist, wird die Suche mit  $x_2$  fortgesetzt und die Transformation von  $x_2$  zu  $x_1$  akzeptiert. Falls nicht, wird die Transformation nicht sofort abgelehnt, sondern es wird mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit  $P(\Delta, \alpha)$  eine Verschlechterung erlaubt.

$P(\Delta, \alpha)$  ist abhängig von der Größe  $\Delta$  der zu akzeptierenden Verschlechterung und von einem vorgegebenen Temperaturparameter  $\alpha$ . Dieser Parameter wird am Anfang des Verfahrens so gewählt, dass er Verschlechterung des Zielfunktionswertes zu einem bestimmten Prozentsatz erlaubt. Im Laufe des Verfahrens wird er durch die Multiplikation mit einem Parameter  $\beta$  mit  $0 < \beta < 1$  so redu-

ziert (die Temperatur des Systems wird verkleinert), dass am Ende des Verfahrens nur Verbesserungen möglich sind.

$P(\Delta, \alpha)$  sei bei gegebenem Temperaturparameter  $\alpha$  die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Verschlechterung des Zielfunktionswertes um  $\Delta$  Einheiten akzeptiert wird. Es gilt

$$\begin{cases} \lim_{\Delta \rightarrow 0} P(\Delta, \alpha) = 1 \\ \lim_{\Delta \rightarrow \infty} P(\Delta, \alpha) = 0 \end{cases}$$

Die Wahrscheinlichkeit, eine Verschlechterung von  $\Delta$  Einheiten zu akzeptieren, ist umso größer, je größer  $\alpha$  gewählt wird. Je kleiner  $\beta$  gewählt wird, desto schneller reduziert sich die Wahrscheinlichkeit für die Akzeptanz schlechterer Lösungen (das System kühlt schneller ab).

Unabhängig von der Wahl der Parameter empfiehlt es sich immer, mehrere Anfangslösungen zu erzeugen und sie mit SA zu verbessern.



## Tabu Search (TS)

Tabu Search ist eine Optimierungsstrategie, die eine „intelligente“, d.h. nicht erschöpfende Durchforschung des Lösungsraums eines Problems erlaubt. TS-Grundgedanke ist es, zu vermeiden, dass die Suche ein schon beobachtetes lokales Optimum erneut prüft. Tabu Search startet mit einer zulässigen Lösung  $x_1$  und durchsucht die Nachbarschaft von  $x_1$   $\mathcal{N}(x_1)$  nach Verbesserungsmöglichkeiten. Wenn  $x_1$  ein lokales Optimum ist, haben per definitionem alle Angehörigen der Nachbarschaft  $\mathcal{N}(x_1)$  einen Wert schlechter als  $x_1$ . In TS trifft man die Wahl, die Lösung  $x_2$  so zu bewegen, dass die Verschlechterung die kleinste ist. Diese Methode wird „Prinzip des steepest descent / mildest ascent“ genannt. Falls man sich von  $x_1$  nach  $x_2$  bewegt und die Nachbarschaft  $\mathcal{N}(x_2)$  exploriert, ist es ziemlich wahrscheinlich, dass die beste Lösung in  $\mathcal{N}(x_1)$   $x_2$  ist, d.h. die Lösung, von der man einen Fluchtversuch unternimmt.

Um zu vermeiden dass man auf eine bereits analysierte Lösung zurückspringt, speichert man die letzte ausgeführte Operationen in einer Liste. Mit Hilfe dieser Liste wird es möglich, für eine bestimmte Zeit zu verbieten, eine schon untersuchte Lösungen erneut zu analysieren. Bei dieser Technik wird die Methode  $k$  sehr relevant, die dazu dient, die Nachbarschaft einer Lösung zu definieren. Es ist deswegen korrekt, die Nachbarschaft einer Lösung  $x$  mit  $\mathcal{N}(x, k)$  zu bezeichnen.

Die Tabu Liste ist eine Schlange, in der bei jedem Schritt diejenige Operation gestrichen wird, die am längsten der Schlange angehört. Der ideale Umfang einer Tabu List lässt sich nur schwer bestimmen. Falls sie zu lang ist, zwingt sie dazu, die Liste unnötig lange zu durchzusuchen, obwohl es sehr unwahrscheinlich ist, dass man zu einer bereits untersuchten Lösung zurückkehrt. Eine zu kurze Liste hat das gegenteilige Problem. Die optimale Länge einer Liste ist stark problemabhängig aber selten größer als 10 Elemente.

Zum Abbruch der Suche werden normalerweise folgende Kriterien benutzt:

- Die Anzahl der Iterationen erreicht einen bestimmten Wert  $k_{\max}$ ,
- die Anzahl der Iterationen seit der letzten Verbesserung erreicht einen bestimmten Wert  $k'_{\max}$ ,
- eine bestimmte Rechenzeit wird erreicht,
- Man kann nachweisen, dass die gefundene Lösung das globale Optimum darstellt.

Statt mathematisch elegant ist diese Methode ingenieur-technisch gut. Viele glauben, dass Tabu Search die Heuristische Metastrategie ist, die das beste Verhältnis zwischen Lösungsqualität und Rechenaufwand aufweist.

## Genetische Algorithmen (GA)

Mit den Worten „weak methods“ bezeichnet man alle Methoden zur Problemlösung, die auf wenigen Annahmen über die Problemmerkmale basieren und deswegen für eine große Menge von Problemen benutzt werden können. Die Genetischen Algorithmen (GA) gehören zu dieser Kategorie, da sie eine effiziente Suche durchführen können, auch wenn die Voranalyse nur aus dem Auswertungsverfahren besteht, das die Qualität jedes Punkts des Suchraums abschätzt. Diese Eigenschaft gibt den GA eine große Vielseitigkeit. Konventionelle Methoden können dagegen oft nur ein spezifisches Problem lösen.

Ziel der GA ist es, die Darstellung mit „einfachen Transformationen“ zu verbessern. Unter der Wirkung genetischer Transformationen gibt es Verbesserungen (oder einfach Entwicklungen). Damit wird der Entwicklungsprozess von Populationen lebendiger Organismen imitiert. In der Natur muss jede Art das Problem des Überlebens lösen, d.h. eine günstige Anpassung zu einer veränderlichen und manchmal feindlichen Umgebung zu finden. Die genetische Transformationen, die eine solche Anpassung erlauben, entsprechen der Änderung der Chromosomenausstattung. Dabei ist zu unterscheiden zwischen dem „Crossover“ und der „Mutation“. Die Chromosomen werden in Form von „Bit-Zeichenfolgen“ dargestellt, mit denen komplizierte Gefüge kodifiziert werden. Genetische Mutationen sind der Weg, durch den neue fortgeschrittenere biologische Gefüge entstehen.

Die Grundidee der GA ist folgende: Zwischen den Lösungen eines Optimierungsproblems wird es bessere und schlechtere geben. Die Qualität einer Lösung wird von einer „fitness function  $f$ “ bestimmt. Ziel ist es, neue Lösungen zu entwickeln, die besser sind. Die Idee ist, zwei Lösungen zu „vereinen“, um auf diese Weise neue Lösungen „auf die Welt kommen“ zu lassen. Mit diesem System entsteht aus einer ersten Population eine zweite, die eine neue Generation, d.h. die „Kinder“ der Anfangspopulation, darstellt. Diese neue Generation kann größer als die Vorgängerpopulation sein. In einem solchen Fall muss man eine „Selektion“ durchführen, d.h. alle Lösungen, deren  $f$  kleiner als ein bestimmtes  $f$  ist, werden ausgeschlossen. Mit dieser zweiten Population fängt man wieder von vorn an und bekommt die „Enkel“ der Anfangslösung und so weiter.

In dieser allgemeinen Zusammenfassung gilt es, eine Auswahl zu treffen. Erstens spielt es in GA eine große Rolle, den Weg zu einer zulässigen Lösung darstellen. Normalerweise wird eine Lösung von einer Gesamtheit von Zeichenfolgen repräsentiert, die Chromosomen genannt werden. Jedes Chromosom setzt sich aus Genen (bits) zusammen. Durch die Kombination von zwei Einzellösungen („Crossover“) entsteht eine neue Lösung des Problems. Die Gene der Chromosomen des neuen Einzelwesens kommen von den beiden Eltern. Dabei sind  $x_i$  und  $y_i$  das Gen Nr.  $i$  eines Chromosoms der beiden Eltern. Im Chromosom des Kindes ist dieses Gen mit einer Wahrscheinlichkeit von  $p$   $x_i$  und  $(1-p)$   $y_i$  vertreten. Mit diesem wahrscheinlichkeitstheoretischen Element können bei unterschiedlichen Kombinationen verschiedene Lösungen von demselben Elternpaar erhalten werden.

Eine wichtige strategische Wahl betrifft die Größe der Population. In jeder Generation werden alle Lösungen mit einem niedrigen Wert der „Fitness function“ ausgeschlossen. Es wird angenommen, dass man aus zwei guten Lösungen wiederum eine gute Lösung erhält. Experimentell hat man aber herausgefunden, dass sich nach einer bestimmten Anzahl von Generationen die Lösungen nicht mehr verbessern. Um die Suche zu diversifizieren, führt man einen neuen Anwender ein, der „Mu-

tation“ heißt. Bevor eine neue Generation zur Welt kommt, ändert man in manchen Individuen der Population ein Gen.

#### 4.1.4 Shortest Path Algorithm und Algorithmus von FLOYD

Um die kürzeste Entfernung zwischen zwei Punkten eines Netzes finden zu können, gibt es in der Literatur eine Reihe von Algorithmen. Am einfachsten programmierbar sind der Algorithmus von DIJKSTRA (1959), der die Entfernung zwischen einem Knoten des Netzes und allen anderen Knoten bestimmt, und FLOYD (1962), der die Entfernung zwischen einem beliebigen Paar Knoten des Netzes berechnet. Da der Algorithmus von FLOYD für das Verfahren STRIDER Verwendung findet, wird es nachfolgend beschrieben.

In einem Netz bestehen  $N$  Knoten. Die Entfernung zwischen den Knoten  $i$  und  $j$  beträgt  $d_{ij}^m$ , wobei nur die ersten  $m$  Knoten Zwischenknoten sein dürfen. Falls eine Kante nicht existiert, ist  $d_{ij}^m = \infty$ . Aus dieser Definition folgt, dass  $d_{ij}^0$  die Länge der Strecke zwischen  $i$  und  $j$  ist.

Für alle Knoten  $i$  gilt  $d_{ii}^0 = 0$ . Außerdem ist  $d_{ij}^N$  die Länge des schnellsten Wegs zwischen  $i$  und  $j$ .  $D^m$  ist die  $N \times N$  Matrix, deren  $i,j$ -Elemente  $d_{ij}^m$  sind. Dieser Algorithmus kalkuliert  $D^1$  von  $D^0$ , dann  $D^2$  von  $D^1$ , solange bis  $D^N$  von  $D^{N-1}$  kalkuliert ist.

Die Gleichung:

$$d_{ij}^m = \min \{ d_{im}^{m-1} + d_{mj}^{m-1}, d_{ij}^{m-1} \} \quad (5)$$

wird benutzt, um die Elemente der Matrix  $D^m$  ( $1 \leq m \leq N$ ) zu berechnen. Hierfür sind nur die Elemente der Matrix  $D^{m-1}$  notwendig. Wenn die Iteration beendet ist, repräsentieren die Elemente  $d_{ij}^N$  der Matrix  $D^N$  die Längen des kürzesten Weges zwischen  $i$  und  $j$ .

Der mathematische Beweis, dass dieser Algorithmus zu einem Optimum führt, rührt von der Überlegung her, dass die Länge eines kürzesten Weges zwischen  $i$  und  $j$  nur die ersten  $m$  Knoten als Zwischenknoten erlaubt.

Für die praktische Anwendung ist es aber nicht ausreichend, die bloße Entfernung zu kennen, sondern es müssen auch die Zwischenknoten der Strecke bekannt sein.

Die benutzte Technik ist die sogenannte „Suche der vorletzten Knoten“. Dabei ist  $p_{ij}$  der vorletzte Knoten des schnellsten Weges zwischen den Knoten  $i$  und  $j$ . Die Kenntnis des vorletzten Knotens ist hinreichend und notwendig, um die genaue Reihenfolge der angefahrenen Knoten zu bestimmen. Deshalb nimmt man an, dass der Knoten  $k$  der vorletzte Knoten zwischen  $i$  und  $j$  ist, das heißt  $k = p_{ij}$ . Entsprechend ist der vorvorletzte Knoten zwischen  $i$  und  $j$  gleich dem vorletzten Knoten zwischen  $i$  und  $k$ , das heißt  $p_{ik}$ . Diese Iteration kann wiederholt werden, bis alle Knoten zwischen  $i$  und  $j$  zurückzuverfolgen sind.

Eine effiziente Methode folgt hiermit („Tentative method“). Am Anfang sei  $p_{ij} = i$  für jedes  $i$  und jedes  $j$ . Danach, während des Ablaufs des Floyd'schen Algorithmus, notiert das Verfahren wann das Minimum auf der rechten Seite der Gleichung (4)  $d_{im}^{m-1} + d_{mj}^{m-1}$  erreicht ist. Jedes Mal, wenn dies der Fall ist, setzt der Algorithmus  $p_{ij} = m$ . Ansonsten lässt es  $p_{ij}$  unverändert. Wenn der

Floyd'sche Algorithmus beendet ist, repräsentiert  $p_{ij}$  den wahren vorletzte Knoten auf den kürzesten Weg zwischen  $i$  und  $j$ . Mit diesem Algorithmus kalkuliert man die Matrix den besten Wegen.  $D = \{d_{ij}\} : \{d_{ij}\}$  ist dann die Länge des kürzesten Wegs zwischen den Knoten  $i$  und  $j$ , und die Matrix der vorletzten Knotens.  $P = \{p_{ij}\} : \{p_{ij}\}$  ist der vorletzten Knoten des kürzesten Wegs zwischen den Knoten  $i$  und  $j$ .

#### 4.1.5 Auswahl des Verfahrens

Die Verfahren zur Routensuche lassen sich in genaue Techniken und Heuristiken einteilen. Die genauen Techniken haben den Vorteil, dass sie immer eine exakte Lösung anbieten. Sie analysieren aber eine große Menge von Fällen und können deswegen bei großen Problemen schlecht oder überhaupt nicht benutzt werden. Die heuristischen Verfahren und Strategien versuchen, durch eine intelligente Raumerkundung die Kalkulationsmenge zu reduzieren, aber gewährleisten nicht, dass die optimale Lösung erreicht wird. Die kleine Dimension der Probleme, mit denen STRIDER zu tun hat, erlaubt die Benutzung einer genauen Technik, um den besten Weg zu suchen. Nichtsdestotrotz wird versucht, die Kalkulationsmenge durch eine intelligente auf Randbedingungen basierte Zuordnungstechnik zu reduzieren. Aus diesem Grunde wird das Verfahren von Floyd gewählt. Dargestellt ist das Verfahren z. B. bei MÜLLER-MERBACH (1973).

## 4.2 Vehicle Routing Problem (Tourenplanung)

### 4.2.1 Grundlagen

Das Vehicle Routing Problem (VRP) ist ein Problem, das schon ausgiebig in der Literatur behandelt wurde und das in den letzten zehn bis zwanzig Jahren eine enorme Entwicklung erlebt hat.

In seiner häufigsten Anwendung betrifft das Vehicle Routing Problem die Belieferung von Kunden mit Gütern aus einem Lager oder die Einsammlung von Gütern von Kunden in ein Lager. Für eine vorgegebene Menge von Kunden, ihren Standort und die Menge der zu diesen Kunden zu liefernden Güter muss man die Menge der für die Belieferung oder Einsammlung erforderlichen Fahrzeuge bestimmen und ihre Routen so festlegen, dass die Kosten der Operation ein Minimum werden. Die Zielfunktion wird in Form von Kosten beschrieben, die durch diesen Liefer- oder Einsammelungsprozess entstehen. Zu den Randbedingungen zählen das Fassungsvermögen der Fahrzeuge (Volumen, Gewicht), Einschränkungen über die Zeit, in der ein Kunde den Besuch akzeptieren kann, und ein maximaler Umweg für die Länge des Weges. Diese Aufgabenstellung aus dem Güterverkehr lässt sich, wie im vorliegenden Fall erforderlich, auch auf die Beförderung von Fahrgästen von einer Vielzahl von Haltestellen zu einem Punkt oder umgekehrt übertragen.

VRP sind allgegenwärtig in der heutigen Wirtschaft. Der Einsatzbereich reicht von der Warenverteilung bis zum „fleet management“. Sie sind verantwortlich für einen großen Teil der operationellen Kosten vieler Firmen. In den letzten Jahren hat man das Problem intensiv studiert. Die meisten der Methoden basieren auf die metaheuristischen Strategien, die schon beschrieben worden sind.

### 4.2.2 Mathematische Formulierung des VRP<sup>1</sup>

$G = (V, E)$  sei ein zusammenhängender gerichteter Graph mit der Knotenmenge  $V$ , der Kantenmenge  $E$  und einer Kantenbewertung  $c: E \rightarrow \mathbb{R}^+_0$  (Längen- bzw. Kostenfunktion).

Sei  $n := |V|$  und  $m := |E|$ .

Der Abstand zwischen zwei Knoten  $v_1, v_2 \in V$  ist die Länge des kürzesten Weges zwischen  $v_1$  und  $v_2$  auf dem Graphen bezüglich der Kantenbewertung  $c$ . Diese Entfernung wird der Einfachheit halber auch mit  $c(v_1, v_2)$  bezeichnet.

Die Stop-Menge  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$  ist eine Teilmenge der Knotenmenge  $V$ .

Eine Tour  $\pi$  durch alle Stops eines Graphen  $G$  ist eine Anordnung der Stops, d.h. eine Bijektion  $\pi: \{1, 2, \dots, k\} \rightarrow S$ .

Die Kosten einer Tour seien definiert als:

<sup>1</sup> Diese Version ist in der Literatur mit kleinen Änderungen sehr verbreitet: Siehe z.B. BAPTISTA ET AL. (2002), DOMSCHKE (1997) und HONG UND PARK (1999).

$$C(\pi) := \sum_{j=1}^k c[\pi(j), \pi(j+1)], \text{ mit } \pi(k+1) := \pi(1).$$

Der Knoten  $D \in V - S$  sei das Depot.

Jedem Stop ist eine Transfermenge  $b$  (Fahrgäste bzw. Güter) zugeordnet:

$$b : S \rightarrow \mathfrak{R}^+_0$$

Neben der Kostenfunktion  $c$  wird eine weitere Kantenbewertung eingeführt. Die Zeitfunktion  $t_E$ , welche die Zeit angibt, die man für das Passieren einer Kante benötigt:

$$t_E : E \rightarrow \mathfrak{R}^+_0$$

Der Zeitabstand zwischen zwei nicht benachbarten Knoten wird analog dem Kostenabstand zwischen nicht benachbarten Knoten definiert.

Zusätzlich wird jedem Stop eine Haltezeit zugeordnet:

$$t_S : S \rightarrow \mathfrak{R}^+_0$$

Die Haltezeit am Depot ist proportional abhängig von der zu entladenden Menge:

$$t_D : \mathfrak{R}^+_0 \rightarrow \mathfrak{R}^+_0, t_D(x) = \bar{t}_D x$$

Um die nötige Transfermenge zu befördern, steht ein Fahrzeugpark  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_i\}$  zur Verfügung.

Jedem der Fahrzeuge ist ein Fassungsvermögen  $q$ , eine Dienstzeit  $t_F$  und eine maximale Anzahl von möglichen Fahrten  $m$  zugeordnet:

$$q : F \rightarrow \mathfrak{R}^+_0$$

$$t_F : F \rightarrow \mathfrak{R}^+_0$$

$$m : F \rightarrow \mathbb{N}_0$$

Eine Injektion  $\pi : \{1, 2, \dots, p\} \rightarrow S$ ,  $p \leq k$  definiert eine Subtour durch  $p$  Stops des Graphen  $G$ , beginnend und endend beim Depot  $D$ .

Zu einer Tour gehören ihre Kosten  $C$ , ihre Transfermenge  $Q$  und ihr Zeitbedarf  $T$  (Summe aus Fahrzeit und Standzeit):

$$C(\pi) := c[D, \pi(1)] + \sum_{i=1}^{p-1} c[\pi(i), \pi(i+1)] + c[\pi(p), D],$$

$$Q(\pi) := \sum_{i=1}^p b[\pi(i)],$$

$$T(\pi) := t_E[D, \pi(1)] + \sum_{i=1}^{p-1} t_E[\pi(i), \pi(i+1)] + t_E[\pi(p), D] + \sum_{i=1}^p t_S[\pi(i)] + t_D[Q(\pi)].$$

Mit diesen angeführten Definitionen kann man das VRP ohne Zeitschranken definieren.

Gesucht wird die Gesamtanzahl  $r$  der optimalen Touren, dazu die Touren

$$\pi_i : \{1, 2, \dots, p_i\} \rightarrow S, i \in \{1, 2, \dots, r\}.$$

Jeder Stop gehört zu genau einer Tour, d.h.  $S$  ist die disjunkte Vereinigung aller Mengen

$$\pi_i(\{1, 2, \dots, p_i\}), i \in \{1, 2, \dots, r\}.$$

Die Touren müssen mit dem Fahrzeugpark vereinbar sein, d.h. es muss eine Zuordnung  $f$  der Touren zu den Fahrzeugen existieren

$$f : \{1, 2, \dots, r\} \rightarrow F,$$

welche die Kapazitätsbeschränkungen und die Zahl der maximalen Einsätze einhält, d.h.

$$Q(\pi_i) \leq q(f(i)), i \in \{1, 2, \dots, r\},$$

$$|\{j : (1 \leq j \leq r) \wedge (f(j) = f_i)\}| \leq m(f_i), i \in \{1, 2, \dots, l\}.$$

Um die Optimalität der Touren zu gewährleisten, muss für jede Anzahl  $r'$  von Touren und für alle dazugehörigen Touren  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{r'}$ , die mit dem Fahrzeugpark vereinbar sind, gelten:

$$\sum_{i=1}^r C(\pi_i) \leq \sum_{i=1}^{r'} C(\lambda_i).$$

Das VRP mit Zeitschranken ist genauso exakt wie das vorherige, mit dem einzigen Unterschied, dass die Vereinbarkeit mit dem Fahrzeugpark noch von der Einhaltung der Zeitschranken für jedes Fahrzeug abhängt, d.h.

$$\sum_{f(j)=f_i} T(\pi_j) \leq t_F(f_i), i \in \{1, 2, \dots, l\}.$$

Dies bedeutet, dass jedes Fahrzeug mehrmals fahren darf, jedoch nur innerhalb der maximal erlaubten Einsätze und der Zeitschranke, die für die Summe der Zeiten aller Einsätze gilt.

Die obigen Voraussetzungen gewährleisten im Gegensatz zum Travelling Salesman Problem nicht unbedingt die Existenz einer Lösung. Es kann sein, dass die Anzahl der Fahrzeuge nicht ausreicht, um die Gesamttransfermenge der Stops aufzunehmen. Des Weiteren wurde nicht festgelegt, dass die größte Transfermenge eines Stops kleiner sein muss als die maximale Kapazität der Fahrzeuge.

Die Überprüfung, ob überhaupt eine Lösung existiert, ist in dieser Hypothese so schwer wie die Suche nach einer optimalen Lösung. Das ist z.B. dann der Fall, wenn überhaupt nur die optimale Lösung die Einschränkungen erfüllt.

Weitere Probleme können sich beim VRP mit Zeitschranken ergeben, wenn es keine Lösung geben kann, die in der Lage ist, die Zeitbeschränkung einzuhalten.

Besonderes Interesse hat im Bereich Personenverkehr das VRP als ganzzahliges Problem. Bei diesem Problem hat die OD-Matrix noch zwei zusätzliche Indices, die das Fahrzeug, das die entspre-

chende Matrix passiert, und die Nummer des Einsatzes bezeichnen. Praktisch gilt der Wert  $x_{ijvm} = 1$  falls die Kante  $(i,j)$  vom Fahrzeug  $f_v$  in seinem  $m$ -ten Einsatz durchgeführt wird, und sonst 0.

Das VRP lässt sich wie folgt beschreiben: Minimiere dabei die Summe der Kosten aller benutzten Kanten, d.h.:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \sum_{v=1}^l \sum_{m=1}^{m(f_v)} c(i,j) x_{ijvm}$$

unter den folgenden Restriktionen:

$$x_{ijvm} \in \{0,1\} \quad \forall i,j,v,m \quad (\text{i}),$$

$$\sum_{i=1}^k \sum_{v=1}^l \sum_{m=1}^{m(f_v)} x_{ijvm} = 1, j \in \{2, \dots, k\} \quad (\text{ii}),$$

$$\sum_{j=1}^k \sum_{v=1}^l \sum_{m=1}^{m(f_v)} x_{ijvm} = 1, i \in \{2, \dots, k\} \quad (\text{iii}),$$

$$\sum_{i=1}^k x_{ipvm} - \sum_{j=1}^k x_{pjvm} = 0, v \in \{1, \dots, l\} \wedge p \in \{1, \dots, k\} \wedge m \in \{1, \dots, m(f_v)\} \quad (\text{iv}),$$

$$\sum_{i=2}^k b(i) \sum_{j=1}^k x_{ijvm} \leq q(f_v), v \in \{1, \dots, l\} \wedge m \in \{1, \dots, m(f_v)\} \quad (\text{v}),$$

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k t_E(i,j) \sum_{m=1}^{m(f_v)} x_{ijvm} + \sum_{i=1}^k t_S(i) \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^{m(f_v)} x_{ijvm} + t_D \sum_{i=2}^k b(i) \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^{m(f_v)} x_{ijvm} \leq t_F(f_v), v \in \{1, \dots, l\} \quad (\text{vi}),$$

$$\sum_{j=2}^k x_{1jvm} \leq 1, v \in \{1, \dots, l\} \wedge m \in \{1, \dots, m(f_v)\} \quad (\text{vii}),$$

$$\sum_{i=2}^k x_{i1vm} \leq 1, v \in \{1, \dots, l\} \wedge m \in \{1, \dots, m(f_v)\} \quad (\text{viii}),$$

$$X = (x_{ij}) \in B, B = \{(x_{ij}): \sum_{i \in Q} \sum_{j \notin Q} x_{ij} \geq 1, \text{ für alle Mengen } Q \text{ mit: } Q \subset V, Q \neq V, Q \neq \emptyset\}^2 \quad (\text{ix}).$$

Die Bedingungen (ii) und (iii) gewährleisten, dass jeder Knoten außer dem Depot von genau einem Fahrzeug in einem Einsatz bedient wird. Das (iv) stellt sicher, dass jeder Stop, der von einem Fahrzeug bedient wird, auch von diesem wieder verlassen wird. (ii) und (iv) bedingen bereits (iii).

Die Bedingungen (v), (vi), (vii), (viii) garantieren, dass die Einschränkungen an die Fahrzeugbenutzung eingehalten werden: Die Fassungsvermögen- bzw. Zeitschranken werden durch (v) bzw. (vi) festgelegt, während (vii) und (viii) dafür sorgen, dass jedes Fahrzeug das Depot während eines Ein-

<sup>2</sup> Das bedeutet nichts anderes, als dass bei einer Zerlegung der Knotenmenge in zwei nichtleere Teilmengen mindestens eine Verbindung zwischen beiden Mengen existieren muss.



satzes höchstens einmal anfährt. Man merkt, dass die Bedingung (viii) dabei überflüssig ist, da sie bereits von (iv) und (vii) garantiert worden ist.

Jedes eingesetzte Fahrzeug passiert auf seiner Route einmal das Depot. Falls es nicht der Fall wäre, würde eine Subtour entstehen, deren Stops nur von einem Fahrzeug in einem Einsatz angefahren werden und zu anderen Stops keine Verbindung haben, da jeder Stop nur von genau einem Fahrzeug passiert wird. Diese Tour wird jedoch von der Bedingung (ix) verboten.

### 4.2.3 Exakte Verfahren für VRP

Die exakten Techniken, die bis jetzt bekannt sind, lassen sich wie folgt unterscheiden (nach FISHER, 1997):

(i) Methoden, die auf dynamischer Programmierung basieren.

Die Methode von CHRISTOFIDES ET AL. (1981) gehört zu dieser Rubrik. Als Weiterentwicklung kann die Methode von KOLEN ET AL. (1987) gesehen werden. Probleme bis zu 15 Kunden sind mit dieser Technik optimal gelöst worden.

(ii) Methoden, die auf einer Spaltengeneration (column generation) basieren.

In dieser Gruppe hat DESROCHERS ET AL. (1992) eine Methode vorgestellt, die ein circa 100 Kunden Problem exakt lösen kann. Das ist zurzeit die mit Abstand beste Methode.

(iii) Methoden, die auf der Zerlegung (decomposition) von Lagrange basieren.

MADSEN (1990) und HALSE (1992) haben versucht, viele Lagrangianische Zerlegungsschemen zur Tourenplanung, um untere Grenzen (lower bounds) zu kalkulieren. Sie können z.Z. Probleme von circa 100 Kunden optimal lösen, mit einer Kombination von Lagrangianischer Zerlegung und Branch-and-Bound.

(iv) Methoden, die auf k-tree basieren.

FISHER (1994) hat die 1-tree zu einer k-tree Methode für das klassische Tourenplanungsproblem entwickelt. Bis jetzt sind aber noch keine praktischen Ergebnisse vorhanden.

#### 4.2.4 Heuristische Verfahren für VRP

Wie gesehen lassen sich Tourenplanungsprobleme (noch) nicht mittels eines exakten Verfahrens lösen. Der Bereich des VRP ist aber sehr wichtig: Er betrifft Logistik- sowie Personenverkehrsprobleme. Deswegen findet man in der technischen Literatur viele verschiedene Modelle, die eine große Menge von Lösungsvorschlägen anbieten. Obwohl es nicht einfach ist, diese große Kategorie eindeutig zu gliedern, sieht die Klassifikation von DOMSCHKE (1997) besonders bedeutungsvoll aus.

Jedes VRP besteht aus zwei verschiedenen Operationen:

- Zuordnungs- oder Gruppierungsproblem:  
Jeder Kunde muss genau zu einer Tour gehören – mit anderen Worten wird die Menge der Kunden in bestimmte Sektoren („*Clusters*“) unterteilt.
- Routingproblem:  
Der Weg jeder Tour muss festgelegt werden. Die Lösungen dieses zweiten Problems gehören in der Literatur zu dem sogenannten „Travelling Salesman Problem“ (TSP).

Die Klassifikation von DOMSCHKE basiert auf der Reihenfolge dieser Operationen. Wenn sie gleichzeitig geführt werden, spricht man von Simultanverfahren, sonst von Sukzessivverfahren.

Die Simultanverfahren lassen sich in Eröffnungsverfahren und Verbesserungsverfahren unterteilen.

- Eröffnungsverfahren lassen sich weiter klassifizieren in sequentielle Verfahren (die Konstruktion einer Route  $i+1$  fängt an, nur wenn die Route  $i$  in Ordnung ist) und parallele Verfahren (es besteht die Möglichkeit, eine Route zu wählen, die durch Hinzufügen von Kunden erweitert wird). Zur letzten Kategorie gehören der Savings-Algorithmus von Clarke & Wright (1964) und alle die für VRP verallgemeinerten TSP-Verfahren „Bester Nachfolger“ und „Sukzessive Einbeziehung“.
- Verbesserungsverfahren versuchen, einen schon kalkulierten Tourenplan zu verbessern.

Die Sukzessivverfahren lassen sich folgendermaßen weiter unterteilen:

- Wenn das Routingproblem vor dem Zuordnungsproblem kommt, dann ist es ein „Route first – Cluster second“ Verfahren.
- Wenn die Kapazität- bzw. Zeitrestriktionen vor dem Routingproblem beobachtet werden, nennt man dies ein „Cluster first – Route second“ Verfahren. Zu dieser Kategorie gehören z.B. die Verfahren von FISHER & JAIKUMAR (1981) und BRAMEN & SIMCHI-LEVI (1995).

### Route first – Cluster second – Verfahren

“Route first – Cluster second” sind Sukzessivverfahren, die das Routing- vor dem Zuordnungsproblem lösen. Zu dieser Gruppe gehören unter anderem die Verfahren von FOSTER & RYAN (1976), BEASLEY (1983) und RENAUD ET AL. (1996).

Das mit Abstand bekannteste Verfahren ist der Sweep-Algorithmus, der von GILLET & MILLER (1974) vorgeschlagen wurde. Man nimmt an, dass die Polarkoordinaten vom Standort eines jeden Kunden verfügbar sind. Der Raum kann so in Winkelsegmente unterteilt werden, dass alle Stops in einem Winkelsegment zusammengefasst werden können. Man muss auf die Einhaltung der Kapazitäts- und eventuell Zeitschranken achten. Die Punkte sind danach nach steigendem Winkel angeordnet: Jede Tour wird durch aufeinanderfolgende Kunden so lange erweitert, bis durch den nächsten Kunden die Kapazität- bzw. die Zeitbeschränkung überschritten wird.

Der Anfangspunkt („seed“) spielt eine Rolle, denn zwei Prozesse, die mit zwei verschiedenen Punkten anfangen, führen normalerweise zu verschiedenen Ergebnissen. Deswegen wird normalerweise geprüft, ob ein Austausch der Kunden vom Endpunkt einer Route zum Anfangspunkt der benachbarten Route eine Verkürzung der Gesamtstrecke bewirkt.

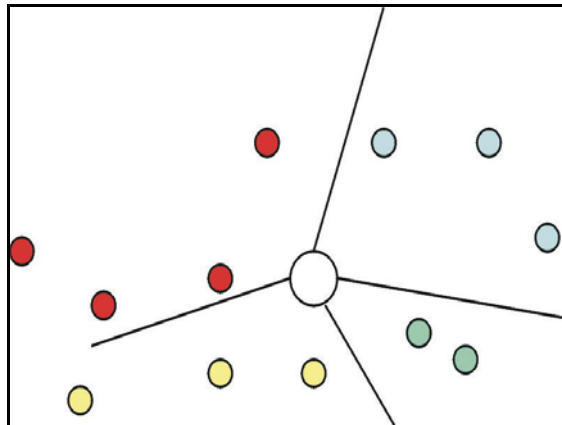


Abb. 4-6: Zuordnung der Kunden zu den Fahrzeugen beim Route first – Cluster second – Verfahren

### Cluster first – Route second – Verfahren

Wie in der Klassifikation schon gesehen, werden in diesem Fall zuerst die Kapazitäts- bzw. Zeitrestriktionen und danach das Routingproblem beachtet. Zuerst wird das Gebiet in Sektoren zerlegt. Jedes Fahrzeug bedient einen der gebildeten Sektoren. Seine Route wird mit den normalen Methoden des TSP bestimmt.

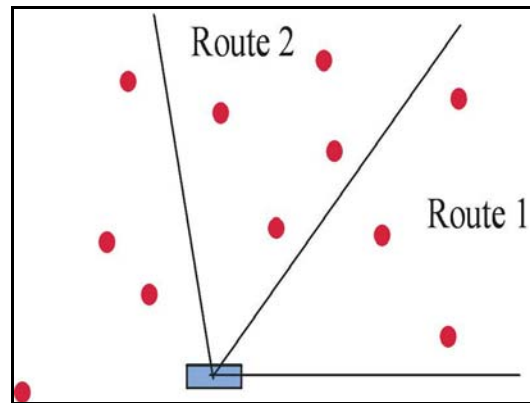


Abb. 4-7: Zuordnung der Kunden zu den Fahrzeugen beim Cluster first – Route second – Verfahren

Das mit Abstand bekannteste Verfahren, das zu dieser Gruppe gehört, ist das von FISHER & JAIKUMAR (1981). Dieses Verfahren besteht aus vier Schritten:

- Für jeden Cluster  $k$  werden die Anfangspunkte  $j_k$  gewählt („Seed Selection“).
- Für jeden Kunden  $i$  zu jedem Sektor  $k$  werden die Kosten der Verortung kalkuliert. („Allocation of Customers to Seeds“).
- Die Randbedingungen werden betrachtet (in der originalen Version des Verfahrens nur das Fassungsvermögen  $Q$  jedes Fahrzeugs) und das Problem mit den Kosten und der Rangfolge der Kunden („Customer weight“) gelöst („Generalized Assignment“).
- Für jeden Sektor wird eine kürzeste Lösung mit den Methoden von TSP ermittelt.

### Eröffnungsverfahren (Savingsverfahren)

Das mit Abstand bekannteste Eröffnungsverfahren ist das Verfahren von CLARKE & WRIGHT (1964), auch als Savingsverfahren bekannt, das im Laufe der Zeit viele kleine Modifizierungen erfahren hat.

$D(d_{ij})$  sei eine symmetrische Entfernungsmatrix. Die Knoten des Netzes sind nur mit den Koordinaten bekannt, d.h. dass Entfernung euklidisch berechnet wird (Luftlinienentfernung).

Die Anfangslösung des Verfahrens ist einfach: Jeder Kunde wird mit einem Fahrzeug bedient:

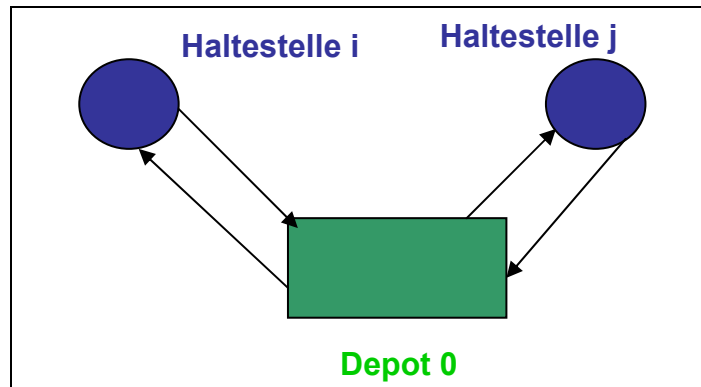


Abb. 4-8: Erster Schritt im Savings-Algorithmus

Im Laufe des Verfahrens versucht man, diese Anfangslösung durch Verknüpfung von jeweils zwei Routen zu verbessern, ohne dabei die Randbedingungen zu verletzen.

Die Verknüpfung von zwei Touren ergibt eine Ersparnis („Saving“) von

$$s_{ij} = d_{0i} + d_{0j} - d_{ij}$$

$s_{ij}$  ist dabei größer, je näher  $i$  und  $j$  beieinander liegen und je weiter sie vom Depot entfernt sind.

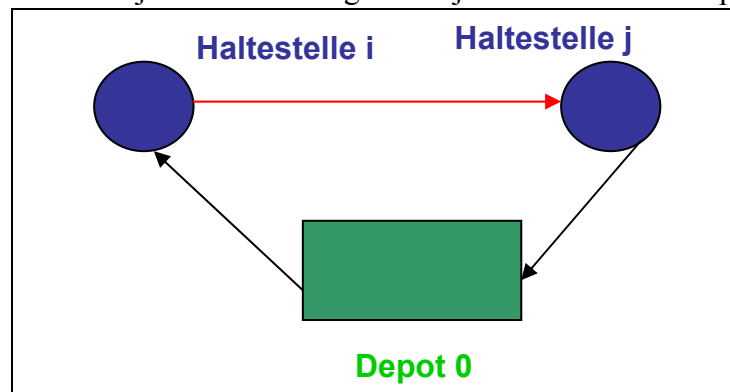


Abb. 4-9: Zweiter Schritt im Savings-Algorithmus

Falls man mehr als eine Verknüpfungsmöglichkeit hat, wählt man die Möglichkeit, die zur größten Ersparnis führt.

Die Flexibilität dieses Verfahrens ist vielleicht der Hauptgrund seines Erfolgs. Weitere Modifizierungen betreffen vor allem eine intelligente und dynamische Durchsuchung der verschiedenen Ersparismöglichkeiten<sup>3</sup>.

### Lokale Suchverfahren / Verbesserungsverfahren

Die Verfahren gehen von einer schon kalkulierten Lösung aus und versuchen, sie im Hinblick auf die verfolgende Zielsetzung zu verbessern. Verbesserungen können durch die Veränderung der gefahrenen Routen und den daraus eventuell resultierenden Einsparungen an Fahrzeugen und gefahrenen Kilometern ergeben. In erster Linie handelt es sich um Vertauschungsverfahren. In jüngerer Zeit sind neuere Verfahren dieses Typs mit den heuristischen metastrategien Simulated Annealing, Tabu Search und genetische Algorithmen erfolgreich kombiniert worden.

Die am meisten benutzten Verfahren dieser Kategorie sind:

- Verschieben eines Kunden von einer Tour  $h$  in eine Tour  $k$ ;
- Vertauschen eines Kunden aus einer Tour  $h$  mit einem Kunden aus einer Tour  $k$ .

Beide Verfahren werden vertieft im Kapitel 5 beschrieben.

#### 4.2.5 Auswahl des Verfahrens

Im hier entwickelten Verfahren STRIDER (vgl. Kap 5) wird ein Simultanverfahren benutzt, das auf einer Kombination eines innovativen Eröffnungsverfahrens und zwei in der Literatur vorhandenen Standardtechniken basiert. Damit lässt sich das Tourenplanungsproblem effizient lösen. Das Ziel des Eröffnungsverfahrens ist es, die Kalkulationsmenge zu reduzieren und eine schnelle Lösung für das Problem zu erreichen. Der Lösungsraum eines Tourenplanungsproblems ist relativ groß: Normalerweise werden alle Lösungen als zulässig berücksichtigt, die keine a priori gesetzte Randbedingung verletzen.

Die Grundidee von STRIDER ist eine intelligente und dynamische Erkundung des Lösungsraums. „Intelligent“ bedeutet, dass eine Prozedur implementiert wurde, die schon *a priori* überflüssige Operationen ausschließt, um auf diese Weise Rechenzeit zu sparen. „Dynamisch“ bedeutet, dass die Lösungssuche auch unterschiedliche Nachfragen berücksichtigt. Diese beiden Merkmale der Erkundung des Lösungsraums sind notwendig, da das VRP rechentechnische Schwierigkeiten aufwirft. Die Rechenzeit steigt nämlich stärker als die Komplexität des Problems.

In einem zweiten Schritt wird versucht, Verbesserungen zu finden. Die Kombination dieser beiden Verfahren liefert eine Lösung, die mindestens lokal optimal ist.

---

<sup>3</sup> Für weitere Einzelheiten siehe GOLDEN (1977) oder PAESSENS (1981).

## 5 Beschreibung des Verfahrens STRIDER

**STRIDER** (**S**ystem **T**o **R**ealize **I**ntelligently and **D**ynamically **E**conomic **R**outes) ist ein „weak method“, um das „Vehicle Routing Problem“ zu lösen. Es hat das Ziel, eine von Netzgeometrie und Nachfrage unabhängige Lösung der in Kap 3 beschriebenen Beförderungsaufgabe zu finden sowie praktikabel und mindestens lokaloptimal zu sein.

### 5.1 Formulierung einer praktikablen Zielfunktion

Optimieren im mathematischen Sinne heißt, den Funktionswert  $f(x)$  einer Zielfunktion  $z$  je nach Bedeutung der Zielfunktion zu minimieren oder zu maximieren:

$$\min/\max \{f(x) = z\}$$

unter der Bedingung, dass  $x \in S$  und  $S$  der Definitionsbereich des Problems ist. Dabei sind die Randbedingungen

$$r_i = a_i$$

zu beachten.

Eine Zielfunktion besteht i.d.R. aus mehreren Komponenten

$$x = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

die meist gegenläufig sind. Ihre Wirkungen sind auf eine einheitliche Dimension (z.B. Kosten) zu transformieren.

Bei der hier vorliegenden Problemstellung handelt es sich um ein derartiges Optimierungsproblem: Zu minimieren sind die Kosten für die Beförderung von flächig verteilten ÖPNV-Haltestellen zu einer zentralen Verknüpfungshaltestelle mit einem höherrangigen ÖPNV-System und umgekehrt. Die räumliche Ausprägung des Problems ist in der Abb. 3-1 veranschaulicht. Die Beförderungsaufgabe ist durch die Lage der Haltestellen, das Netz der für das Verkehrsmittel befahrbaren Wege, einen vorgegebenen Bedienungstakt sowie zufällig auftretende Fahrtwünsche der Fahrgäste gekennzeichnet.

Die Kosten setzen sich zusammen aus den Komponenten

- Betriebskosten für die zu erbringende Beförderungsleistung
  - Kosten für die Vorhaltung von Fahrzeugen und Fahrern,
  - Kosten für die Fahrleistung,
  - Overheadkosten des Verkehrsunternehmens.
- Zeitkosten, die den Fahrgästen für die Beförderungsdauer entstehen.

Zwischen den Betriebskosten und den Zeitkosten der Fahrgäste bestehen gegenläufige Abhängigkeiten: Die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge bestimmt die bei einer vorhandenen Verkehrsnachfrage zu fahrenden Wege. Aus den zu fahrenden Wegen leitet sich die Beförderungsdauer der Fahr-

gäste ab. Je mehr Fahrzeuge eingesetzt werden, umso direkter sind die Wege von den Einstiegshaltestellen zur Verknüpfungshaltestelle und umgekehrt. Im Grenzfall, wenn von und zu jeder zu bedienenden Flächen-Haltestelle ein gesondertes Fahrzeug eingesetzt wird, fahren alle Fahrzeuge auf dem kürzest möglichen Weg zum Ziel. Die Zeitkosten für die Fahrgäste sind dann ein Minimum, wohingegen die Kosten für den Fahrzeugeinsatz zu einem Maximum werden.

Zu den Betriebskosten müssen auch die Overheadkosten des Verkehrsunternehmens hinzugerechnet werden. Bei ihnen handelt es sich um Kosten, die von der Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge und der zu erbringenden Fahrleistung unterproportional abhängen.

Um die Zielfunktion minimieren zu können, müssen die Abhängigkeiten zwischen den Kostenkomponenten algorithmisch formuliert werden. Dies ist äußerst schwierig, zumal zusätzlich das Problem der Umrechnung von Beförderungsdauer in Zeitkosten auftritt, für das es keine allgemeingültige Lösung gibt. In der Praxis kommt es nicht darauf an, das Optimum exakt zu erreichen. Es reicht vielmehr ein Zustand, der in der Nähe des Optimums liegt. Hinzu kommt, dass der Rechenaufwand mit jeder Erhöhung der Genauigkeit überproportional steigt.

Aus diesem Grund werden Annahmen getroffen, welche die Komplexität des Problems verringern, allerdings auch die Genauigkeit der Lösung einschränken:

- Die Overheadkosten werden prozentual auf die Kosten für die Vorhaltung der Fahrzeuge und Fahrer sowie auf die Kosten für die Fahrleistung aufgeschlagen.
- Die Zeitkosten der Fahrgäste werden in Form einer Randbedingung in die Berechnung eingeführt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Zeitkosten für die Beförderung auf dem kürzesten Wege nicht beeinflussbar sind und lediglich die Kosten für einen möglichen Umweg zu minimieren sind. Anstelle einer Minimierung der Umwege wird die Randbedingung gesetzt, dass ein bestimmter Umwegfaktor, der sich aus dem Verhältnis zwischen dem tatsächlich zurückgelegten Weg und dem kürzest möglichen Weg ergibt, nicht überschritten werden darf. Um den Rechenaufwand möglichst gering zu halten, dienen als Kenngrößen dieser Randbedingung die Umwegfaktoren der einzelnen Fahrzeuge zwischen der dem Verknüpfungspunkt am entferntest liegenden Flächen-Haltestelle und der Verknüpfungshaltestelle. Hierfür wird ein Grenzwert vorgegeben. Zwar können die Umwegfaktoren bezogen auf die Zwischenhaltestellen größer sein als der Umwegfaktor der entferntesten Haltestelle. Da mit der Annäherung an den Verknüpfungspunkt die Beförderungswege jedoch abnehmen, sinkt bei gleichbleibendem Umwegfaktor auch die absolute Größe des Umweges. Es ist deshalb unwahrscheinlich, dass bezogen auf die Zwischenhaltestellen größere absolute Umwege auftreten als von der entferntesten Haltestelle aus.
- Da es auf einfache Weise nicht möglich ist, die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge mit ihrer Fahrleistung in einen algorithmischen Zusammenhang zu bringen, sondern dieser Zusammenhang von der Zufälligkeit des Umfangs und der räumlichen Verteilung der Fahrtwünsche abhängt, werden diese beiden Komponenten der Zielfunktion in einen hierarchischen Zusammenhang gebracht und unabhängig voneinander behandelt (s. unten).



Die Kosten, die im Rahmen der Zielfunktion zu minimieren sind, bestehen nach diesen Vereinfachungen noch aus den Komponenten

- Kosten für die Vorhaltung von Fahrzeugen und Fahrern,
- Kosten für die Fahrleistung.

Die Overheadkosten sind diesen Kostenkomponenten zugeschlagen und die Zeitkosten, die den Fahrgästen für die Beförderungsdauer entstehen, werden in die Randbedingung eines einzuhaltenen Umwegfaktors umgewandelt.

Die beiden verbleibenden Kostenkomponenten werden nacheinander minimiert. Begonnen wird mit der Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge und Fahrer, weil deren Kosten erheblich höher sind als die wegeabhängigen Kosten der zu erbringenden Fahrleistung. Erst wenn es mehrere Möglichkeiten der Zuordnung der Fahrtwünsche auf die Fahrgäste gibt, wird diejenige gewählt, die den geringeren Umweg verursacht.

Damit erlaubt das Verfahren keine exakte Optimierung. Es enthält vielmehr eine Heuristik, die kein globales Optimum liefert, sondern nur eine Lösung in der Nähe dieses Optimums. Die spätere Anwendung wird zeigen, ob die Nähe ausreicht.

Bei der Suche nach einer optimalen Lösung sind eine Reihe von Randbedingungen zu beachten:

- Die Qualität der Fahrgastbeförderung hängt davon ab, wie groß die Umwege sind, die zwischen der Einstiegshaltestelle und der Ausstiegshaltestelle gefahren werden. Für den nachfragegesteuerten Betrieb entlang eines Richtungsbandes oder innerhalb eines Sektors sind Umwege ein grundlegendes Systemmerkmal. Um die Beförderungsqualität nicht zu sehr absinken zu lassen, muss der Umweg begrenzt werden. Dies kann absolut geschehen oder relativ mit Hilfe eines Umwegfaktors, der die tatsächlich zurückzulegende Wegelänge zu dem kürzest möglichen Weg ins Verhältnis setzt. Hier wird der relative Umweg in der Form des Umwegfaktors begrenzt, weil eine Begrenzung des absoluten Umwegs kurze Fahrten benachteiligen und damit zu Ungerechtigkeiten führen würde. Die Festlegung eines Grenzwertes für den Umwegfaktor stellt eine verkehrspolitische Entscheidung hinsichtlich der angestrebten Beförderungsqualität dar.
- Die Anzahl der Plätze in den Fahrzeugen ist begrenzt und darf bei der Beförderung von Fahrgästen nicht überschritten werden. In Großraumtaxi stehen lediglich Sitzplätze zur Verfügung und in Linienbussen dürfen außerhalb des Schülerverkehrs bei Geschwindigkeiten über 60 km/h ebenfalls nur Sitzplätze genutzt werden. Dieses Problem stellt sich in besonderem Maße im nachfragegesteuerten Verkehr, bei dem i.d.R. kleinere Fahrzeuge zum Einsatz kommen. Größere Fahrzeuge, die eine ausreichende Kapazitätsreserve aufweisen, sind teurer und erfordern bei Überschreitung einer bestimmten Platzzahl außerdem den Einsatz qualifizierterer und damit teurerer Fahrer. Sie besitzen einen größeren Sammeleffekt und führen bei voller Auslastung zu größeren Umwegen, was die Beförderungsdauer für die Fahrgäste erhöht, oder bei begrenzten Umwegen zu einem geringeren Auslastungsgrad führt, was wirtschaftlich ungünstig ist. Zwischen der Randbedingung einer maximalen Fahrzeuggröße und der Randbedingung eines maximalen Umweges bestehen damit Abhängigkeiten, ohne dass es in einfacher Weise möglich ist, diese Abhängigkeiten algorithmisch zu fassen und damit die beiden Randbedingungen auf eine gemeinsame Größe zurückzuführen.

- Da es problematisch ist, eine Gruppe von Fahrgästen an einer Haltestelle mit mehreren Fahrzeugen zu bedienen – wer darf in das erste Fahrzeug einsteigen und wer muss auf das nächste Fahrzeug warten? – wird die Forderung erhoben, dass alle an der Haltestelle wartenden Fahrgäste von einem Fahrzeug aufgenommen werden müssen. Eine Ausnahme besteht, wenn die Anzahl der wartenden Fahrgäste größer ist als die Platzkapazität der Fahrzeuge. Dieser Fall wird aber sehr selten eintreten, wenn zumindest Großraum-Pkw mit 8 Sitzplätzen genutzt werden. Diese Forderung wird zu einer zusätzlichen Randbedingung.
- Der Sektorbetrieb ist i.d.R. als Zu- und Abbringer mit einem höherrangigen ÖPNV-System verknüpft und weist Anschlüsse mit diesem System auf. Diese Anschlüsse bestehen meist in beiden Richtungen und zwar i.d.R. auf das höchstrangige Zentrum ausgerichtet. Aus diesen Anschlusszeiten ergibt sich für den Sektorbetrieb die maximal zur Verfügung stehende Fahrzeit zwischen dem Verlassen des Verknüpfungspunktes und der Rückkehr zum Verknüpfungspunkt. Bei der Bildung der Fahrtrouten muss bei der Verknüpfung des Hinwegs in die Fläche und des Rückwegs aus der Fläche einschließlich einer eventuell notwendigen Umsetzfahrt zwischen der letzten Haltestelle des Hinwegs und der ersten Haltestelle des Rückwegs diese verfügbare Fahrzeit eingehalten werden, d.h. es dürfen nur solche Routen miteinander verknüpft werden, die in der Summe der Fahrzeit diese Bedingung einhalten.

Für die Lösung des Problems gibt es damit insgesamt folgende Randbedingungen:

- Keine Überschreitung des Umwegfaktors für die Verbindung zwischen der von dem Verknüpfungspunkt aus am entferntest liegenden Haltestelle des jeweiligen Fahrzeugs,
- Keine Überschreitung der Platzkapazität der Fahrzeuge,
- Keine Aufteilung einer an einer Haltestelle wartenden Fahrgastgruppe auf mehrere Fahrzeuge,
- Keine Überschreitung der Zeitdifferenz zwischen den Anschlusszeiten an das höherrangige ÖPNV-System.

Diese Randbedingungen werden jeweils unabhängig voneinander berücksichtigt.

## 5.2 Ablauf des Verfahrens

### 5.2.1 Aufgabenstellung

Das Optimierungsproblem stellt sich im vorliegenden Fall der Beförderung von Fahrgästen im Sektorbetrieb in zwei unterschiedlichen Ausprägungen:

- Planung des Betriebsablaufs (off-line).

Vor Beginn des Betriebs ist die Anzahl der Fahrzeuge zu ermitteln, die eingesetzt werden müssen. Außerdem sind die zu fahrenden Routen zu bestimmen. Aus den zu fahrenden Routen ergeben sich die erforderliche Fahrleistung und die Umwege für die Fahrgäste. Neben der Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge dienen diese Werte zur Beurteilung des betrieblichen Aufwands und der Qualität des Angebots. Zielfunktion und Randbedingungen haben die o.g. Form.

- Steuerung des Betriebsablaufs (on-line).

Während des Betriebs sind die Fahrgäste den einzelnen Fahrzeugen zuzuordnen. Die Zuordnung ist so vorzunehmen, dass die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge ausreicht. Wenn dies nicht möglich ist, müssen on-line zusätzliche Fahrzeuge geordert werden. Dies können Taxis sein, die bei Bedarf von der Betriebsleitzentrale aus herbei gerufen werden. Falls ein solcher Taxieinsatz zu häufig erforderlich wird, müssen regulär mehr Fahrzeuge eingesetzt werden. Auch während des Betriebs müssen die zu fahrenden Routen bestimmt werden. Aus den zu fahrenden Routen ergeben sich die realisierte Fahrleistung und die realisierten Umwege für die Fahrgäste. Diese Werte dienen zur Beurteilung des betrieblichen Aufwands und der Qualität der laufenden Bedienung.

Während die Randbedingungen dieselben sind wie bei dem ersten Optimierungsschritt, reduziert sich die Zielfunktion auf die Minimierung der von den Fahrzeugen zu fahrenden Wege, denn die Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge ist vorgegeben.

Wegen der periodischen und zufälligen Schwankungen der Verkehrsnachfrage ist im ersten Schritt die Anzahl der erforderlichen Fahrzeuge für jeden Bedienungszeitpunkt gesondert zu ermitteln. Für die Anzahl der zu den jeweiligen Bedienungszeitpunkten einzusetzenden Fahrzeuge ist anschließend eine Häufigkeitsverteilung zu erstellen. Aus der jeweiligen Häufigkeitsverteilung ist abzugreifen, bei welcher Anzahl von Fahrzeugen eine bestimmte vorzugebende Bedienungssicherheit zu erreichen ist. Hieraus ergibt sich die Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge. Bei der Festlegung der einzusetzenden Fahrzeuge ist zu beachten, dass die Anzahl der Fahrzeuge nicht stündlich wechseln kann, weil der Verkehrsunternehmer sonst stündlich wechselnde Leerstände der Fahrzeuge hat, die sich auf den Preis der einzusetzenden negativ auswirken würden. Aus diesem Grunde sollte die Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge über bestimmte Zeiträume gleich bleiben. Solche Zeiträume sollten sich an den üblichen Verkehrszeiten orientieren: Hauptverkehrszeit, Normalverkehrszeit, Schwachverkehrszeit, Samstag, Sonn- und Feiertag.

Zentrale Aufgabe der Planung des Betriebsablaufs und der Steuerung des Betriebsablaufs ist die Bildung von Fahrtrouten und ihre Zuordnung zu Fahrzeugen. Die Fahrtrouten ergeben sich aus den

Fahrtwünschen und den o.g. Randbedingungen der Beförderung. Sie müssen so gebildet und den Fahrzeugen so zugeordnet werden, dass die o.g. Ziele weitestmöglich erfüllt sind.

Um die Komplexität des Verfahrens und damit den Rechenaufwand zu begrenzen, wird die Lösung der Aufgabe in folgende Schritte zerlegt:

- Entwicklung einer Ausgangslösung für die Fahrtrouten ,
- Verbesserung der Ausgangslösung für die Fahrtrouten,
- Paarweise Verknüpfung der Fahrtrouten.

### 5.2.2 Eingangsgrößen

Eingangsgrößen sind:

- Haltestellen einschließlich ihrer Koordinaten,
- Netz der von den eingesetzten Fahrzeugen befahrbaren Wege zwischen den Haltestellen,
- Fassungsvermögen der Fahrzeuge,
- Anzahl der Fahrgäste an den Haltestellen zu den verschiedenen Bedienungszeitpunkten,
- Länge der Wege zwischen den Haltestellen,
- Fahrzeiten zwischen den Haltestellen,
- Grenzwert für den Umwegfaktor.

Die Lage der Haltestellen – gekennzeichnet durch ihre Koordinaten – und das Netz der von den eingesetzten Fahrzeugen befahrbaren Wege zwischen den Haltestellen werden einem Geo-Informationen-System (GIS) entnommen.

Art und Fassungsvermögen der Fahrzeuge sind Vorgaben.

Die Anzahl der an den Haltestellen zusteigenden oder aussteigenden Fahrgäste bildet einen haltestellenbezogenen Vektor. Vor dem ersten Betrieb, d.h. bei der Bestimmung der Anzahl der erforderlichen Fahrzeuge müssen hierfür Annahmen getroffen werden, oder es muss auf diesen Optimierungsschritt verzichtet und gleich eine bestimmte Anzahl von Fahrzeugen gegriffen werden. Erst während des laufenden Betriebs ist die Anzahl der Fahrtwünsche zu den verschiedenen Bedienungszeitpunkten und an den einzelnen Haltestellen aufgrund der Anmeldungen bekannt.

Die Fahrzeiten zwischen den Haltestellen bilden eine Matrix. Sie können anfangs aus den Entfernungen zwischen den Haltestellen und der zu erwartenden Fahrgeschwindigkeit geschätzt werden. Während des Betriebs lassen sie sich messen, so dass die Schätzungen korrigiert werden können.

Auch beim Grenzwert für den Umwegfaktor handelt es sich um eine Vorgabe. Dabei kann unterschieden werden zwischen einem im Normalbetrieb angestrebten Grenzwert und einem maximalen Grenzwert, der akzeptiert wird, wenn andernfalls für die Beförderung der Fahrgäste ein zusätzliches Fahrzeug eingesetzt werden müsste.

Die beiden o.g. unterschiedlichen Ausprägungen der Aufgabenstellung sind in der Weise miteinander verknüpft, dass im ersten Schritt lediglich die Art und das Fassungsvermögen der Fahrzeuge Eingangsgröße ist und die Anzahl der erforderlichen Fahrzeuge in diesem Schritt erst ermittelt wird, während für den zweiten Schritt die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge als zusätzliche Eingangsgröße bekannt sein muss.

Für die Ermittlung des Umwegs und die Überprüfung, ob der Umwegfaktor unterhalb des vorgegebenen Grenzwerts liegt, werden außerdem die kürzesten Wege zwischen den einzelnen Haltestellen benötigt. Im tatsächlichen Betrieb werden selten die kürzesten Wege gefahren – dies ist nur im Individual-Taxiverkehr der Fall –, sondern auf dem Weg zum Verknüpfungspunkt und umgekehrt werden Zwischenhaltestellen bedient, die nicht auf dem kürzesten Weg liegen, sondern Umwege erfordern. Die Gesamtheit der kürzesten Wege von den einzelnen Haltestellen zur Verknüpfungshaltestelle bildet eine Matrix.

Die Ermittlung der kürzesten Wege erfolgt nach einem Algorithmus von FLOYD in der Darstellung von MÜLLER-MEHRBACH (1973). Der Algorithmus von FLOYD wurde gewählt, weil er einfach zu programmieren ist und schnell exakte Ergebnisse liefert.

### 5.2.3 Ausgangslösung für die Fahrtrouten

Die Zuordnung der Fahrgäste zu den einzelnen Fahrzeugen und damit die Bildung der Fahrzeuggruppen ist der Kern des Verfahrens für die Planung und die Steuerung des Betriebsablaufs. Sie erfolgt nach demselben Verfahren unabhängig davon, ob es sich um eine Fahrt von der Verknüpfungshaltestelle zu den Flächenhaltestellen handelt (Hinfahrt in die Fläche) oder umgekehrt (Rückfahrt aus der Fläche). Im ersten Fall werden die Aussteiger zugeordnet und im zweiten Fall die Einsteiger. Da Hinfahrt und Rückfahrt in unmittelbarer Folge zueinander stehen und zusätzlich Randbedingungen zu berücksichtigen sind, die sich aus den Anschlussbedingungen am Verknüpfungspunkt und dem Wegeaufwand aus Umsetzfahrten von der letzten Haltestelle der Hinfahrt zur ersten Haltestelle der Rückfahrt ergeben, erfolgt die Zuordnung zunächst nicht zu Fahrzeugen, sondern zu Fahrtrouten, die zunächst noch nach Hinrichtung und Rückrichtung getrennt gebildet werden. Erst nach einer Verknüpfung dieser Teil-Fahrtrouten zu einem Gesamtumlauf wird die Zuordnung zu einem Fahrzeug vorgenommen.

Eine Zuordnung aller Fahrtwünsche eines Bedienungsintervalls ist nur möglich, wenn die Anzahl der in der Gesamtheit der eingesetzten Fahrzeuge verfügbaren Plätze größer ist als die Anzahl der in diesem Bedienungsintervall zu befördernden Fahrgäste. Ansonsten muss die Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge entsprechend erhöht werden.

Die Zuordnung der Fahrgäste beginnt an der Haltestelle mit den meisten ein- oder aussteigenden Fahrgästen. Die bevorzugte Abarbeitung der Haltestellen mit der größten Anzahl der zusteigenden und aussteigenden Fahrgäste folgt einer Dominanzregel: Der Wert  $w$ , der aus dieser Regel resultiert, muss normalerweise die Position  $p$  und die „Masse“  $m$  der Belastung  $b$  an einem beliebigen Knoten Rechenschaft geben:  $w(m_b, p_b) = m_b^\alpha p_b^\beta$ . Im vorliegenden Verfahren wird diese Technik mit  $\alpha = 1$  und  $\beta = 0$  benutzt.

Gibt es mehrere Haltestellen mit derselben Größe der Fahrgastgruppe, werden sie parallel behandelt. Für jede dieser Haltestellen und jede schon gebildete Fahrtroute wird geprüft, ob die Nachfrage an der Haltestelle unter Einhaltung der Randbedingungen der Fahrzeugkapazität und des Grenzwertes für den zulässigen Umweg in die verschiedenen Fahrtrouten eingeordnet werden kann. Diejenige Zuordnung wird vorgenommen, bei der sich ein Minimum an zusätzlicher Weglänge für die Fahrtroute ergibt. Durch diese Vorgehensweise wird erreicht, dass die Fahrtrouten im Hinblick auf mögliche Umwege so „schlank“ wie möglich bleiben. Die Suche nach der besten Route wird mit Hilfe einer vollständigen Enumeration durchgeführt, deren rechentechnischer Aufwand angesichts der wenigen Fahrtrouten vertretbar erscheint.

Falls eine Einbindung der Nachfrage an den betrachteten Haltestellen in bereits vorhandenen Fahrtrouten wegen eines Verstoßes gegen die Randbedingungen nicht möglich ist, muss eine zusätzliche Fahrtroute eröffnet werden. Die Eröffnung einer zusätzlichen Fahrtroute erfordert jedoch den Einsatz eines zusätzlichen Fahrzeugs. Sollte die Anzahl der verfügbaren Fahrzeuge nicht ausreichen, um die notwendige Zahl von Fahrtrouten zu bilden, gibt es zwei Auswege:

- Durch eine Vergrößerung des Grenzwertes für den Umwegfaktor wird die Bündelungsfähigkeit der Fahrzeuge bzw. Fahrtrouten erhöht, so dass in eine Fahrtroute ggf. zusätzliche Fahrgastgruppen eingebunden werden können. Dabei ist es ratsam, den Umwegfaktor ausgehend von dem ursprünglichen Wert schrittweise zu erhöhen, bis eine zulässige Lösung gefunden wurde oder bis der maximal zulässige Grenzwert erreicht ist.
- Wenn eine Beförderung der Fahrgäste durch eine Erhöhung des Grenzwertes für den Umwegfaktor nicht gelingt, müssen zusätzliche Fahrzeuge eingesetzt werden. Dies können Taxis sein, die durch die Betriebsleitzentrale beim örtlichen Taxiunternehmer geordert werden. Um die Kosten in Grenzen zu halten, sollte das Taxi zu Haltestellen eingesetzt werden, die möglichst nahe am Verknüpfungspunkt liegen. Sofern ein solcher Fall selten auftritt, ist der Einsatz eines zusätzlichen Taxis billiger als die ständige Vorhaltung eines weiteren Fahrzeugs der Regelgröße.

Bei der Lösungssuche zeigt sich ein grundlegender Unterschied in der Vorgehensweise von Planer und Rechner: Der Planer kann optische Zusammenhänge intuitiv verarbeiten. Der Rechner kann dagegen nur nach festen Regeln vorgehen. Bei der Zuordnung von Fahrgästen zu Fahrzeugen und der Durchmusterung der einzelnen Haltestellen und Fahrzeuge kann es deshalb zu Wiederholungen von Rechenschritten kommen, die zu keiner Verbesserung der Lösung führen und lediglich Rechenzeit kosten. Deshalb wird eine aus der optischen Betrachtung abgeleitete Hilfsgröße eingeführt. Wenn nämlich die Haltestellen weit auseinander liegen, würde dies zu einem zu großen Umweg führen. Solche Haltestellen werden von vorn herein aus dem Rechenvorgang ausgeschlossen. Dies geschieht dadurch, dass ein Sektor, für den die mögliche Einbindung einer Haltestelle untersucht wird, durch einen Winkel zwischen der kürzesten Verbindung zwischen der Anfangshaltestelle einer Fahrt und der Verknüpfungshaltestelle und der Sektorgrenze gekennzeichnet wird.

Um den mit der Zuordnung von Haltestellen zu Fahrtrouten verbundenen Suchaufwand zu verkürzen, wird ein Winkel eingeführt. Für jede Flächenhaltestelle wird der Winkel bestimmt, den die

Verbindung dieser Haltestelle zur Verknüpfungshaltestelle bildet. Die Winkel werden aus den Koordinaten  $x$  und  $y$  der Haltestellen über die Beziehung  $\alpha_i = \arctan x/y$  ermittelt:

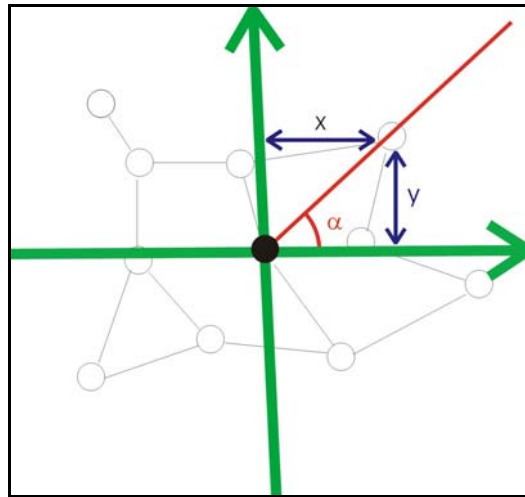


Abb. 5-1: Abgrenzung eines Winkels

Durch den Vergleich der Winkel zwischen den Haltestellen kann dann entschieden werden, ob eine Route aufgrund der bereits zugeordneten Haltestellen auch noch die neue Haltestelle aufnehmen kann. Da zu vermuten ist, dass ein Fahrgast eine größere Wahrscheinlichkeit hat, von einem Fahrzeug bedient zu werden, das Haltestellen in der Nähe seiner eigenen Haltestelle bedient, hat man in der Literatur<sup>4</sup> die sogenannte „Nachbarschaft eines Knotens“ definiert. Im vorliegenden Verfahren wird diese Operation umgekehrt durchgeführt: Man versucht, nicht die Nachbarschaft zu definieren sondern die Haltestellen, die in weiterer Entfernung liegen. Man kann bei solchen weiter entfernt liegenden Haltestellen a priori ausschließen, dass sie von demselben Fahrzeug bedient werden. Diese Operation geht bedeutend schneller, als die optimale Route zu berechnen und den Umwegfaktor zu ermitteln, denn dazu müsste die Haltestelle probeweise eingebunden und der dadurch entstehende Mehrweg berechnet werden. Der Grenzwert des Winkels ist abhängig von den Besonderheiten des Netzes und vom Grenzwert des Umwegfaktors. Diese Abhängigkeit wird nicht algorithmisch formuliert, sondern durch Proberechnungen bestimmt.

Die Benutzung eines Winkels als Tabu-Technik ist neuartig, obwohl der Winkel andernorts schon als Positionsindikator benutzt worden ist, z.B. in der Sweep-Methode (vgl. Kapitel 4). Dort ist der Winkel der Parameter, den man benutzt, um zwei Knoten auf derselben Route zu bedienen. In STRIDER benutzt man den Winkel, um auszuschließen, dass zwei weit auseinander liegende Knoten von demselben Fahrzeug bedient werden. Dennoch muss man mit dieser Operation vorsichtig sein: Eine zu weit gefasste Grenze lässt das Verfahren unnötige Operationen durchführen und verlängert daher die Rechenzeit. Eine zu eng gefasste Grenze verhindert mögliche Zuordnungen und verschlechtert die Qualität der Lösung.

<sup>4</sup> Siehe z.B. ROUSSEAU, L.-M.; GENDREAU, M.; PESANT, G. (2002) oder LIU, F. F. und SHEN, S.Y. (1999)

Die Größe des Winkels wird im Zusammenhang mit dem zulässigen Umwegfaktor festgelegt. Er wird gebildet aus der Verbindung zwischen der ersten von dem Fahrzeug bedienten Haltestelle und der Verknüpfungshaltestelle und dem beidseitigen Antrag des Winkels an diese Verbindungslinie. Der Winkel stellt eine weitere Randbedingung dar, d.h. die Zuordnung in der o.g. Weise erfolgt erst, wenn neben den bisherigen Randbedingungen die Haltestelle innerhalb des Teilsektors liegt, die von dem betreffenden Fahrzeug über den Winkel gebildet wird.

Um zu vermeiden, dass bei einer geringeren Anzahl von Fahrtrouten der Hinfahrt (z.B. im morgendlichen Berufsverkehr) Fahrzeuge leer in die Fläche fahren müssen, kann die Anzahl der Routen für die Hinfahrt dadurch erhöht werden, dass der Grenzwert für den Umwegfaktor verringert wird. Dadurch würde die Beförderungsqualität für die Fahrgäste steigen.

Die Winkeltechnik ist ein Wunderpunkt dieses Verfahrens. Es ist klar, dass es Netze geben kann (z.B. Netze mit natürlichen Hindernissen wie Flüsse, Bergen usw.), in denen diese Prozedur kein sinnvolles Ergebnis liefert. Diese Technik ist nur ein einfacher Versuch, Operationen einzusparen und Rechenzeit zu gewinnen. Als mögliche Alternative können Korridore verwendet werden, deren Abgrenzungen durch eine rechenaufwendige Kalkulation für jedes Netz definiert werden können. In diesem letzten Fall wäre aber das Verfahren nicht selbstständig, sondern von einer Datenbank abhängig. In der Abbildung 5-2 ist das Verfahren im Zusammenhang dargestellt.

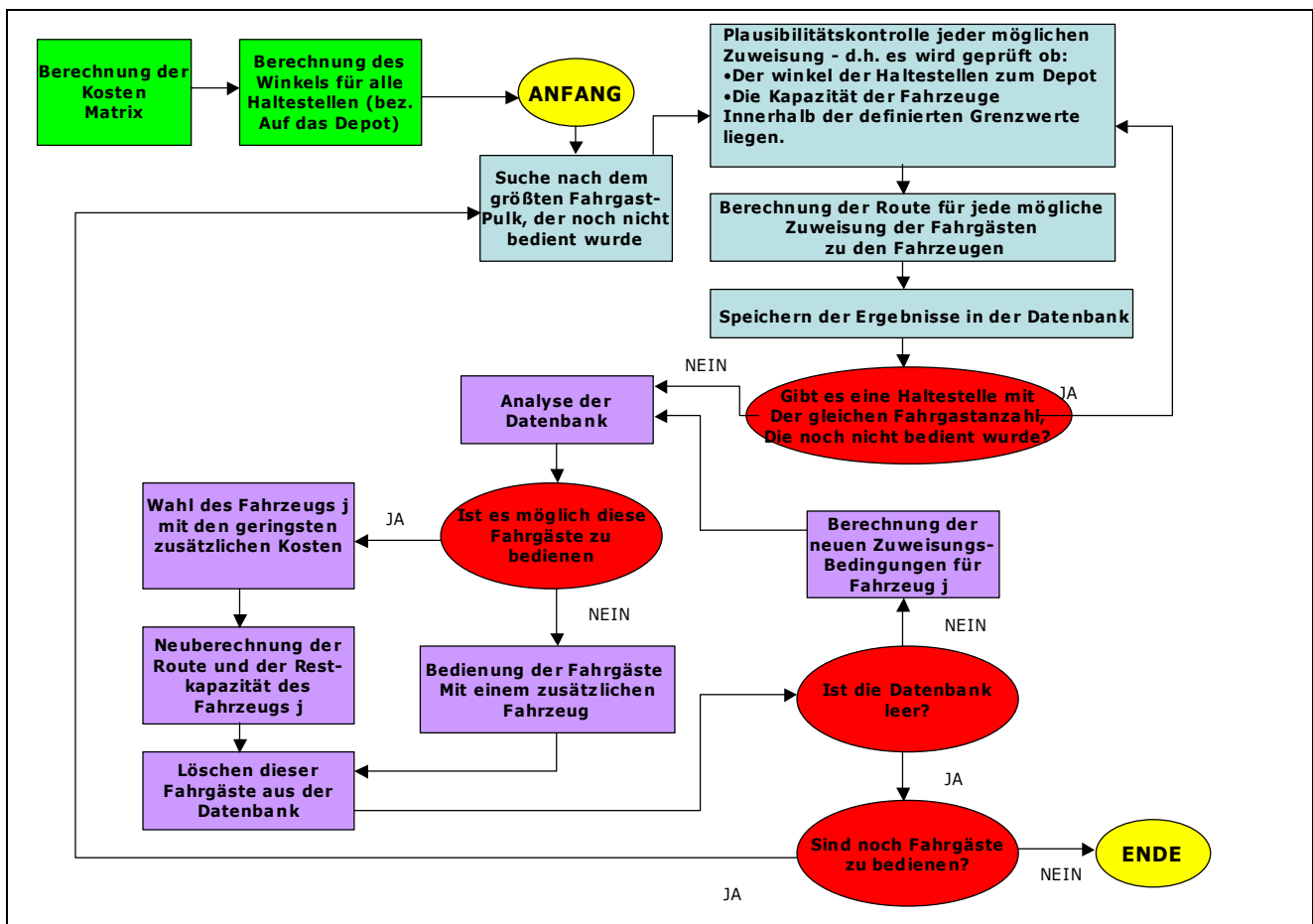


Abb. 5.2: Ablauf des Verfahrens, um die Anfangslösung zu berechnen



### 5.2.4 Verbesserung der Ausgangslösung

Das beschriebene Verfahren für die Erzeugung einer Ausgangslösung reduziert das VR-Problem zu  $n$ -TSP-Problemen, wobei  $n$  die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge ist. Das Verfahren berechnet für jedes Fahrzeug die beste Route. Das Verhältnis und der Unterschied zwischen der kalkulierten Lösung und der globaloptimalen Lösung hängt jedoch von der Zuordnung der Haltestellen zu den Fahrzeugen ab.

Mit dem Ziel, die Ausgangslösung zu verbessern und zu einer mindestens lokal optimalen Lösung zu gelangen, sind zwei sogenannte „Saving Procedures“ implementiert worden.

Eine Lösung zu verbessern bedeutet primär zusätzliche Fahrzeuge zu sparen (falls nicht genügend disponierte Fahrzeuge zur Verfügung stehen). Ist dieses nicht möglich, so sollte versucht werden, Kilometer zu sparen.

Die Anwendung solcher Prozeduren wird erleichtert, wenn der Lösungsraum nicht zu groß und nicht zu kompliziert strukturiert ist. In diesem Fall empfiehlt sich die Benutzung eines Zyklus von zwei einfachen Prozeduren, die im folgenden beschrieben sind. Die angewandten Prozeduren wurden schon sehr oft in der Literatur mit Erfolg angewendet. (vgl. FRIZZELL, GIFFIN, 1995).

Die erste Prozedur („Insert“) versucht, die Fahrgastgruppe, die schon einem Fahrzeug zugeordnet wurde, mit einem anderen Fahrzeug zu bedienen:

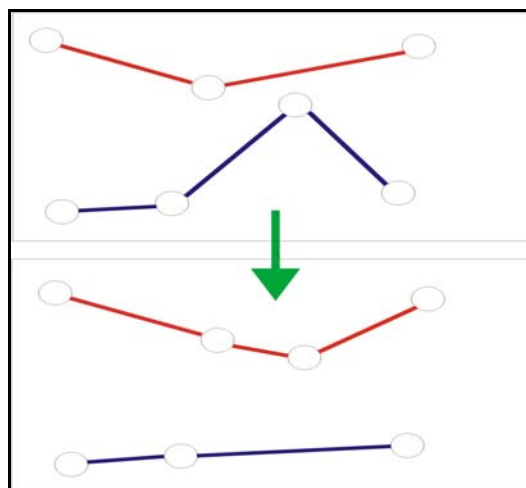


Abb. 5-3: Prozedur „Insert“

Die Prozedur „Exchange“ tauscht zwei Gruppen von Fahrgästen aus, die zwei verschiedenen Fahrzeugen zugeordnet worden sind:

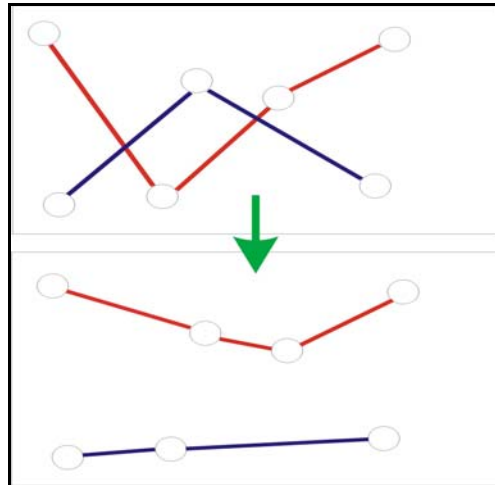


Abb. 5-4: Prozedur „Exchange“

Jede Prozedur startet mit der ersten bedienten Haltestelle des ersten Fahrzeuges. Das zweite Fahrzeug ist der erste mögliche Kandidat.

Die Sequenz der durchgeführten Operationen möchte nachweisen, dass

- die Winkeldifferenz zwischen der berücksichtigten Haltestelle und dem vom Fahrzeug bedienten äußersten Knoten verträglich ist,
- die Randbedingung bezüglich des Fassungsvermögens nicht verletzt wird,
- der maximale Umwegfaktor nicht verletzt wird.

Falls die Randbedingungen eingehalten sind und die neue Lösung ein Fahrzeug oder Fahrleistung einspart, wird diese Lösung als die neue beste Lösung berücksichtigt. Der Zyklus der beschriebenen Prozeduren wird solange fortgesetzt, wie die Lösung am Anfang schlechter ist als die Lösung am Ende. Um zu vermeiden, dass ein Zyklus zu lange dauert, muss bei komplizierten Problemen darauf geachtet werden, dass das Programm nach einer bestimmten Anzahl von Wiederholungen abbricht. Falls das passiert, wird keine optimale Lösung erreicht; Das Problem wird desto trotz technisch ausführbar gelöst. Die auf diese Weise gefundene Lösung ist die endgültige Lösung des Problems. Diese „stabile“ Lösung ist per Definition mindestens ein lokales Optimum, da sie die beste Lösung in der Umgebung der Anfangslösung ist. Die Prozeduren erlauben dem Verfahren, die beste Lösung innerhalb eines Kreises zu finden, unabhängig von der beliebig gewählten Anfangslösung. Zwei dem Kreis angehörige Anfangslösungen führen zur selben Endlösung.

Das Ziel des Verfahrens ist die Berechnung einer Lösung, die unter bestimmten Randbedingungen, die die Qualität der Bedienung der für die Fahrgäste gewährleisten, die Kosten minimiert. In den Lösungen, in denen zusätzliche Fahrzeuge eingesetzt werden, muss versucht werden, die Anzahl diese Fahrzeuge zu minimieren. Deswegen kann in diesen Lösungen der Umwegfaktor in der Verbesserungsphase erhöht werden.

Es gibt Belastungssituationen, in denen das Verfahren eine geringe Anzahl von Lösungen findet. Das kann entweder bedeuten, dass es keine bessere gibt, oder dass es diese nicht finden kann. Im letzteren Fall ist es notwendig, die Prozeduren weiter zu verbessern. Es gibt andere Belastungssitua-

tionen, in denen das Verfahren mehrere mögliche Lösungen findet. In diesem Fall kann nicht gesagt werden, wie viele mögliche Lösungen es im Raum gibt, welche das Verfahren nicht berücksichtigen kann, sondern es können nur Anmerkungen über die Qualität der Anfangslösung im Bezug auf die endgültige, lokaloptimale Lösung gemacht werden. Makroskopisch kann aber gesagt werden: Je mehr Lösungen das Verfahren analysiert, desto wahrscheinlicher ist es, dass der analysierte Lösungsraum groß ist.

Mit anderen Worten: Die Qualität der Lösung hängt davon ab, wie groß der Raum der gesuchten Lösungen (roter Kreis im nächsten Bild) im Bezug auf die möglichen Lösungen ist. Falls der Unterschied nicht sehr groß ist, kann angenommen werden, dass die Qualität der erreichten Lösung zufriedenstellend ist, bzw. dass STRIDER sogar die globaloptimale Lösung gefunden hat.

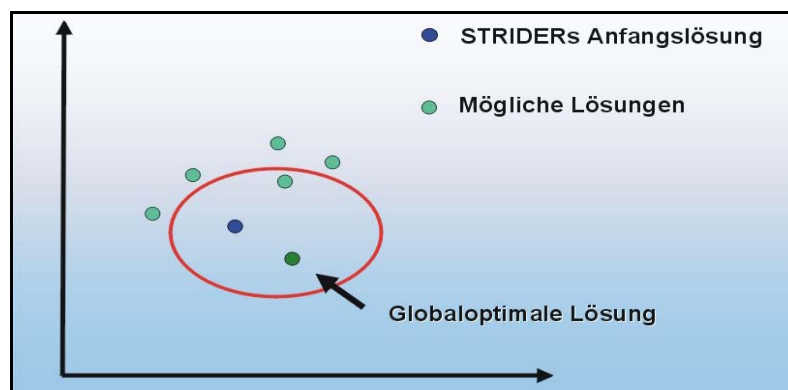


Abb. 5-5: Mögliches Verhältnis zwischen der STRIDER-Lösung und der optimalen Lösung

### 5.2.5 Paarweise Verknüpfung der Fahrtrouten

Bei der Zuordnung der Fahrgäste zu den einzelnen Fahrzeugen muss die räumliche Verteilung der Fahrzeugstandorte nach Abschluss der Bedienung im Auge behalten werden. Bei unterschiedlicher Verkehrsnachfrage bei den beiden Fahrtrichtungen, wie sie insbesondere im Berufsverkehr entsteht, kann der Fahrzeugbedarf unterschiedlich sein. Dennoch müssen alle Fahrzeuge an der Bedienung beteiligt werden, weil sonst bei Verzicht auf einzelne Fahrzeuge der Anfahrtsweg dieses Fahrzeugs zur Bedienung in Gegenrichtung zu groß werden würde. Hierdurch entstünden nicht nur zusätzliche Kosten, sondern auch ein zusätzlicher Zeitbedarf für die Anfahrt zur Ausgangshaltestelle, der den Fahrplan sprengen könnte.

Bei der Fahrtrichtung von den Flächen-Haltestellen zur Verknüpfungshaltestelle enden alle Routen an der Verknüpfungshaltestelle. Damit ist es gleichgültig, welches Fahrzeug anschließend in der Gegenrichtung welche Route übernimmt. Bei der Fahrtrichtung von der Verknüpfungshaltestelle zu den Flächenhaltestellen enden die Routen jedoch an unterschiedlichen Haltestellen, und es hängt von den zufälligen Fahrtwünschen ab, welche Haltestelle dies ist. Diese Endhaltestelle ist dann nur zufällig identisch mit der Anfangshaltestelle für die Fahrt in Gegenrichtung. Im Regelfall bedarf es einer Umsetzfahrt von der Endhaltestelle der nach außen führenden Fahrt zur Anfangshaltestelle der

nach innen führenden Fahrt. Aus diesem Grunde kann die Bildung der Fahrtrouten für die Fahrt von den Flächen-Haltestellen zur Verknüpfungshaltestelle noch nicht an physische Fahrzeuge gebunden werden. Die Routenbildung erfolgt deshalb zunächst mit Routennummern. Die Zuordnung eines physischen Fahrzeugs zu einer Routennummer hängt dann davon ab, wo sich die einzelnen Fahrzeuge befinden. Hier stellt sich erneut das Problem einer Zuordnung unter der Bedingung einer Minimierung der Umsetzwege. Diese Umsetzwege sind bei der Berechnung der Fahrtlängen der einzelnen Fahrzeuge mitzurechnen.

Eine zusätzliche Bedingung für die Verknüpfung der Fahrtrouten ist die Einhaltung des Zeitraums zwischen dem Anschluss von dem höherrangigen System und dem Anschluss an das höherrangige System am Verknüpfungspunkt, jeweils in Richtung auf das höchstrangige Zentrum. Bei der Verknüpfung der Fahrzeugrouten und ihrer Zuordnung zu Fahrzeugen kann sich ergeben, dass die Fahrzeit für die beiden Teilrouten (vom Verknüpfungspunkt in die Fläche und umgekehrt) einschließlich der Umsetzfahrt in der Fläche und den Zeitpuffern für die Zuverlässigkeit der Anschlüsse länger ist als die verfügbare Zeitdifferenz zwischen den Anschlüssen. In diesem Fall muss eine andere Verknüpfung versucht werden, die dann natürlich von der Bedingung einer Minimierung der Summe der Umsetzwege abweicht. Ist auch dann keine Lösung zu erreichen, die der Zeitbedingung entspricht, muss ein zusätzliches Fahrzeug eingesetzt oder die Randbedingung eines maximal zulässigen Umwegs aufgeweicht werden.

Bei der Fahrt von der Verknüpfungshaltestelle in die Fläche erfolgt die Anmeldung von Fahrtwünschen überwiegend beim Einstieg in das Fahrzeug. Wenn der Sektor von mehr als einem Fahrzeug bedient wird, steht vor der Kenntnis aller Fahrtwünsche noch nicht fest, welches Fahrzeug welche Route bedient und in welches Fahrzeug der Fahrgast mit einer bestimmten Zielhaltestelle einsteigen soll. Dieses Problem ist nur lösbar, wenn einer der beiden Fahrer die Fahrtwünsche aufnimmt und sie zur Leitzentrale übermittelt. Sobald er von der Leitzentrale die ermittelten Routen zurück bekommt, kann er den Fahrgästen mitteilen, in welches Fahrzeug sie einsteigen müssen. Diese Situation stellt hohe Anforderungen an die Verarbeitungsgeschwindigkeit der Routenbildung.

Wegen der Forderung nach einer zeitlichen Verknüpfung des Sektorbetriebs mit dem übergeordneten System in Richtung auf das höchstrangige Zentrum des Einsatzgebietes oder einen entsprechenden Bahnhof des SPNV (vgl. Kap. 3), darf die Fahrzeit des Sektorbetriebs für beide Richtungen nicht größer sein als die Zeitdifferenz zwischen der Ankunft des übergeordneten Systems aus Richtung des höchstrangigen Zentrums / SPNV-Bahnhof und seiner Abfahrt in Richtung dieses Zentrums / SPNV-Bahnhof. Dabei ist jeweils eine Anschlusssicherheit von 3 bis 5 Minuten zu berücksichtigen, je nachdem, ob das übergeordnete System warten kann (wie z.B. der Linienbus) oder nicht (wie z.B. der SPNV).

Der Spielraum für die Fahrzeit des Sektorbetriebs ist größer, wenn beide Richtungen zusammengefasst werden und kleiner, wenn die beiden Fahrtrichtungen getrennt berücksichtigt werden (z.B. jede Fahrtrichtung mit der Hälfte der verfügbaren Zeit).

Bei der zusammenfassenden Berücksichtigung beider Fahrtrichtungen – vom Verknüpfungspunkt in die Fläche und aus der Fläche zurück zum Verknüpfungspunkt – müssen erst die Routen beider Fahrtrichtungen bekannt sein, bevor entschieden werden kann, ob die Zeit ausreicht oder nicht.

Nach Abschluss des Zuordnungsprozesses der jeweiligen Richtung werden die Fahrzeugrouten bestimmten Fahrzeugen zugeordnet. Obwohl es im Interesse einer möglichst geringen Fahrtleistung sinnvoll ist, die Fahrtroute aus der Fläche zur Verknüpfungshaltestelle demjenigen Fahrzeug zuzuordnen, das nach Abschluss der Fahrt von der Verknüpfungshaltestelle in die Fläche den geringsten Abstand zur Anfangshaltestelle dieser Route hat, kann von diesem Prinzip abgewichen werden, wenn es zu Zeitproblemen kommt und eine anderweitige Zuordnung zwar eine höhere Fahrtleistung verursacht aber die Einhaltung der Zeitbedingung ermöglicht. Der Rechner muss dann alle Zuordnungsmöglichkeiten durchspielen. Bei der Überprüfung der Zeitbedingung muss auch die Umsetzzeit zwischen den beiden Fahrtrichtungen berücksichtigt werden. Falls sich die Zeitbedingung trotz der variablen Zuordnung zwischen Fahrzeugrouten und Fahrzeugen für die Fahrt aus der Fläche zur Verknüpfungshaltestelle mit den verfügbaren Fahrzeugen nicht erfüllen lässt, muss wie schon bei der Überlastung von Fahrzeugen ein zusätzliches Fahrzeug, z.B. in Form eines Taxis, eingesetzt werden.

Die Kontrolle der Fahrzeit setzt voraus, dass der Rechner nicht nur die Länge der Fahrzeugrouten erfasst, sondern auch ihre Fahrzeit. Über die Wahrscheinlichkeit, mit der die einzelnen Routen auftreten, lässt sich eine früheste Abfahrtszeit und Ankunftszeit an den Haltestellen in der Fläche ermitteln und im Fahrplan angeben.

### 5.2.6 Rechentechnisches Vorgehen

Da es sich bei STRIDER um ein on-line ablaufendes Verfahren handelt, muss das rechentechnische Vorgehen so organisiert werden, dass Rechenzeit gespart wird. Dies gilt insbesondere für die in unterschiedlichen Schleifen ablaufende Einbindung der Fahrtwünsche in Fahrzeugrouten, die in der Abbildung 5.2 dargestellt ist.

Um den Rechenprozess zu beschleunigen, werden sämtliche Eingangsdaten, Ergebnisdaten und Zwischendaten in einer Datenbank gehalten. Sofern sich für die Felder der Zwischendaten aufgrund des Rechengangs neue Werte ergeben, werden die alten überschrieben.

Die wichtigsten Datenfelder sind:

- Nummer und Koordinaten der Haltestellen,
- Netz der von den eingesetzten Fahrzeugen befahrbaren Wege zwischen den Haltestellen,
- Art und Fassungsvermögen der Fahrzeuge,
- Anzahl der zu den verschiedenen Bedienungsintervallen verfügbaren Fahrzeuge,
- Anzahl der Fahrgäste an den Haltestellen,
- Länge der Wege zwischen den Haltestellen,
- Fahrzeiten zwischen den Haltestellen,
- Kürzeste Wege zwischen allen Haltestellen,
- Grenzwert für den Umwegfaktor, getrennt nach Normalbetrieb und maximalem Wert,

- Grenzwert für die Winkeldifferenz, nach der sich ein Einbindungsversuch richtet,
- Haltestellenfolge, Wegelängen, Fahrzeiten und begrenzende Winkel der Fahrtrouten,
- Paarweise verknüpfte Fahrtrouten einschließlich Umlaufdauer.

Zunächst werden die Eingangsdaten aufbereitet. Diese Aufbereitung steht vor dem Rechenprozess der Einbindung der Fahrtwünsche in Fahrzeugrouten und der Verknüpfung der paarweisen Fahrzeugrouten für Hinfahrt und Rückfahrt und ist unabhängig von den Ergebnissen dieses Prozesses. Hierzu gehört auch die Suche nach den kürzesten Wegen, die ebenfalls vor dem eigentlichen Rechenprozess abläuft und unveränderliche Werte liefert.

Bei der Einbindung der Fahrtwünsche in die Fahrtrouten müssen Ziele wie die Minimierung der Fahrtrlänge und Randbedingungen wie die Begrenzung des Fassungsvermögens der Fahrzeuge, des Umwegfaktors und der Winkeldifferenz berücksichtigt werden. Das Ziel einer Einbindung der Fahrtwünsche in eine Fahrtroute mit dem geringsten Mehraufwand an Fahrtrlänge macht es erforderlich, die Einbindungsmöglichkeit zwischen allen Haltestellen mit derselben Anzahl an zu- oder aussteigenden Fahrgästen und allen bereits gebildeten Fahrtrouten zu überprüfen. Da die Ermittlung der Fahrtrlänge aufwendiger ist als die Überprüfung der Randbedingungen, wird mit der Überprüfung der Einhaltung der Randbedingungen begonnen. Sobald eine Randbedingung verletzt ist, wird der weitere Prozess abgebrochen und dieser Fall in eine Tabuliste eingeordnet. Andernfalls wird die Ermittlung der Fahrtrlänge fortgesetzt.

Die Zwischendaten münden teilweise unmittelbar in Ergebnisdaten. Teilweise müssen aus diesen Daten jedoch noch weitere Ergebnisdaten abgeleitet werden.

Einige Ergebnisse haben lediglich statistische Bedeutung wie z.B. die Verteilung der realisierten Umwege. Die Ermittlung dieser Daten erfolgt off-line im Anschluss an den Einbindungsprozess.

### 5.3 Kenngrößen zur Beurteilung der Qualität der Lösung

Bei der Planung des Sektorbetriebs und der Zuordnung der Fahrtwünsche zu den Fahrzeugen fällt eine Reihe von fahrgastbezogenen und betrieblichen Kennwerten an. Diese Kennwerte ermöglichen es, die Qualität der Lösung hinsichtlich der Verkehrsqualität und des Betriebsaufwandes anzugeben. Daraus können dann planerische Konsequenzen bezüglich der räumlichen Abgrenzung des Sektors, der Anzahl der Haltestellen und der Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge gezogen werden.

Folgende Kenngrößen sind in diesem Zusammenhang von Bedeutung:

- Lage der Haltestellen (Koordinaten),
- Wege und Fahrzeiten zwischen den Haltestellen,
- Verkehrsnachfrage an den einzelnen Haltestellen zu den verschiedenen Bedienungszeitpunkten,
- Bedienungshäufigkeit der einzelnen Haltestellen,
- Häufigkeitsverteilung der Umwege der Fahrgäste,
- Anzahl der zu den einzelnen Bedienungszeitpunkten planmäßig eingesetzten und erforderlichen Fahrzeuge,
- Fahrtlängen der Fahrzeuge zu den verschiedenen Bedienungszeitpunkten,
- Häufigkeitsverteilung der Umwege der Fahrzeuge.

Die Werte dieser Kenngrößen sollten in geeigneter Weise für eine Aktualisierung des Angebots (Planung) zur Verfügung gestellt werden.

Die kontinuierliche Messung der Fahrzeiten zwischen den Haltestellen ist kein Problem der Steuerung des Sektorbetriebs. Hierfür gibt es Messverfahren, die unabhängig von der Betriebsform sind und sich auch im ländlichen Raum teilweise schon im Einsatz befinden (UNDERBERG, 2004).





## 6 Beispielsrechnungen

### 6.1 Sektorbetrieb im allgemeinen ÖPNV

Bei der Anwendung des Verfahrens wird nach der Bestimmung der erforderlichen Fahrzeuganzahl (offline, im Rahmen der Planung) und der Zuordnung der Fahrtwünsche auf die im Einsatz befindlichen Fahrzeuge unterschieden (online Steuerung des Betriebsablaufs). Dabei sind die Rechengänge in beiden Fällen gleich, mit der Möglichkeit, dass die Anzahl der im Einsatz befindlichen Fahrzeuge für die Abwicklung der Fahrtwünsche im Rahmen der gesetzten Randbedingungen nicht ausreicht und zusätzlich ein Taxi eingesetzt werden muss. Wegen der Gleichartigkeit der Rechengänge wird der Rechengang nachfolgend nur einmal demonstriert und zwar für die Bestimmung der Anzahl der benötigten Fahrzeuge.

Die Demonstration des Rechengangs erfolgt anhand des Sektors „Uelsen“ im Landkreis Grafschaft Bentheim. Dafür werden folgende Eingangsdaten gewählt:

- Anzahl und Lage der Haltestellen, die bei Nachfrage bedient werden können (Abb. 6-1),
- Fahrtrichtung: Aus der Fläche zum Verknüpfungspunkt (Haltestelle 1),
- Größe der eingesetzten Fahrzeuge: 8 Sitzplätze,
- Verkehrsnachfrage für eine Fahrt (Lage der Haltestellen, an denen Nachfrage besteht: Abb. 6-2, Größe der Nachfrage: Tab. 6-1).
- Maximal zulässiger Umweg: Umwegfaktor 1,40 (Verhältnis zwischen tatsächlichem Weg und auf dem vorhandenen Wegenetz kürzest möglichem Weg).

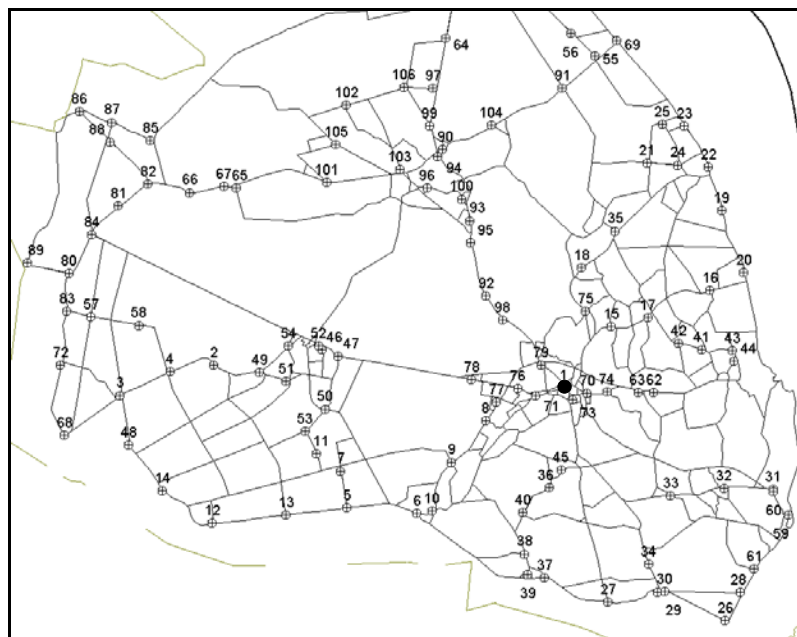


Abb. 6-1: Haltestellennetz des Sektors

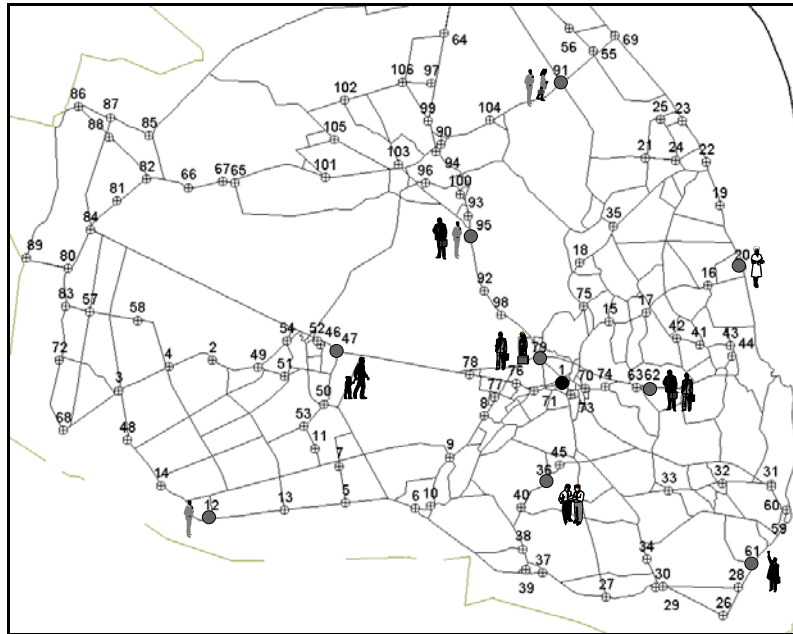


Abb. 6-2: Fahrtwünsche

zu bedienende Haltestelle	wartende Fahrgäste
12	1
20	1
36	2
47	2
61	1
62	2
79	2
91	2
95	2

Tab. 6-1: Größe der Nachfrage

Um im laufenden Betrieb bei periodischen und/oder zufälligen Schwankungen der Verkehrsnachfrage eine ausreichende Reserve an Busplätzen zu haben, muss die Verkehrsnachfrage für die Bestimmung der Anzahl der benötigten Busse größer gewählt werden als der Mittelwert der Verkehrsnachfrage über alle Fahrten. Falls die Anzahl der eingesetzten Busse nicht ausreicht, müssen zusätzliche Taxis geordert werden. Damit dieser Fall nicht zu häufig auftritt, wird für die Ermittlung der benötigten Busse ein Wert verwendet, der in  $x\%$  der Fälle nicht überschritten wird. Der Wert  $x$  wird in Abhängigkeit von der gewünschten Sicherheitswahrscheinlichkeit für das Nicht-Überschreiten festgelegt. Da es für solche Festlegungen aber bisher noch an Erfahrungen fehlt, müssen die Werte für die Verkehrsnachfrage zunächst frei gewählt werden. Diese Werte sollten anfangs ausreichend hoch sein.



Bus Nr.	Route	gefahrne km	Anzahl der Fahrgäste	Umfwegfaktor
1	<u>9</u> 1 93 <u>95</u> 92 98 <u>79</u> 1	9,388	6	1,13
2	<u>20</u> 16 17 15 1	5,628	1	1,00
3	<u>36</u> 45 73 1	3,055	2	1,00
4	<u>12</u> 53 50 <u>47</u> 78 76 71 1	11,171	3	1,18
5	<u>61</u> <u>62</u> 63 74 70 1	8,346	3	1,19
i.M.		7,518	3	1,10

Tab. 6-3: Anfangslösung: Routenverlauf und Kenngrößen  
(unterstrichen sind die bedienten Haltestellen)

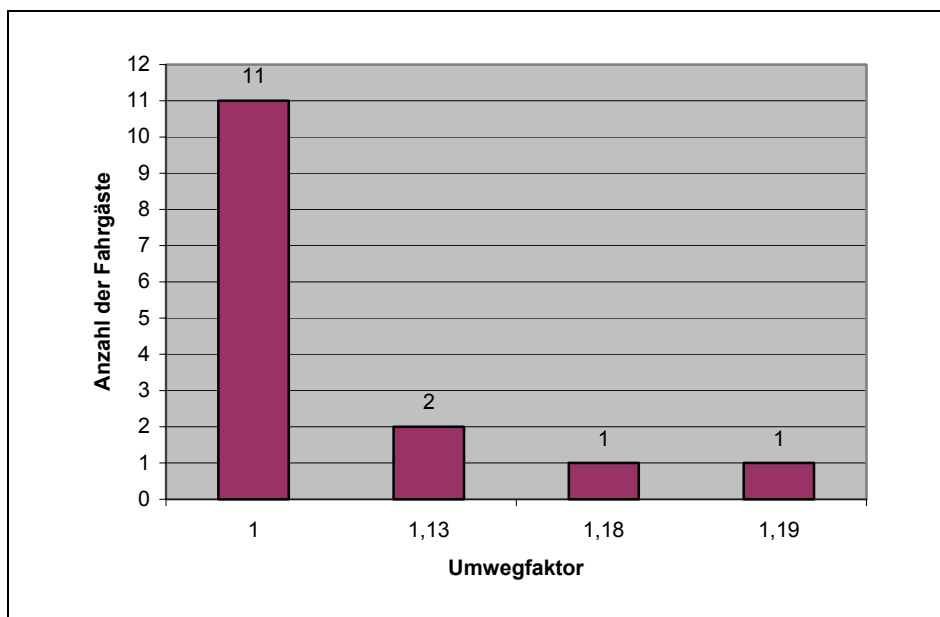


Abb. 6-4: Anfangslösung: Verteilung der Umwege der Fahrgäste

Diese Ausgangslösung wurde durch Austausch einzelner Haltestellen zwischen den Fahrzeugen verbessert (Tab. 6-5).

Verkehrsnachfrage		Von Bus Nr.	Zu Bus Nr.
Nr. der Haltestelle	Anzahl der Fahrgäste		
61	1	5	3
62	2	5	2

Tab. 6-5: Austausch der Haltestellen

Das mit dem Schritt der Verbesserung der Ausgangslösung erreichte Ergebnis ist in den Abbildungen 6-5 und 6-6 sowie in der Tabelle 6-6 dargestellt:

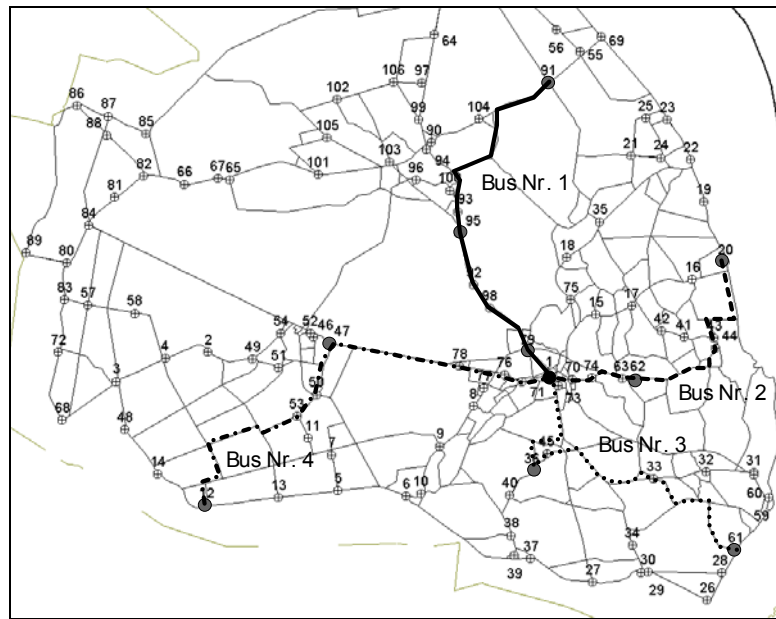


Abb. 6-5: Verbesserte Lösung: Anzahl und Verlauf der Routen

Bus Nr.	Route	gefahrenene km	Anzahl der Fahrgäste	Umfwegfaktor
1	<u>91</u> 93 <u>95</u> 92 98 <u>79</u> 1	9,388	6	1,13
2	<u>20</u> 43 44 <u>62</u> 63 74 70 1	7,286	3	1,29
3	<u>61</u> 33 45 <u>36</u> 45 73 1	9,577	3	1,37
4	<u>12</u> 53 50 <u>47</u> 78 76 71 1	11,171	3	1,18
i.M.		9,380	3,75	1,24

Tab. 6-5: Verbesserte Lösung: Routenverlauf und Kenngrößen (unterstrichen sind die bedienten Haltestellen)

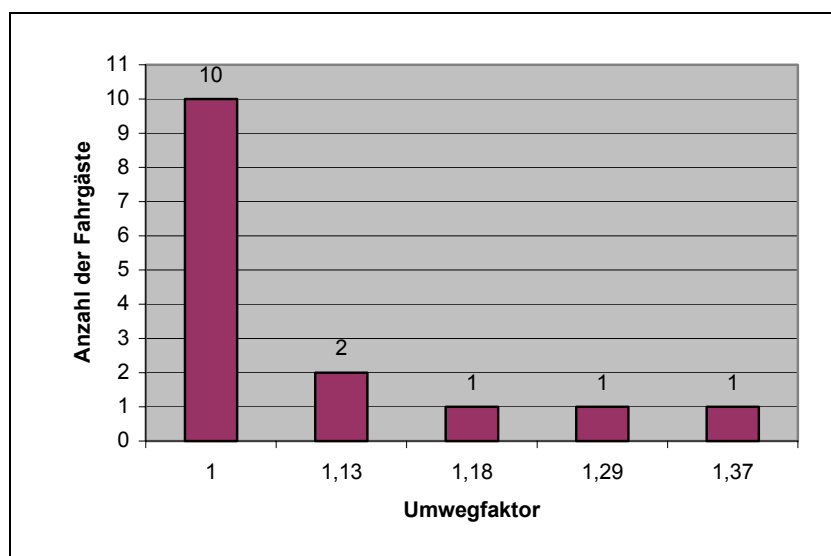
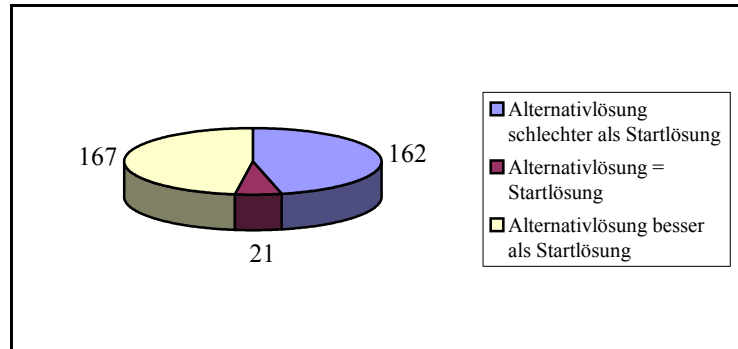


Abb. 6-6: Verbesserte Lösung: Verteilung und Mittelwert der Umwege der Fahrgäste

Um Informationen darüber zu bekommen, welches Verbesserungspotential in einer veränderten Zuordnung oder einem Austausch einzelner Haltestellen zwischen den Bussen liegt, wurde eine Vielzahl von Fällen durchgerechnet. Dabei ergibt sich das in der Abbildung 6-7 dargestellte Ergebnis.

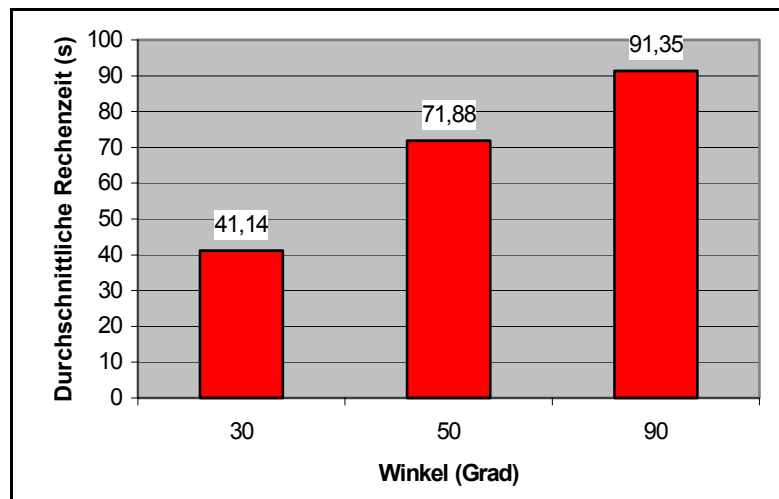


**Abb. 6-7:** Qualität der verbesserten Lösung im Vergleich zur Ausgangslösung

In 46% der Fälle hat die Startlösung schon die beste Lösung geliefert. Die veränderte Zuordnung oder der Austausch von Haltestellen brauchte keine Verbesserung mehr. In 48% der Fälle konnten dagegen Verbesserungen erreicht werden. In 6% der Fälle gab es nur eine einzige Lösung, die aus der Startlösung bestand.

Um die Rechengeschwindigkeit zu erhöhen, werden mittels eines Winkels unnötige Einfügeoperationen von vorn herein ausgeschlossen (vgl. Kap. 5).

In der Abbildung 6-8. wird die Abhängigkeit der Rechenzeit vom n Winkel dargestellt.



**Abb. 6-8:** Abhängigkeit der durchschnittlichen Rechenzeit vom gewählten Winkel

Falls man den Winkel von 90° auf 30° verkleinert, wird die Rechenzeit im Mittel um rd. 55% reduziert. Die Wahl des Winkels stellt somit ein äußerst wirksames Instrument zur Beeinflussung der Rechenzeit dar. Sie kann jedoch, wenn der Winkel zu klein gewählt wird, auch gute Lösungen verwerfen.

## 6.2 Sensitivitätsanalyse

Um die Wirkung der Randbedingungen auf die Qualität der Lösung zu untersuchen, wurde für die Zuordnung der Fahrtwünsche zu den Bussen eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

Als Randbedingungen der Sensitivitätsanalyse wurden Werte für folgende Größen festgelegt:

- Anzahl der zur Verfügung stehenden Busse,
- Kapazität der Busse,
- Maximal erlaubter Umwegfaktor und daraus abgeleitet maximal zulässiger Winkel.

Für die Sensitivitätsanalyse wurden zwei unterschiedliche Datenreihen erarbeitet.

- Für Datenreihe A werden dem Programm unabhängig von der Fahrgastzahl stets 5 Busse zur Verfügung gestellt. In dieser Datenreihe sind insgesamt 212 Belastungen mit je 12 Programmdurchläufen enthalten. Für Datenreihe A sind demnach insgesamt 2.544 Durchläufe protokolliert.
- Für Datenreihe B wird die Anzahl der zur Verfügung stehenden Busse variiert. Die Verfügbarkeit der Busse wird nach der Anzahl der Fahrgäste ausgerichtet. Mit dieser Datenreihe kann demnach der Einfluss der Anzahl an verfügbaren Bussen überprüft werden. Dieser Datenreihe liegen 1.536 Durchläufe aus 128 Belastungen zugrunde.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind nachfolgend dargestellt.

### Umwegfaktor

Entscheidend für die Bedienungsqualität ist nicht der Grenzwert für den Umwegfaktor, sondern der aus dem gesetzten Grenzwert resultierende tatsächliche Umwegfaktor. Er wird hier aus rechen-technischen Gründen nicht für die Fahrgäste sondern für die Fahrzeuge angegeben. Beide Größen stehen jedoch in enger tendenzieller Anhängigkeit.

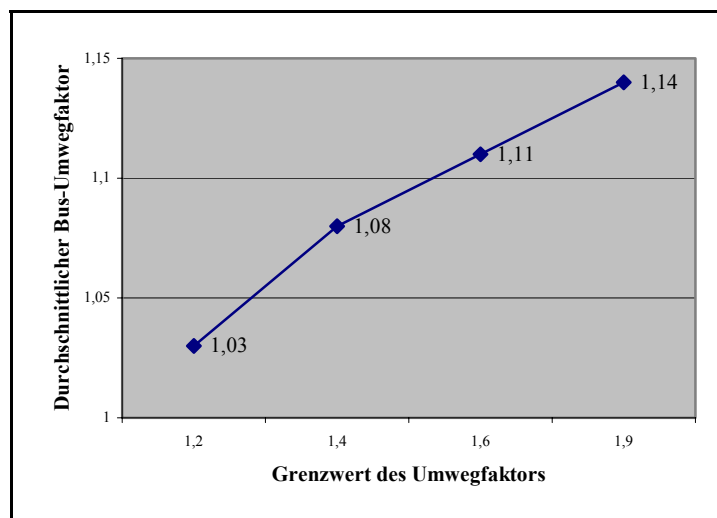


Abb. 6-9: Durchschnittlicher Umwegfaktor in Abhängigkeit vom vorgegebenen Grenzwert

Die tatsächlichen Bus-Umwegfaktoren steigen unterproportional zum Grenzwert des vorgegebenen maximalen Umwegfaktors. Steigert man z. B. den Grenzwert des Umwegfaktors um rd. 60% von 1,20 auf 1,90, so steigen die tatsächlichen Bus-Umwegfaktoren im Mittel nur um rd. 10% von 1,03 auf 1,14.

Es zeigt sich außerdem, dass

- die Einzelwerte für die Bus-Umwegfaktoren einer starken Streuung unterliegen.
- die Bus-Umwegfaktoren größer werden, falls sich die zu bedienenden Fahrgäste auf eine größere Zahl an Haltestellen verteilen.
- die Bus-Umwegfaktoren bei einer Erhöhung der verfügbaren Buszahl nur leicht abnehmen.

### Kilometerleistung

Die Kilometerleistung ist eine wichtige Kenngröße der Wirtschaftlichkeit. Zwischen dem Grenzwert des Umwegfaktors und der km-Leistung besteht folgende Abhängigkeit:

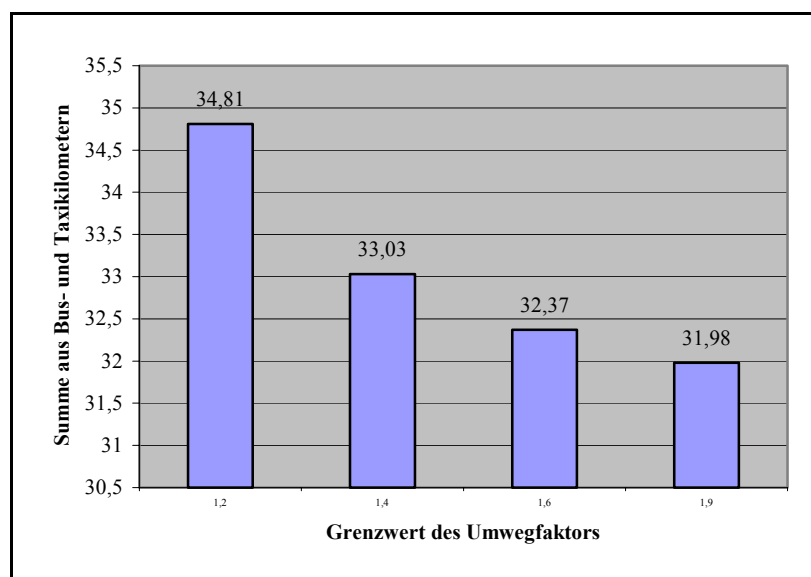


Abb. 6-10: Abhängigkeit der Gesamtkilometerleistung vom Grenzwert des Umwegfaktors

Die Kilometerleistung sinkt bei einem größer gewählten Grenzwert für den Umwegfaktor. Erhöht man den Grenzwert um rd. 60% von 1,20 auf 1,90, nimmt die Kilometerleistung i. M. nur um rd. 8 % ab.

Es zeigt sich außerdem, dass

- bei Erhöhung des Umwegfaktor-Grenzwertes vornehmlich die Taxi-Kilometerleistung sinkt,
- die Gesamtkilometerleistung bei einer größeren Anzahl verfügbarer Busse sinkt,
- die Gesamtkilometerleistung ansteigt, falls sich die Fahrgäste auf eine größere Zahl an Haltestellen verteilen.



## Busbedarf

Der Busbedarf hängt vom Besetzungsgrad der Busse ab. Entscheidend für einen wirtschaftlichen Einsatz ist eine hohe Auslastung der Fahrzeuge. Zwischen dem Grenzwert des Umwegfaktors und der Besetzung der Busse besteht folgende Abhängigkeit:

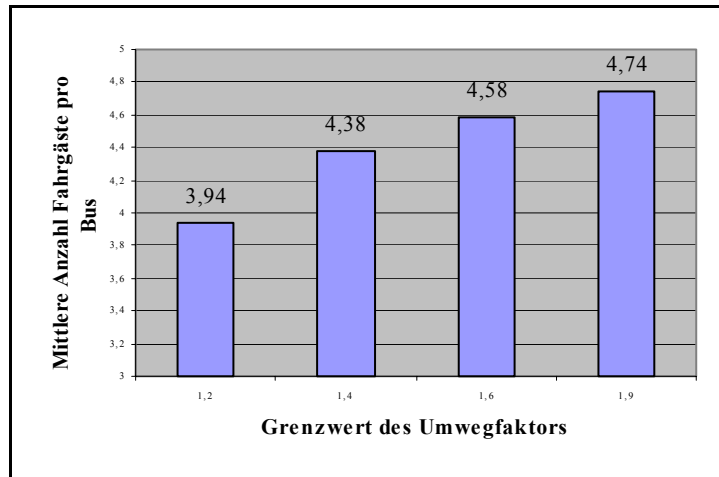


Abb. 6-11: Mittlere Besetzung der Busse in Abhängigkeit vom Grenzwert des Umwegfaktors

Eine Erhöhung des Grenzwerts des Umwegfaktors um rd. 60% von 1,20 auf 1,90 führt zu einer mittleren Erhöhung der Busbesetzung um rd. 20%.

Es zeigt sich außerdem, dass der Besetzungsgrad der Busse sinkt, falls sich die Fahrgäste auf eine größere Anzahl an Haltestellen verteilen.

## Taxibedarf

Der Bedarf an zusätzlichen Fahrzeugen in Form von Taxis beeinflusst die Wirtschaftlichkeit. Taxibedarf ist die wichtigste Kenngröße für die Wirtschaftlichkeit. Er ist stark abhängig vom Grenzwert des Umwegfaktors:

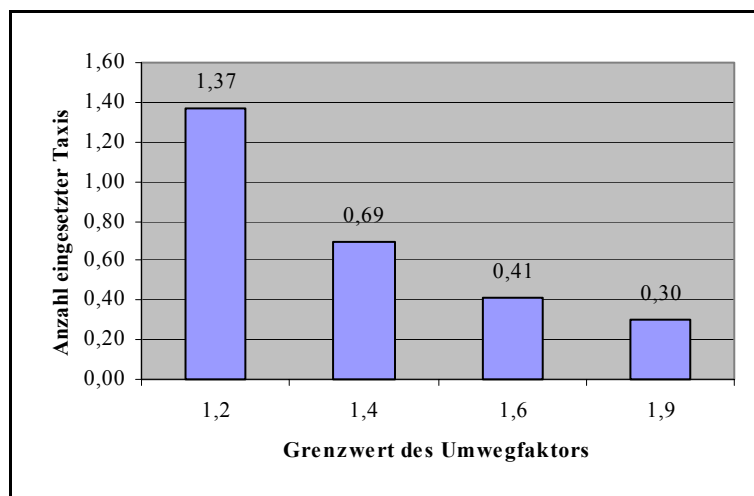


Abb. 6-12: Bedarf an Taxis in Abhängigkeit vom Grenzwert des Umwegfaktors

Wenn der Grenzwert des Umwegfaktors um rd. 60% von 1,20 auf 1,90 angehoben wird, nimmt der Bedarf an Taxis im Mittel um rd. 78 % ab,

Es zeigt sich außerdem, dass der Taxibedarf steigt, falls sich die Fahrgäste auf eine größere Anzahl an Haltestellen verteilen.

### 6.3 Schülerbeförderung

Obwohl STRIDER speziell für den Sektorbetrieb entwickelt wurde, lässt sich das Verfahren auch für die Optimierung des Schülerverkehrs verwenden. Beim Schülerverkehr geht es lediglich um eine Planungsaufgabe. Vor Beginn des Betriebs müssen die Anzahl der erforderlichen Fahrzeuge bestimmt und die Fahrtrouten festgelegt werden. Eine Steuerung entfällt, da sich der Ablauf des Schülerverkehrs an allen Unterrichtstagen in derselben Weise wiederholt. Lediglich am Beginn eines neuen Schuljahrs sollte die Planung erneut erfolgen. Hinsichtlich der Problemstruktur bestehen zwischen den beiden Aufgabenstellungen jedoch erhebliche Unterschiede: Im Sektorbetrieb des allgemeinen ÖPNV hat man es mit kleinen Bussen und der Bedienung von wenigen Haltestellen zu tun. Die Beispielrechnungen haben gezeigt, dass unter diesen Voraussetzungen das System stabil arbeiten kann und mit akzeptabler Rechenzeit plausible Ergebnisse liefert. Die Optimierung des Schülerverkehrs wirft dagegen zusätzliche Probleme auf: Wie bei allen Tourenplanungsproblemen, stieg auch hier die Rechenzeit exponential mit der Anzahl der zu bedienenden Haltestellen und der Größe der Busse an.

Die Beispielsrechnung für die Schülerbeförderung erfolgt anhand des Sektors der Samtgemeinde Uelsen im Landkreis Grafschaft Bentheim.

Die Eingangsdaten der Berechnung sind

- die zu bedienenden Haltestellen (Abb. 6-13),
- die Verkehrsnachfrage zwischen den Wohnstandorten und dem Schulstandort (Tab. 6-6),
- die Größe der Busse (hier: 65 Plätze),
- der Grenzwert des Umwegfaktors.

Die Verteilung der Haltestellen innerhalb des Untersuchungsraumes ist in der Abbildung 6-11 dargestellt. Die Wohnstandorte der Schüler werden zunächst der jeweils nächsten Haltestelle zugeordnet. Anschließend wird mit den Verkehrsbeziehungen zwischen den Haltestellen und den Schulstandorten gerechnet. Da bekannt ist, welche Schüler welche Schulen besuchen, wird die Matrix der Verkehrsbeziehungen nach den verschiedenen Schulen differenziert, sofern die Schulen soweit auseinanderliegen, dass unterschiedliche Busse erforderlich sind.

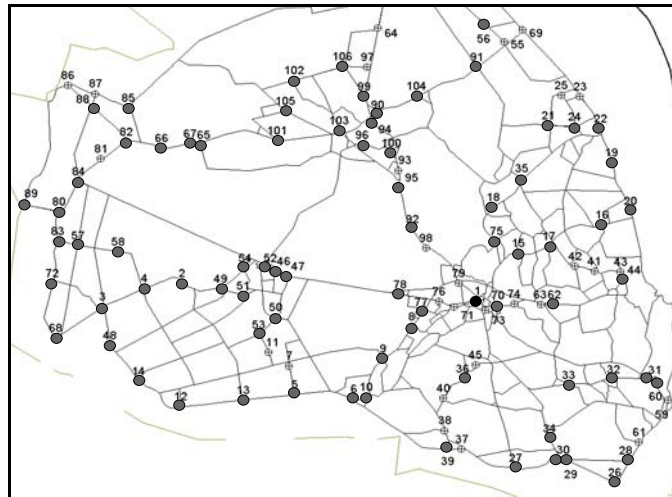


Abb. 6-13: Zu bedienende Haltestellen im Schülerverkehr

Haltestelle	einsteigende Schüler	Haltestelle	einsteigende Schüler	Haltestelle	einsteigende Schüler
2	4	29	10	62	7
3	8	30	7	65	7
4	5	31	4	66	8
5	4	32	9	67	4
6	3	33	5	68	5
8	4	34	1	70	2
9	3	35	5	72	1
10	17	36	4	75	3
12	4	39	1	77	23
13	2	44	1	78	14
14	3	46	9	80	3
15	8	47	8	82	4
16	11	48	2	83	3
17	14	49	4	84	1
18	3	50	1	85	3
19	5	51	3	88	9
20	5	52	14	89	2
21	3	53	4	90	3
22	6	54	23	91	1
24	9	56	2	92	1
26	1	57	4	106	1
27	7	58	2		
28	2	60	1		

Tab. 6-7: Verkehrsnachfrage an den Haltestellen

Ermittelt werden

- die Anzahl der benötigten Busse und ihr Routenverlauf (Abb. 6-14, Tab. 6-7),
- die gefahrenen km der Busse (Tab. 6-7),
- die realisierten Umwegfaktoren der Busse (Tab. 6-7).

Die Anfangslösung führte zu folgenden Routen:

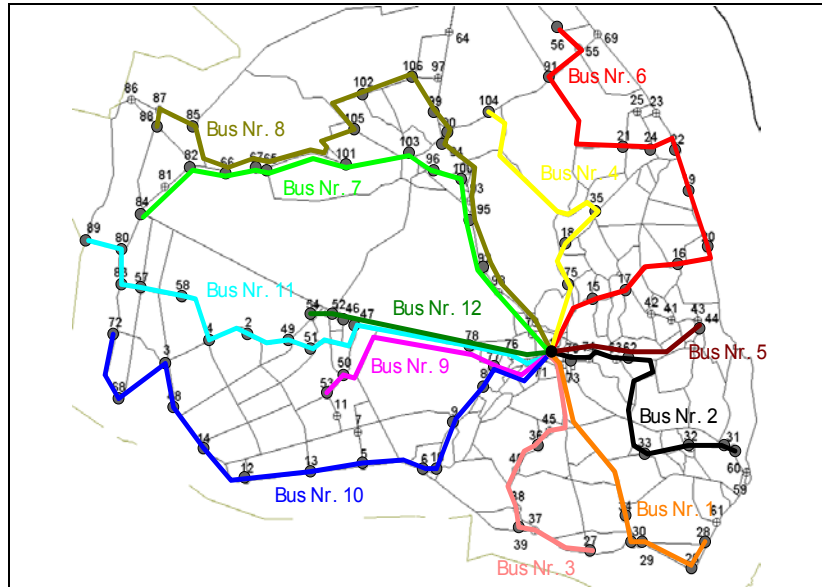


Abb. 6-14: Anfangslösung: Anzahl und Verlauf der Routen

Aus diesen Routen resultieren folgende, die Qualität der Lösung kennzeichnenden Werte:

Bus Nr.	Route	gefahrenem km	Anzahl der Fahrgäste	Umfwegfaktor
1	<u>28</u> <u>26</u> <u>30</u> <u>29</u> <u>34</u> 73 1	8.126	21	1,11
2	<u>60</u> <u>31</u> <u>32</u> <u>33</u> <u>62</u> 63 74 <u>70</u> 1	7.861	28	1,32
3	<u>27</u> <u>37</u> <u>39</u> 38 40 <u>36</u> 45 73 1	7.500	12	1,44
4	<u>104</u> <u>35</u> <u>18</u> <u>75</u> 1	9.063	12	1,00
5	<u>44</u> 62 63 74 70 1	4.540	1	1,00
6	<u>56</u> <u>55</u> <u>91</u> <u>21</u> <u>24</u> <u>22</u> <u>19</u> <u>20</u> <u>16</u> <u>17</u> <u>15</u> 1	14.961	64	1,46
7	<u>84</u> 81 <u>82</u> <u>66</u> 67 65 <u>101</u> <u>103</u> <u>96</u> <u>100</u> 93 95 92 98 79 1	14.889	53	1,22
8	<u>88</u> 87 <u>85</u> <u>66</u> <u>67</u> <u>65</u> <u>105</u> <u>102</u> <u>106</u> <u>99</u> <u>90</u> <u>94</u> <u>93</u> <u>95</u> <u>92</u> 98 79 1	19.163	42	1,35
9	<u>53</u> <u>50</u> <u>78</u> <u>77</u> 71 1	7.662	42	1,09
10	<u>72</u> <u>68</u> <u>3</u> <u>48</u> <u>14</u> <u>12</u> <u>13</u> <u>5</u> <u>6</u> <u>10</u> <u>9</u> <u>8</u> 77 71 1	17.169	56	1,34
11	<u>89</u> <u>80</u> <u>83</u> <u>57</u> <u>58</u> <u>4</u> <u>2</u> <u>49</u> <u>51</u> <u>47</u> 78 76 71 1	15.906	38	1,04
12	<u>54</u> <u>52</u> <u>46</u> 47 78 76 71 1	6.802	46	1,00
i.M.		11,137	35	1,20

Tab. 6-8: Anfangslösung: Routenverlauf und Kennwerte (unterstrichen sind die bedienten Haltestellen)

Diese Lösung ist zwar hervorragend für die Schüler, denn sie verursacht nur geringe Umwege. Der mittlere Umwegfaktor 1,20 für die Busse beschreibt eine mit Abstand überdurchschnittliche Qualität. Der mittlere Besetzungsgrad ist jedoch mit rd. 53 % aus wirtschaftlichen Gründen zu niedrig. Deswegen erscheint es sinnvoll, durch eine Vergrößerung des zulässigen Umwegfaktors nach einer Lösung zu suchen, bei der eine reduzierte Anzahl der benötigten Fahrzeuge zu einer besseren Auslastung führt.

Die verbesserte Lösung führt zu folgenden Routen:

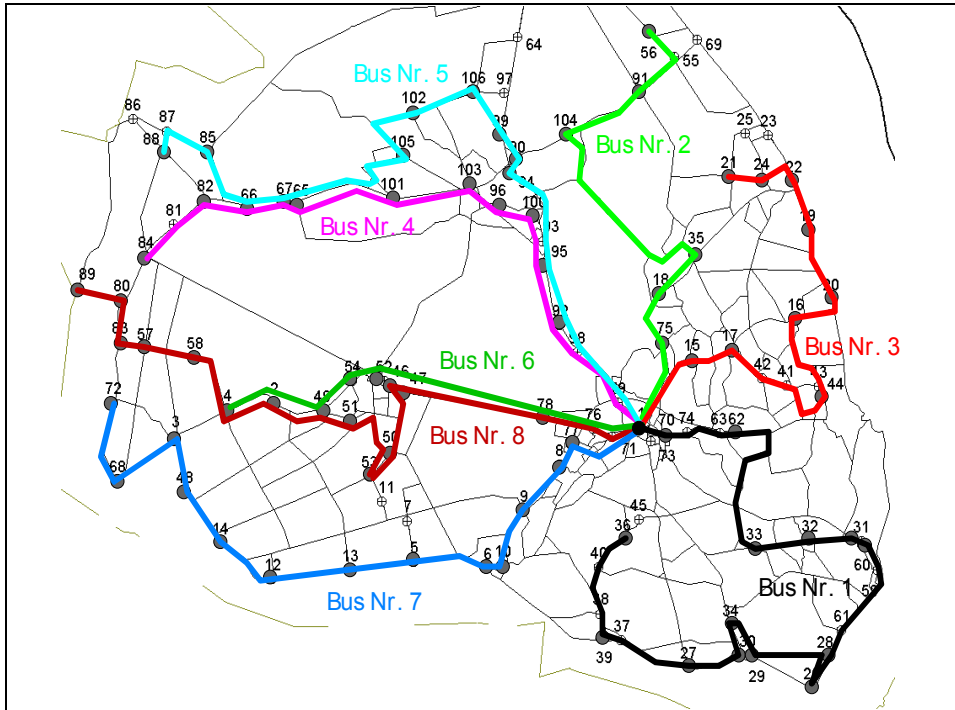


Abb. 6-13: Verbesserte Lösung: Anzahl und Verlauf der Routen

Aus diesen Routen resultieren folgende, die Qualität der Lösung kennzeichnenden Werte:

Bus Nr.	Route	gefahrne km	Anzahl der Fahrgäste	Umwegfaktor
1	<u>36</u> 40 38 39 37 27 29 34 30 28 26 28 61 59 60 <u>31</u> 60 31 <u>32</u> 33 62 63 74 <u>70</u> 1	21.464	61	7,02
2	<u>56</u> 55 <u>91</u> <u>104</u> <u>35</u> <u>18</u> <u>75</u> 1	12.812	15	1,25
3	<u>21</u> <u>24</u> <u>22</u> <u>19</u> <u>20</u> <u>16</u> 43 <u>44</u> 43 41 42 <u>17</u> <u>15</u> 1	12.925	62	2,00
4	84 81 82 66 67 65 101 103 96 100 93 95 92 98 79 1	14.889	53	1,22
5	<u>88</u> 87 <u>85</u> <u>66</u> <u>67</u> <u>65</u> 105 <u>102</u> <u>106</u> <u>99</u> <u>90</u> <u>94</u> <u>93</u> <u>95</u> <u>92</u> 98 79 1	19.163	42	1,35
6	<u>4</u> 2 49 <u>54</u> <u>52</u> 46 47 78 <u>77</u> 71 1	10.567	65	1,08
7	<u>72</u> <u>68</u> <u>3</u> <u>48</u> <u>14</u> <u>12</u> <u>13</u> <u>6</u> <u>10</u> <u>9</u> 8 77 71 1	17.169	56	1,34
8	<u>89</u> <u>80</u> <u>83</u> <u>57</u> <u>58</u> 4 2 49 51 <u>50</u> <u>53</u> 50 47 46 47 <u>78</u> 76 71 1	18.549	61	1,30
i.M.		15,942	52	2,07

Tab. 6-11: Verbesserte Lösung: Routenverlauf und Kennwerte (unterstrichen sind die bedienten Haltestellen)

Die verbesserte Lösung ist unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten besser, denn der Besetzungsgrad steigt um rd. 80%, und es werden vier Fahrzeuge gespart. Der relativ hohe mittlere Umwegfaktor wird von dem Bus 1 verursacht, der mit einem Umwegfaktor von 7,02 fährt. Ein so grosser Umwegfaktor kann für eine einzelne Reise akzeptiert werden, wenn dadurch das Gesamtergebnis wesentlich verbessert werden kann.

**Literaturverzeichnis**

- ABU-LEBDAH G., AND BENEKOHAL R.F. (1999). Computational issues in micro-genetic algorithms for traffic management. Preprints of the 78<sup>th</sup> Annual Meeting of the Transportation Research Board (CD-ROM), Washington, D.C., USA, 10.-14. Januar 1999
- AHUJA R., ET AL. (1993). Network flows. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA
- ALRAFAEI M.H., AND ANDRADOTTIR S. (1999). A simulated annealing algorithm with constant temperature for discrete stochastic optimisation. *Management Science* **5**: 748-764
- BADEAU P., ET AL. (1997). A parallel Tabu Search heuristic for the vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research C* **5(2)**: 109-122
- BAKER J.E. (1987). Reducing bias and inefficiency in the selection algorithm. In: GREFENSTETTE J.J. (Hrsg.). Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Genetic Algorithms and their Application, Lawrence Erlbaum Associates, Inc, 14-21
- BAPTISTA S., ET AL. (2002). Discrete Optimization – A period vehicle routing case study. *European Journal of Operational Research* **139**: 220-229
- BLICKLE T. (1997). Theory of evolutionary algorithms and application to system synthesis. TIK-Schriftenreihe, 17, vdf Verlag, Zurich, Schweiz
- BODIN L., ET AL. (1983). Routing and Scheduling of Vehicles and Crews – The State of the Art. *Computer & Operational Research* **10**: 63-211
- BOSSEL H. (1994). Modellbildung und Simulation – Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme. Verlag Viewig, Braunschweig
- BOWERS M., ET AL. (1996). A parallel implementation of the TSSP+1 Decomposition for the Capacity-Constrained Vehicle Routing Problem. *Computers Operation Research* **23-7**: 723-732
- BRÄNDLI H., ET AL. (1969). Optimale Haltestellenabstände beim öffentlichen Verkehr. Vereinigung Schweizerischer Verkehrsingenieure, 1. Zwischenbericht
- CAMPOS V., AND MOTA E. (2000). Heuristics Procedures for the Capacitated Vehicle Routing Problem. *Computational Optimization and Applications* **16**: 265-277
- CASEAU Y., AND LABURTHE F. (1999). Heuristics for Large Costrained Vehicle Routing Problems. *Journal of Heuristics* **5**: 281-303

- CLARKE G., AND WRIGHT J. (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operation Research* **12**: 568-581
- CHRISTOFIDES N.A., ET AL. (1981). State Space Relaxation Procedures for the Computation of Bounds to Routing Problems. *Networks* **11**: 145-164
- DE BACKER B., ET AL. (2000). Solving Vehicle Routing Problems Using Constraint Programming und Metaheuristics. *Journal of Heuristics* **6**: 501-523
- DESROCHERS M., ET AL. (1992). A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *Operations Research* **40**: 342-354
- DIJKSTRA E.W. (1959). A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. *Numer. Math.* **1**: 269-271
- DOMSCHKE W. (1997). *Logistik: Rundreisen und Touren*. Oldenbourg Verlag, München Wien
- FIEDLER J. (1996). Anruf-Sammeltaxen – Die sinnvolle Ergänzung zum ÖPNV. In: VERKEHRSClub DEUTSCHLAND (HRSG.). *AST - Die intelligente Ergänzung zum ÖPNV, Beispiele verschiedener AST-Systeme*. VCD NRW-Schriften, Düsseldorf
- FISHER M.L., AND JAIKUMAR R. (1981). A Generalized Assignment Heuristic for Vehicle Routing. *Networks* **11**:109-124
- FISHER M.L. (1994). Optimal Solution of Vehicle Routing Problems Using Minimum K-Trees. *Operations Research* **42**: 626-642
- FISHER, M.L., ET AL. (1997). Vehicle Routing with Time Windows: Two Optimization Algorithms. *Operations Research* **45**: 488-492
- FLOYD R.W. (1962). Algorithm 97: Shortest Path. *Communications of the Association of Computing Machinery* **5**: s. 345
- FOSTER B., AND RYAN D. (1976). An Integer Programming Approach to the Vehicle Scheduling Problem. *Operational Research Quarterly* **27**: 307-384
- FOURER R. (1998). A survey of recent trends in mathematical programming systems. *OR/MS Today* **12**: 40-43
- FRIEDRICH M. (1994). *Rechnergestütztes Entwurfsverfahren für den ÖPNV im ländlichen Raum*. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrs- und Stadtplanung, **5**, Technische Universität München, München



- FRIZZELL P.W. AND GIFFIN J.W. (1995). The Split Delivery Vehicle Scheduling Problem with Time Windows and Grid Network Distances. *Computer Ops. Res.* **22-6**: 665-667
- GARCIA A., REAUME D., AND SMITH R.L. (2000). Fictitious play for finding system optimal routings in dynamic traffic networks. *Transportation Research B* **34**: 147-156
- GENDREAU M., ET AL. (1999). A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Computers & Operation Research* **26**: 1153-1173
- GILLETT B., AND MILLER L. (1974). A Heuristic Algorithm for the Vehicle Dispatch Problem. *Operation Research* **22**: 340-349
- GOLDEN B. (1977). Evaluating a Sequential Routing Algorithm. *AIIE Transactions* **9**: 204-208
- HACHICHA M., ET AL. (2000). Heuristics for the multi-vehicle covering tour problem. *Computers & Operation Research* **27**: 29-42
- HALLER M. (1999). Wirkungsanalyse von Verbesserungen des ÖPNV-Angebots im ländlichen Raum durch bedarfsgesteuerte Bussysteme am Beispiel des Landkreises Erding. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrs- und Stadtplanung, **8**, Technische Universität München, München
- HALSE K. (1992). Modeling and Solving Complex Vehicle Routing Problems. Ph.D. Dissertation. IMSOR, The Technical University of Denmark, Lyngby, Dänemark
- HONG S.-C., AND PARK Y.-B. (1999). A heuristic for bi-objective vehicle routing with time window constraints. *International Journal of Production Economics* **62**: 249-258
- JÜNGER M., REINELT G., RINALDI G. (1994). The Traveling Salesman Problem. Interdisziplinäres Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen, Universität Heidelberg, Heidelberg
- JÜNGER M., REINELT G., THIENEL S. (1994). Provably good solutions for the traveling salesman problem. Report No. **92.114**, Angewandte Mathematik und Informatik, Universität zu Köln, Köln
- KIESLICH W. (2000). Betriebsleitsystem im ÖPNV des ländlichen Raumes. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrs- und Stadtplanung, **10**, Technische Universität München, München
- KIPKE H. (1993). Systematisierung von Zielen und Maßnahmen der städtischen Verkehrsplanung. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrs- und Stadtplanung, **3**, Technische Universität München, München
- KIRCHHOFF P. (2002). Städtische Verkehrsplanung - Konzepte, Verfahren, Maßnahmen. Teubner Verlag, Stuttgart

- KIRCHHOFF P. (1987). Verbesserungen des ÖPNV im ländlichen Raum durch technische und planerische Maßnahmen. *Der Nahverkehr*, **6**
- KIRKPATRICK S., ET AL. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science* **220**: 671-680
- KOLEN A. W. J., ET AL. (1987). Vehicle Routing with Time Windows. *Operations Research* **35**: 266-273
- KÖNIG B. (1995). Heuristiken zur Ein-Depot-Tourenplanung. Institut für Informatik, Technische Universität München, München
- LARSON R.C., AND ODONI A.R. (1999). *Urban Operation Research*. Massachusetts Institute of Technology, Boston, Massachusetts, USA
- LIU F. F., AND SHEN S.Y. (1999). An overview of a heuristic for Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Computers & Industrial Engineering* **37**: 331-334
- LUKKA A. (1987). On Method and System Design for a Problem in Vehicle Routing and Scheduling. Dissertation, Lappeenranta University of Technology, Finland
- MADSEN O.B.G. (1990). Lagrangean Relaxation and Vehicle Routing. Working Paper. IMSOR, The Technical University of Denmark, Lyngby, Dänemark
- MEHLERT C. (1998). Angebotsbezeichnungen bei alternativen Bedienungsformen. *Der Nahverkehr* **6**: 56-58
- MEIBNER J.-D. (1987). Anwendung heuristischer Methoden im Verkehr. In: FORSCHUNGSGESellschaft FÜR STRaßEN- UND VERKEHRswESEN (Hrsg.). Tagungsbericht der HEUREKA, Optimierung in Verkehr und Transport, 53-73, FGSV Verlag, Köln
- METROPOLIS N., ET AL. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics* **21 (6)**: 1087-1092
- MINIEKA E. (1978). *Optimization Algorithms for Networks and Graphs*. Marcel Dekker, Inc., New York and Basel
- MÜLLER-MERBACH H. (1973). *Operation Research*, 3. Auflage, Franz Vahlen Verlag, München
- PAESSENS H. (1981). Tourenplanung bei der regionalen Hausmüllentsorgung. Dissertation, Uni Karlsruhe, Karlsruhe

- PAPAGEORGIU M. (1996). Optimierung – Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung. 2. Auflage, Oldenbourg Verlag GmbH, München
- PAPAGEORGIU M. (HRSG.) (1991). Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems. Pergamon Press, Oxford, Großbritannien
- POHLHEIM H. (1999). Evolutionäre Algorithmen. Springer Verlag, Berlin
- REINELT G. (1994). The Traveling Salesman – Computational Solutions for TSP Applications. Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- RENAUD J., BOCTOR F., LAPORTE G. (1996). An improved Petal heuristic for the Vehicle Routing Problem. *Journal of Operation Research Society* **17**: 329-336
- ROUSSEAU L.-M., GENDREAU M., PESANT G. (2002). Using Constraint-Based Operators to Solve the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Journal of Heuristics* **8**: 43-58
- SARIDIS G.N. (1991). Intelligent traffic control systems. In: PAPAGEORGIU M. (Hrsg.). Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems, Pergamon Press, Oxford, Großbritannien
- SCHUSTER B. (1992). Flexible Betriebsweisen des ÖPNV im ländlichen Raum. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrs- und Stadtplanung, **2**, Technische Universität München, München
- STEUER R.E. (1986). Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application. John Wiley & Sons, Singapore and Toronto
- UNDERBERG R. (2004). Bereitstellung und Nutzung von Messwerten des Verkehrsablaufs im ÖPNV im ländlichen Raum, Dissertation am Lehrstuhl für Verkehrstechnik, Technische Universität München, München
- VARGA J. (1991). Angewandte Optimierung. Wissenschaftsverlag, Mannheim Wien Zürich
- WEST D.B. (2001). Introduction to Graph Theory – 2<sup>nd</sup> Edition. Prentice Hall, New Jersey, USA
- WILHELM S. (2002). Planungsinstrumente für flexible Betriebsweisen im ÖPNV des ländlichen Raumes. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrs- und Stadtplanung, **13**, Technische Universität München, München
- ZIMMERMANN H.-J. (1992). Methoden und Modelle des Operations Research für Ingenieure, Ökonomen und Informatiker. 2. überarbeitete Auflage, Verlag Vieweg, Wiesbaden

In der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrstechnik der Technischen Universität München sind bisher erschienen:

Heft 1	2003	Steinhoff	Online Bewertung der Akzeptanz und der Wirksamkeit präventiver Maßnahmen durch Streckenbeeinflussungsanlagen auf Autobahnen
Heft 2	2003	Hoops	Methodik zur Qualitätssicherung von aggregierten Daten eines Messsystems im Betrieb von verkehrstechnischen Anlagen
Heft 3	2003	Zhang	Vergleich der Verkehrsentwicklung in deutschen Großstädten und in Shanghai sowie Herleitung von Handlungserfordernissen
Heft 4	2004	Nocera	Steuerung des Sektorbetriebs bei nachfrageabhängiger ÖPNV-Bedienung