Seminarausarbeitung

im Rahmen des Seminars
„Optimierung industrieller
Anwendungsprobleme“

im
Projekt
Fahrplanoptimierung

Thema

„Time scheduling of transit systems with transfer considerations using Genetic Algorithms“

Autor:
Martin Tobisch

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation für den Artikel Seite 3

2. Bestandteile des Artikels Seite 3
3. Formulierung eines Transportsystem - Zeitplanungsproblems Seite 4
3.1 Beispiel a Seite 4
3.2 Vorbemerkungen zum Transportsystem - Zeitplanungsproblem Seite 4
3.3 Beispiel b Seite 5
3.3.1 Voraussetzungen Seite 5
3.3.2 Fahrpläne und Abfahrtsmöglichkeiten Seite 6
3.3.3 Wartezeiten Seite 10
3.4 Vorstellung der Notation für die MP - Formulierung Seite 11
3.5 Die MP - Formulierung Seite 11
3.5.1 Voraussetzungen Seite 11
3.5.2 Die Formulierung des Mathematischen Programms (MP) Seite 12
3.5.2.1 Die Zielfunktion Seite 13
3.5.2.2 Die Constraints Seite 14
4. Warum werden Genetische Algorithmen zur Lösungsfindung benutzt ? Seite 15
4.1 Was erschwert die Lösung des Optimierungsproblems? Seite 15
4.2 Warum eignen sich GA's besonders gut zur Lösung des Problems? Seite 16
5. Fallstudien - Anwendung von GA's auf Erweiterungen des Ausgangsproblems Seite 17
5.1 Fall 1 - ein Umsteigebahnhof- exakte Zeitplaneinhaltung - unbegrenzte Buskapazität Seite 17
5.1.1 Reduzierung der Anzahl der Variablen Seite 17
5.1.2 Bestandteile eines GA - Strings Seite 18
5.1.3 Die Bearbeitung der Constraints innerhalb des GA Seite 19
5.1.3.1 Reduzierung der Probleme durch die Constraints Seite 20
5.1.4 Die Parameter des GA Seite 20
5.1.4.1 Allgemeine Parameter Seite 20
5.1.4.2 Stringlänge eines vollständigen Planungszyklus Seite 21
5.1.4.3 GA - Parameter Seite 21
5.1.4.4 Ergebnisse Seite 21
5.2 Überblick über weitere Fallstudien Seite 23
5.3 Anpassung des GA's an die weiteren Fallstudien Seite 24
5.3.1 Fall 2 - Ein Umsteigebahnhof - exakte Zeitplaneinhaltung - beschränkte Buskapazität Seite 24
5.3.2 Fall 3 - Ein Umsteigebahnhof - zufällige Zeitplaneinhaltung - unbeschränkte Buskapazität Seite 25
5.3.3 Fall 4 - Mehrere Umsteigebahnhöfe - exakte Zeitplaneinhaltung - unbeschränkte Buskapazität Seite 27
6. Anmerkungen Seite 28

1. Motivation für den Artikel

Um ein höheres Niveau an Passagierservice gewährleisten zu können, müssen öffentliche Transportsysteme effizient sein. Ein Hauptfaktor, der die Effizienz von öffentlichen Transportsystemen erhöht, ist eine richtige Planung seiner Transportmittel.

"As long as the available transportation infrastructur is not used in the most effective way, investments in its better utilization and in the reduction of congestions are more profitable than the construction of new facilities. ..... In general, we must improve the cost-benefit ratio, i.e., we must handle necessary transportation with less energy, less time, less costs, and with fewer negative effects on health and on the environment."

J. Rüttgers, German Minister for Science, Education, Research, Technology [1997]

Neben ein paar anderen Faktoren sollte eine gute Planung natürlich sowohl die Wartezeit von Passagieren im Allgemeinen als auch die Umsteigezeit von Passagieren von einer Linie zur anderen minimieren. Eine optimale Planung koordiniert somit die Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Busse so, daß die gesamte Wartezeit der Passagiere minimiert wird.

Öffentliche Transportnetzwerke sind meistens sehr komplex. Sie bestehen zumeist aus großen Netzwerken mit Unmengen von Knotenpunkten (Haltestellen) und Linien. Daher sind sie mittels klassischer Methoden meistens nicht oder nur sehr schlecht optimierbar.
Deswegen werden Methoden gesucht, die es ermöglichen die Transportsysteme möglichst einfach und mit geringem Aufwand optimieren zu können. Wenn sich die Methoden mit nur kleinen Änderungen auf mehr als ein Optimierungsproblem, bzw. auf ähnliche Optimierungsprobleme anwenden ließen wäre das natürlich von Vorteil.
GA's könnten möglicherweise eine der gesuchten Methoden sein. In dem Artikel wird untersucht ob GA's die oben gestellten Forderungen erfüllen können. Darüber hinaus werden die Ergebnisse mittels Fallstudien verifiziert.

2. Bestandteile des Artikels

Zuerst wird ein Transportsystem - Zeitplanungsproblem mit dem Ziel der Minimierung der Gesamtwartezeit von umsteigenden und nicht umsteigenden Reisenden als Mathematisches Programm (MP) formuliert, wobei aber eine bestimmte Anzahl von Ressourcen- und Servicebezogenen Constraints eingehalten werden muß.
Dann wird eruiert warum Genetische Algorithmen zur Lösungsfindung benutzt werden.
Zum Schluß werden dann die vorher aufgestellten Behauptungen durch Fallstudien verifiziert und gezeigt, daß sich der GA mit kleineren Änderungen auch auf Erweiterungen des Ausgangsproblems anwenden läßt. Dabei wird auch auf die einzelnen Bestandteile des GA's bzw. der GA - Formulierung im Rahmen des Optimierungsproblems eingegangen.

3. Formulierung eines Transportsystem - Zeitplanungsproblems

3.1 Beispiel a

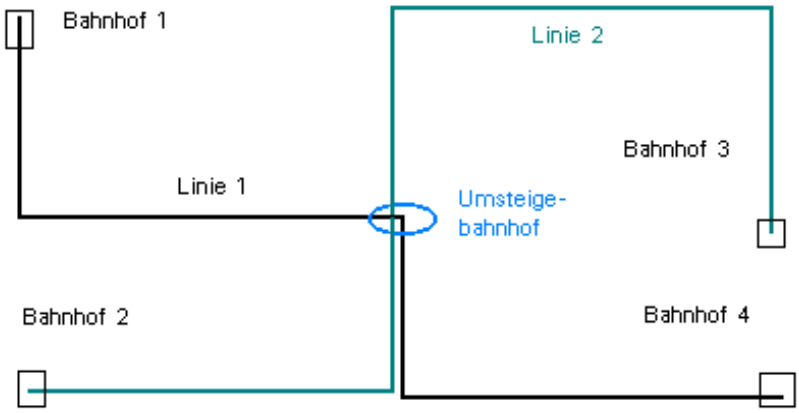

Abbildung 1 **-** zwei Linien, ein Umsteigebahnhof

3.2 Vorbemerkungen zum Transportsystem - Zeitplanungsproblem

Ein typisches Transportsystem besteht aus Bussen, die diverse Linien befahren, welche sich an bestimmten Umsteigebahnhöfen kreuzen. Der Zweck eines Transportsystems ist es Passagiere von ihrem Startbahnhof zu ihrem Zielbahnhof zu bringen. Jedoch existieren keine direkten Linien zwischen allen möglichen Kombinationen von Start- und Zielhaltestellen. Passagiere, bei denen keine Linie von ihrer Start- zu ihrer Zielhaltestelle durchfährt, müssen daher mehr als eine Linie benutzen, um zu ihrem Ziel zu gelangen. Diese Passagiere kommen im allgemeinen mit einer Linie zu einem Umsteigebahnhof und warten dann darauf in eine andere Linie umsteigen zu können, die sie schließlich zu ihrem Ziel bringt. Somit gibt es an jeder Umsteigehaltestelle zwei Arten von Passagieren: Umsteigende Passagiere und nicht umsteigende Passagiere (deren Starthaltestelle die momentane Umsteigehaltestelle ist).
Betrachten wir ein kleines Beispiel für ein Transportsystem (Abbildung 1).
Am Umsteigebahnhof kreuzen sich 2 Linien.
Daher gibt es hier zwei Arten von Passagieren:

1. Umsteigende Passagiere. Das wären z.B. die Passagiere, welche vom Bahnhof 1 zum Bahnhof 3 fahren wollen. Diese kommen dann mit Linie 1 am Umsteigebahnhof an und steigen auf den Bus der Linie 2 um.
2. Nicht umsteigende Passagiere. Das wären z.B. die Passagiere, die vom Umsteigebahnhof zum Bahnhof 4 wollen.

Weil es zwei Arten von Passagieren gibt, gibt es auch zwei Arten von Wartezeiten:

1. Anfängliche Wartezeit ("IWT", die Wartezeit von nicht umsteigenden Passagieren)
2. Umsteigezeit ("TT", die Wartezeit von umsteigenden Passagieren)

Beide Wartezeiten hängen von der Ankunft- und Abfahrtszeit der Busse aller Linien ab.

3.3 Beispiel b

Um noch einmal besser an das Thema heranzuführen, wird hier ein kleines Beispiel genauer betrachtet.

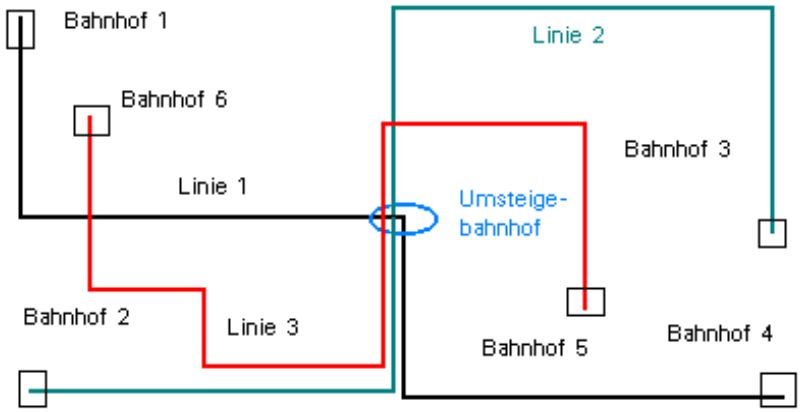

Abbildung 2 - drei Linien, ein Umsteigebahnhof

3.3.1 Voraussetzungen

Bis auf die Tatsache, daß statt 10 Bussen pro Linie nur 4 Busse pro Linien fahren, werden die gleichen Werte benutzt, die auch später im **Kapitel 5.1** verwendet werden, d.h. 3 Linien, ein Umsteigebahnhof, 10 Busse pro Linie und als Zeitfenster, in dem die Busse fahren wird 7 bis 11 Uhr angenommen.

Dazu müssen noch ein paar wichtige "Grenzwerte" angegeben werden. Die ersten Busse einer Linie bilden eine Ausnahme, da vor ihnen kein Bus fährt und die folgenden Werte für diese Busse daher nur im Hinblick auf der ihnen folgenden Bus betrachtet werden können. Die folgenden Werte sind überdies zufällig gewählt, sie dienen ja nur zur Veranschaulichung.

Als minimaler Abstand zweier Busse wird 10 Minuten gewählt. Der maximale Abstand zweier Busse wird mit 30 Minuten gewählt. Darüber hinaus soll die minimale Haltezeit eines Busses an einer Haltestelle 4 Minuten, die maximale 8 Minuten betragen. Die maximale Umsteigezeit darf dabei 30 Minuten nicht überschreiten.

Darüber hinaus gelten noch folgende Fahrzeiten:

- Linie 1: Bahnhof 1 bis zum Umsteigebahnhof = 10 Minuten, Umsteigebahnhof bis zum Bahnhof 4 = 12 Minuten.
- Linie 2: Bahnhof 2 bis zum Umsteigebahnhof = 12 Minuten, Umsteigebahnhof bis zum Bahnhof 3 = 14 Minuten
- Linie 3: Bahnhof 6 bis zum Umsteigebahnhof = 8 Minuten, Umsteigebahnhof bis zum Bahnhof 5 = 6 Minuten

3.3.2 Fahrpläne und Abfahrtsmöglichkeiten

Nun zur Veranschaulichung:
(Die Fahrten der Linien werden geplant, angefangen bei Linie 1)

Linie 1:	Bus 1:	Bahnhof 1	Abfahrt 7.02 Uhr	Abfahrt 8.18 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.12 Uhr	Ankunft 8.28 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 7.20 Uhr	Abfahrt 8.36 Uhr
		Bahnhof 4	Ankunft 7.32 Uhr	Ankunft 8.48 Uhr
Linie 2:	Bus 1:	Bahnhof 2	Abfahrt 7.02 Uhr	Abfahrt 8.26 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.14 Uhr	Ankunft 8.38 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 7.22 Uhr	Abfahrt 8.46 Uhr
		Bahnhof 3	Ankunft 7.36 Uhr	Ankunft 9.00 Uhr
Linie 3:	Bus 1:	Bahnhof 6	Abfahrt 7.05 Uhr	Abfahrt 8.33 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.13 Uhr	Ankunft 8.41 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 7.17 Uhr	Abfahrt 8.45 Uhr
		Bahnhof 5	Ankunft 7.23 Uhr	Ankunft 8.51 Uhr
Linie 1:	Bus 2:	Bahnhof 4	Abfahrt 7.01 Uhr	Abfahrt 8.17 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.13 Uhr	Ankunft 8.29 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 7.21 Uhr	Abfahrt 8.37 Uhr
		Bahnhof 1	Ankunft 7.31 Uhr	Ankunft 8.47 Uhr
Linie 2:	Bus 2:	Bahnhof 3	Abfahrt 7.00 Uhr	Abfahrt 8.24 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.14 Uhr	Ankunft 8.38 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 7.22 Uhr	Abfahrt 8.46 Uhr
		Bahnhof 2	Ankunft 7.34 Uhr	Ankunft 8.58 Uhr
Linie 3:	Bus 2:	Bahnhof 5	Abfahrt 7.06 Uhr	Abfahrt 8.34 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.12 Uhr	Ankunft 8.40 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 7.16 Uhr	Abfahrt 8.44 Uhr
		Bahnhof 6	Ankunft 7.24 Uhr	Ankunft 8.52 Uhr
Linie 1:	Bus 1*:	Bahnhof 4	Abfahrt 7.40 Uhr	Abfahrt 8.56 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.52 Uhr	Ankunft 9.08 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 8.00 Uhr	Abfahrt 9.16 Uhr
		Bahnhof 1	Ankunft 8.10 Uhr	Ankunft 9.26 Uhr
Linie 2:	Bus 1*:	Bahnhof 3	Abfahrt 7.44 Uhr	Abfahrt 9.08 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.58 Uhr	Ankunft 9.22 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 8.06 Uhr	Abfahrt 9.30 Uhr
		Bahnhof 2	Ankunft 8.18 Uhr	Ankunft 9.42 Uhr

Linie 3:	Bus 1*:	Bahnhof 5	Abfahrt 7.27 Uhr	Abfahrt 8.55 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.33 Uhr	Ankunft 9.01 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 7.37 Uhr	Abfahrt 9.05 Uhr
		Bahnhof 6	Ankunft 7.45 Uhr	Ankunft 9.13 Uhr
Linie 1:	Bus 2*:	Bahnhof 1	Abfahrt 7.39 Uhr	Abfahrt 8.55 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.49 Uhr	Ankunft 9.05 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 7.57 Uhr	Abfahrt 9.13 Uhr
		Bahnhof 4	Ankunft 8.09 Uhr	Ankunft 9.25 Uhr
Linie 2:	Bus 2*:	Bahnhof 2	Abfahrt 7.42 Uhr	Abfahrt 9.06 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.54 Uhr	Ankunft 9.18 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 8.02 Uhr	Abfahrt 9.26 Uhr
		Bahnhof 3	Ankunft 8.16 Uhr	Ankunft 9.40 Uhr
Linie 3:	Bus 2*:	Bahnhof 6	Abfahrt 7.28 Uhr	Abfahrt 8.56 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.36 Uhr	Ankunft 9.04 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 7.40 Uhr	Abfahrt 9.08 Uhr
		Bahnhof 5	Ankunft 7.46 Uhr	Ankunft 9.14 Uhr
Linie 1:	Bus 3:	Bahnhof 1	Abfahrt 7.20 Uhr	Abfahrt 8.36 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.30 Uhr	Ankunft 8.46 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 7.38 Uhr	Abfahrt 8.54 Uhr
		Bahnhof 4	Ankunft 7.50 Uhr	Ankunft 9.06 Uhr
Linie 2:	Bus 3:	Bahnhof 2	Abfahrt 7.22 Uhr	Abfahrt 8.46 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.34 Uhr	Ankunft 8.58 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 7.42 Uhr	Abfahrt 9.06 Uhr
		Bahnhof 3	Ankunft 7.56 Uhr	Ankunft 9.20 Uhr
Linie 3:	Bus 1**:	Bahnhof 6	Abfahrt 7.49 Uhr	Abfahrt 9.17 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.57 Uhr	Ankunft 9.25 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 8.01 Uhr	Abfahrt 9.29 Uhr
		Bahnhof 5	Ankunft 8.07 Uhr	Ankunft 9.35 Uhr
Linie 1:	Bus 4:	Bahnhof 4	Abfahrt 7.20 Uhr	Abfahrt 8.36 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.32 Uhr	Ankunft 8.48 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 7.40 Uhr	Abfahrt 8.56 Uhr
		Bahnhof 1	Ankunft 7.50 Uhr	Ankunft 9.06 Uhr
Linie 2:	Bus 4:	Bahnhof 3	Abfahrt 7.22 Uhr	Abfahrt 8.46 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.36 Uhr	Ankunft 9.00 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 7.44 Uhr	Abfahrt 9.08 Uhr
		Bahnhof 2	Ankunft 7.56 Uhr	Ankunft 9.20 Uhr

Linie 1:	Bus 3*:	Bahnhof 4	Abfahrt 7.58 Uhr	Abfahrt 9.14 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 8.10 Uhr	Ankunft 9.26 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 8.18 Uhr	Abfahrt 9.34 Uhr
		Bahnhof 1	Ankunft 8.28 Uhr	Ankunft 9.44 Uhr
Linie 2:	Bus 3*:	Bahnhof 3	Abfahrt 8.04 Uhr	Abfahrt 9.28 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 8.18 Uhr	Ankunft 9.42 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 8.26 Uhr	Abfahrt 9.50 Uhr
		Bahnhof 2	Ankunft 8.38 Uhr	Ankunft 10.02 Uhr
Linie 3:	Bus 2**:	Bahnhof 5	Abfahrt 7.50 Uhr	Abfahrt 9.18 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 7.56 Uhr	Ankunft 9.24 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 8.00 Uhr	Abfahrt 9.28 Uhr
		Bahnhof 6	Ankunft 8.08 Uhr	Ankunft 9.36 Uhr
Linie 1:	Bus 4*:	Bahnhof 1	Abfahrt 7.58 Uhr	Abfahrt 9.14 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 8.08 Uhr	Ankunft 9.24 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 8.16 Uhr	Abfahrt 9.32 Uhr
		Bahnhof 4	Ankunft 8.28 Uhr	Ankunft 9.44 Uhr
Linie 2:	Bus 4*:	Bahnhof 2	Abfahrt 8.04 Uhr	Abfahrt 9.28 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 8.16 Uhr	Ankunft 9.40 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 8.24 Uhr	Abfahrt 9.48 Uhr
		Bahnhof 3	Ankunft 8.38 Uhr	Ankunft 10.02 Uhr
Linie 3:	Bus 1***:	Bahnhof 5	Abfahrt 8.11 Uhr	Abfahrt 9.39 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 8.17 Uhr	Ankunft 9.45 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 8.21 Uhr	Abfahrt 9.49 Uhr
		Bahnhof 6	Ankunft 8.29 Uhr	Ankunft 9.57 Uhr
Linie 3:	Bus 2***:	Bahnhof 6	Abfahrt 8.12 Uhr	Abfahrt 9.40 Uhr
		Umsteigebahnhof	Ankunft 8.20 Uhr	Ankunft 9.48 Uhr
		Umsteigebahnhof	Abfahrt 8.24 Uhr	Abfahrt 9.52 Uhr
		Bahnhof 5	Ankunft 8.30 Uhr	Ankunft 9.58 Uhr

Die weiteren Fahrten (bzw. Ankunfts- und Abfahrtszeiten) der einzelnen Busse innerhalb des Zeitfenster lassen sich einfach durch Addition des Zeitabstands zwischen der ersten und zweiten Fahrt eines Busses in der selben Richtung zur Zeit der zweiten Fahrt des Busses berechnen usw.

Die Abfahrtsmöglichkeiten an den einzelnen Bahnhöfen stellen sich dann wie folgt dar:
(Betrachtet werden nur die obig dargestellten Zeiten) (Umsteigezeit = 1 Minute)

Bahnhof 1 (zum Umsteigeb.)	Umsteigebahnhof (An- und Abfahrszeiten)	*max. Wartezeit*	Bahnhof 3 (zum Umsteigeb.)
7.02 Uhr	7.12 - 7.16 Uhr zum Bahnhof 4	*10 min*	7.00 Uhr
7.20 Uhr	7.12 - 7.16 Uhr zum Bahnhof 6	*10 min*	7.22 Uhr
7.39 Uhr	7.13 - 7.17 Uhr zum Bahnhof 5	*9 min*	7.44 Uhr
7.58 Uhr	7.13 - 7.21 Uhr zum Bahnhof 1	*9 min*	8.04 Uhr
8.18 Uhr	7.14 - 7.22 Uhr zum Bahnhof 3	*8 min*	8.24 Uhr
8.36 Uhr	7.14 - 7.22 Uhr zum Bahnhof 2	*8 min*	8.46 Uhr
8.55 Uhr	7.30 - 7.38 Uhr zum Bahnhof 4	14 *min*	9.08 Uhr
9.14 Uhr	7.32 - 7.40 Uhr zum Bahnhof 1	12 *min*	9.28 Uhr
.....	7.34 - 7.42 Uhr zum Bahnhof 3	10 *min*	.....
	7.36 - 7.40 Uhr zum Bahnhof 5	8 *min*	
	7.36 - 7.44 Uhr zum Bahnhof 2	8 *min*	
	7.33 - 7.37 Uhr zum Bahnhof 6	11 *min*	
	7.49 - 7.57 Uhr zum Bahnhof 4	17 *min*	
Bahnhof 6	7.52 - 8.00 Uhr zum Bahnhof 1	14 *min*	Bahnhof 5
(zum Umsteigeb.)	7.54 - 8.02 Uhr zum Bahnhof 3	12 *min*	(zum Umsteigeb.)
	7.56 - 8.00 Uhr zum Bahnhof 6	10 *min*	
7.05 Uhr	7.57 - 8.01 Uhr zum Bahnhof 5	19 *min*	7.06 Uhr
7.28Uhr	7.58 - 8.06 Uhr zum Bahnhof 2	18 *min*	7.27 Uhr
7.49 Uhr	8.08 - 8.16 Uhr zum Bahnhof 4	16 *min*	7.50 Uhr
8.12 Uhr	8.10 - 8.18 Uhr zum Bahnhof 1	14 *min*	8.11 Uhr
8.33 Uhr	8.16 - 8.24 Uhr zum Bahnhof 3	20 *min*	8.34 Uhr
8.56 Uhr	8.17 - 8.21 Uhr zum Bahnhof 6	19 *min*	8.55 Uhr
9.17 Uhr	8.18 - 8.26 Uhr zum Bahnhof 2	19 *min*	9.18 Uhr
9.40 Uhr	8.20 - 8.24 Uhr zum Bahnhof 5	17 *min*	9.39 Uhr
.....	8.28 - 8.36 Uhr zum Bahnhof 4	18 *min*	.....
	8.29 - 8.37 Uhr zum Bahnhof 1	17 *min*	
	8.38 - 8.46 Uhr zum Bahnhof 3	18 *min*	
	8.38 - 8.46 Uhr zum Bahnhof 2	18 *min*	
	8.40 - 8.44 Uhr zum Bahnhof 6	16 *min*	
	8.41 - 8.45 Uhr zum Bahnhof 5	15 *min*	
Bahnhof 2	8.46 - 8.54 Uhr zum Bahnhof 4	22 *min*	Bahnhof 4
(zum Umsteigeb.)	8.48 - 8.56 Uhr zum Bahnhof 1	20 *min*	(zum Umsteigeb.)
	8.58 - 9.06 Uhr zum Bahnhof 3	18 *min*	
7.02 Uhr	9.00 - 9.08 Uhr zum Bahnhof 2	16 *min*	7.01 Uhr
7.22 Uhr	9.01 - 9.05 Uhr zum Bahnhof 6	15 *min*	7.20 Uhr
7.42 Uhr	9.04 - 9.08 Uhr zum Bahnhof 5	12 *min*	7.40 Uhr
8.04 Uhr	9.05 - 9.13 Uhr zum Bahnhof 4	23 *min*	7.58 Uhr
8.26 Uhr	9.08 - 9.16 Uhr zum Bahnhof 1	21 *min*	8.17 Uhr
8.46 Uhr	9.18 - 9.26 Uhr zum Bahnhof 3	16 *min*	8.36 Uhr
9.06 Uhr	9.22 - 9.30 Uhr zum Bahnhof 2	12 *min*	8.56 Uhr
9.28 Uhr	9.24 - 9.28 Uhr zum Bahnhof 6	10 *min*	9.14 Uhr
.....	9.25 - 9.29 Uhr zum Bahnhof 5	9 *min*	.....
	9.24 - 9.30 Uhr zum Bahnhof 4	.....	
	9.26 - 9.34 Uhr zum Bahnhof 1	.....	
	9.40 - 9.48 Uhr zum Bahnhof 3	.....	
	9.42 - 9.50 Uhr zum Bahnhof 2	.....	
	9.45 - 9.49 Uhr zum Bahnhof 6	.....	
	9.48 - 9.52 Uhr zum Bahnhof 5	.....	
	.....	.....	

3.3.3 Wartezeiten

Wenden wir uns nun noch den Wartezeiten zu. Die Wartezeit eines Passagiers zu jedem möglichen Zeitpunkt innerhalb des oben betrachteten Zeitfensters beträgt an den einzelnen Bahnhöfen im schlimmsten Fall:

- Bahnhof 1: **max. 18 - 20 Minuten (18+19+19+20+18+19+19 = 132 ⇒ ∅ 19)**
- Bahnhof 2: **max. 20 - 22 Minuten (20+20+22+22+20+20+22 = 146 ⇒ ∅ 21)**
- Bahnhof 3: **max. 20 - 22 Minuten (22+22+20+20+22+22+20 = 148 ⇒ ∅ 21)**
- Bahnhof 4: **max. 18 - 20 Minuten (19+20+18+19+19+20+18 = 133 ⇒ ∅ 19)**
- Bahnhof 5: **max. 21 - 23 Minuten (21+23+21+23+21+23+21 = 153 ⇒ ∅ 22)**
- Bahnhof 6: **max. 21 - 24 Minuten (23+20+24+21+23+21+23 = 155 ⇒ ∅ 22)**

Hierbei handelt es sich um die Anfängliche Wartezeit. Wollen die Passagiere nur von einem der Bahnhöfe 1 bis 6 zum Umsteigebahnhof, dann ist bei ihnen die Anfängliche Wartezeit auch gleichzeitig die Gesamte Wartezeit.
Wollen die Passagiere dagegen vom Umsteigebahnhof zu einem der Bahnhöfe 1 bis 6, so beträgt die Wartezeit im schlimmsten Fall:

- zum Bahnhof 1: **max. 18 - 20 Minuten (19+20+18+19+19+20+18 = 133 ⇒ ∅ 19)**
- zum Bahnhof 2: **max. 20 - 22 Minuten (22+22+20+20+22+22+20 = 148 ⇒ ∅ 21)**
- zum Bahnhof 3: **max. 20 - 22 Minuten (20+20+22+22+20+20+22 = 144 ⇒ ∅ 21)**
- zum Bahnhof 4: **max. 17 - 22 Minuten (22+19+19+20+18+19+17 = 134 ⇒ ∅ 19)**
- zum Bahnhof 5: **max. 21 - 23 Minuten (23+21+23+21+23+21+23 = 155 ⇒ ∅ 22)**
- zum Bahnhof 6: **max. 21 - 23 Minuten (21+23+21+23+21+23+21 = 153 ⇒ ∅ 22)**

Hierbei handelt es sich auch um die Anfängliche Wartezeit, die auch gleichzeitig wieder die Gesamte Wartezeit ist.
Wollen die Passagiere jedoch von einem der Bahnhöfe 1 bis 6 zu einem anderen der Bahnhöfe 1 bis 6, der nicht von der gleichen Linie angefahren wird, in die am Startbahnhof eingestiegen wurde, so muß zu der Wartezeit an den einzelnen Bahnhöfen (s.o.) noch die Umsteigezeit am Umsteigebahnhof hinzugezählt werden.

- Vom Bahnhof 1 zu einem der Bahnhöfe 2,3,5,6: **max. 10 - 23 Minuten**
  (10+14+17+16+18+22+23 = 120 ⇒ ∅ 17)
- Vom Bahnhof 2 zu einem der Bahnhöfe 1,4,5,6: **max. 8 - 20 Minuten**
  (8+10+12+20+18+18+16 = 102 ⇒ ∅ 15)
- Vom Bahnhof 3 zu einem der Bahnhöfe 1,4,5,6: **max. 8 - 19 Minuten**
  (8+8+18+19+18+16+12 = 99 ⇒ ∅ 14)
- Vom Bahnhof 4 zu einem der Bahnhöfe 2,3,5,6: **max. 9 - 21 Minuten**
  (9+12+14+14+17+20+21 = 107 ⇒ ∅ 15)
- Vom Bahnhof 5 zu einem der Bahnhöfe 1,2,3,4: **max. 10 - 19 Minuten**
  (10+11+10+19+16+15+10 = 91 ⇒ ∅ 13)
- Vom Bahnhof 6 zu einem der Bahnhöfe 1,2,3,4: **max. 8 - 17 Minuten**
  (9+8+19+17+15+12+9 = 89 ⇒ ∅ 13)

Somit ist auch sichergestellt, daß die maximale Umsteigezeit vom 30 Minuten nicht überschritten wird.

3.4 Vorstellung der Notation für die MP - Formulierung

a^{l}_{ij} Ankunftszeit des "l"ten Busses der Linie "j" am Bahnhof "i".

d^{m}_{ik} Abfahrtszeit des "m"ten Busses der Linie "k" am Bahnhof "i".

h_{ij} Grundsätzlicher Abstand der Linie "j" am Bahnhof "i".
Gleichzeitig auch die maximale Grenze, den Unterschied der Ankunftszeiten zweier aufeinander folgender Busse betreffend.

M Eine willkürlich große Nummer, die für Formulierung des Problems benutzt wird.

s^{min}_{ij} Minimale Haltezeit eines Busses der Linie "j" am Bahnhof "i".

s^{max}_{ij} Maximale Haltezeit eines Busses der Linie "j" am Bahnhof "i"

$t^{l}_{(i-1)ij}$ Fahrzeit des "l"ten Busses der Linie "j" vom "(i-1)"ten zum "i"ten Bahnhof.

T Maximale Umsteigezeit

$v^{l}_{ij}(t)$ Ankunftsschema der Passagiere des "l"ten Busses der Linie "j" am Bahnhof "i".

ω^{l}_{ijk} Umsteigepassagiervolumen vom "l"ten Bus der Linie "j" zur Linie "k" am Bahnhof "i"

δ^{lm}_{ijk} Eine binäre Variable, welche den Wert 1 annimmt, falls ein Umsteigen vom "l"ten Bus der Linie "j" auf den "m"ten Bus der Linie "k" am Bahnhof "i" möglich und optimal ist. Andernfalls nimmt die Variable den Wert 0 an.
Nicht möglich bedeutet z.B., daß der "l"te Bus der Linie "j" erst ankommt, nachdem der "m"te Bus der Linie "k" abgefahren ist.
Nicht optimal bedeutet z.B., daß es mindestens noch einen Bus der Linie k gibt der abfährt, nachdem der "l"te Bus der Linie "j" angekommen ist und bevor der "m"te Bus der Linie "k" abfährt.

3.5 Die MP - Formulierung

3.5.1 Voraussetzungen

Von folgenden Voraussetzungen wird im folgenden ausgegangen:

1. Es wird vorausgesetzt, daß die Busse genau dem Zeitplan entsprechend ankommen und abfahren. Dies kann auch als exakte Zeitplaneinhaltung bezeichnet werden. Wenn die tatsächliche Ankunftszeit der Busse jedoch von den Ankunftszeiten des Zeitplans abweicht, wird dies als zufällige Zeitplaneinhaltung bezeichnet.
2. Vorausgesetzt wird, daß die verfügbare Kapazität eines an einem Bahnhof ankommenden Busses ausreicht, um allen Passagieren, die darauf warten in diesen Bus zu steigen, einen Platz zu bieten. Dies kann auch als unbegrenzte Buskapazität bezeichnet werden. Falls diese Voraussetzung nicht eingehalten werden kann, wird dies als begrenzte Buskapazität bezeichnet.

3.5.2 Die Formulierung des Mathematischen Programms (MP)

Minimiere (die Zielfunktion)**:**

$$\sum_i \sum_j \sum_{\substack{k \\ k \neq j}} \sum_l \sum_m \delta_{ijk}^{lm} (d_{ik}^m - a_{ij}^l) \omega_{ijk}^l +$$

$$\sum_i \sum_j \sum_l \int_0^{d_{ij}^l - d_{ij}^{l-1}} v_{ij}^l(t)(d_{ij}^l - d_{ij}^{l-1} - t)dt$$

mit Hinblick auf die Constraints:

$$G1 \equiv d_{ij}^l - a_{ij}^l \leq s_{ij}^{\max}, \quad \forall i, j, l$$

$$G2 \equiv d_{ij}^l - a_{ij}^l \geq s_{ij}^{\min}, \quad \forall i, j, l$$

$$G3 \equiv a_{ij}^l - d_{ij}^{l-1} \leq h_{ij}, \quad \forall i, j, l$$

$$G4 \equiv (d_{ik}^m - a_{ij}^l)\delta_{ijk}^{lm} \leq \mathrm{T}, \ \forall i, j, k, l, m$$

$$G5 \equiv d_{ik}^m - a_{ij}^l + \mathrm{M}(1 - \delta_{ijk}^{lm}) \geq 0, \forall i, j, k, l, m$$

$$G6 \equiv \sum_m \delta_{ijk}^{lm} = 1 \quad \forall i, j, k, l$$

$$G7 \equiv a_{ij}^l - d_{(i-1)j}^l = t_{(i-1)ij}^l, \forall j, l, i \geq 2$$

3.5.2.1 Die Zielfunktion

Die Zielfunktion besteht aus zwei Ausdrücken:
Der erste Ausdruck berechnet die gesamte Umsteigezeit (TT) aller umsteigenden Passagiere an allen Umsteigebahnhöfen.

Die Umsteigezeit jedes einzelnen der ω^{l}_{ijk} Passagiere am Bahnhof "i" die vom "l"ten Bus der Linie "j" auf die Linie "k" umsteigen wollen beträgt $(d^{m}_{ik}-a^{l}_{ij})\delta^{lm}_{ijk}$, wobei d^{m}_{ik} die Abfahrtszeit des "m"ten Busses der Linie "k" am Bahnhof "i" ist. a^{l}_{ij} ist die Ankunftszeit des "l"ten Busses der Linie "j" am Bahnhof "i" und die δ - Variable, die sicherstellt, daß nur Umsteigevorgänge berücksichtigt werden, die auch möglich und optimal sind. Die absolute, gesamte Umsteigezeit wird somit durch die Multiplikation von $(d^{m}_{ik}-a^{l}_{ij})\delta^{lm}_{ijk}$ mit ω^{l}_{ijk} (der Anzahl der wartenden Passagiere) und der Summierung über alle Busse, Linien und Bahnhöfe berechnet.

Der zweite Ausdruck berechnet die gesamte anfängliche Wartezeit (IWT) aller Passagiere an ihrem Startbahnhof. Durch das Integral wird die gesamte anfängliche Wartezeit aller Passagiere, die in den "l"ten Bus der Linie "j" am Bahnhof "i" steigen berechnet. Durch Summierung der Werte des Integrals über alle Busse aller Linien an allen Bahnhöfen wird somit die gesamte anfängliche Wartezeit aller Passagiere an ihrem Startbahnhof errechnet. Es wird vorausgesetzt, daß die Passagiere, die in den "l"ten Bus der Linie "j" am Bahnhof "i" einsteigen wollen, entsprechend einer bestimmten Funktion $v^{l}_{ij}(t)$ zwischen d^{l-1}_{ij} und d^{l}_{ij} ankommen, wobei t von d^{l-1}_{ij} ab gemessen wird. Dabei entspricht die Funktion dem Ankunftsmuster der Passagiere zur Zeit t.

Insgesamt berechnet die Zielfunktion also die gesamte Wartezeit aller Passagiere (die Summe aus allen anfänglichen Wartezeiten und Umsteigezeiten) für einen Fahrplan, die es zu minimieren gilt.

3.5.2.2 Die Constraints

Von dem sieben verschiedenen Constraints sind die *Constraints G1* bis *G4* Servicebezogene Constraints, während die *Constraints G5 bis G7* logische Constraints sind, welche die Umsteigemöglichkeiten ("ist ein Umsteigen möglich und optimal") und die damit zusammenhängend Ankunftszeiten beschreiben. *Constraint G1* legt fest, daß die Haltezeit $(d^l_{ij}-a^l_{ij})$ des "l"ten Busses der Linie "j" am Bahnhof "i" kürzer oder gleich sein muß wie die maximale Haltezeit S^{max}_{ij}. Durch *Constraint G2* wird festgelegt, daß die Haltezeit des "l"ten Busses der Linie "j" am Bahnhof "i" länger oder gleich sein muß wie die minimale Haltezeit S^{min}_{ij}. *Constraint G3* legt fest, daß der Abstand (die Zeitdifferenz zwischen den Ankunftszeiten zweier aufeinander folgender Busse) nicht länger sein darf als ein festgesetzter maximaler Abstand. *Constraint G4* beschränkt die Umsteigezeit (TT) eines jeglichen Umsteigevorgangs darauf kürzer oder gleich lang zu sein wie die maximale Umsteigezeit. Die Zeit für den Umsteigevorgang berechnet sich aus der Differenz der Abfahrtszeit des "m"ten Busses der Linie "k" am Bahnhof "i" auf den umgestiegen wird und der Ankunftszeit des "l"ten Busses der Linie "j" am gleichen Bahnhof ("i") mit dem der Passagier den Bahnhof erreicht. Durch Multiplikation dieses Wertes mit der δ - Variable für den korrespondierenden Umsteigevorgang (Wert = 1, falls der Umsteigevorgang möglich und optimal ist, sonst Wert = 0) wird sichergestellt, daß nur Umsteigevorgänge, die tatsächlich stattfinden überprüft werden. *Constraint G5* stellt sicher, daß δ^{lm}_{ijk} den Wert 0 besitzt, falls ein Umsteigen vom "l"ten Bus der Linie "j" zum "m"ten Bus der Linie "k" am Bahnhof "i" nicht möglich ist. Dabei ist M eine sehr große Zahl, die in jedem Fall größer ist als jede mögliche Umsteigezeit. Damit *Constraint G5* nicht verletzt wird, muß bei jedem Umsteigevorgang der nicht möglich ist, die δ - Variable = 0 sein, da die Umsteigezeit dieses Umsteigevorgangs negativ ist. Zusammen stellen die *Constraints G5* und *G6* sicher, daß das Umsteigen von einem bestimmten Bus einer bestimmten Linie nur zu einem Bus einer anderen Linie stattfindet. (Nur genau einer von den vielen Bussen zu denen ein Umsteigen möglich gewesen wäre) Von allen Umsteigevorgängen, die es am Bahnhof "k" vom "l"ten Bus der Linie "j" zum "m"ten Bus der Linie "k" geben könnte, ist nur einer möglich (und optimal), dargestellt durch den Wert 1 der δ - Variable für diesen speziellen Umsteigevorgang. Bei allen anderen dieser Umsteigvorgänge, die ja entweder nicht möglich oder nicht optimal sind hat die δ - Variable dann den Wert 0. (Logischerweise kann auch nur jeweils ein Umsteigevorgang optimal sein.) In *Constraint G7* ist die Abhängigkeit der Ankunftszeit eines Busses, an einem bestimmten Bahnhof, von der Abfahrtszeit des selben Busses am vorhergehenden Bahnhof enthalten. Die Ankunftszeit hängt in diesem Fall von der Abfahrtszeit ab, da es eine festgelegte Fahrzeit zwischen diesen beiden Bahnhöfen gibt, die dann der Differenz zwischen der Ankunftszeit eines Busses "m" an einem Bahnhof "i" und der Abfahrtszeit dieses Busses "m" am vorhergehenden Bahnhof "i-1" entspricht.
Von einer Begrenzung der Fuhrparkgröße wird implizit in der MP - Formulierung ausgegangen, ansonsten könnte einfach jede Minute ein Bus fahren gelassen werden und die gesamte Wartezeit wäre minimal. Zu der Begrenzung der Fuhrparkgröße gehört auch die Voraussetzung, daß die Anzahl der Busse jeder Linie bekannt ist.

4. Warum werden Genetische Algorithmen zur Lösungsfindung benutzt ?

4.1 Was erschwert die Lösung des Optimierungsproblems?

Einer der Hauptgründe dafür, daß das Transportsystem - Zeitplanungsproblem schwer mittels klassischer Methoden lösbar ist, ist der Suchraum.
Dies kann auch noch aufgegliedert werden. Im einzelnen sind dies dann:

1. Der Suchraum ist diskret.

Dies hat seine Ursache in den Entscheidungsvariablen, also den Ankunftszeiten $\mathbf{a^l_{ij}}$, den Abfahrtszeiten d^l_{ij} und den Umsteigevariablen $\delta^{\mathbf{lm}}_{\mathbf{ijk}}$.
Die Umsteigevariablen $\delta^{\mathbf{lm}}_{\mathbf{ijk}}$ sind von binärer Natur sind, sie nehmen also die Werte 0 oder 1 an und machen dadurch den Suchraum diskret.
Die zwei anderen Variablen verkörpern die geplanten Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Busse, wobei es sinnvoller ist sie in Minuten anzugeben, anstatt in Bruchteilen von Minuten. Eine geplante Ankunftszeit von 9:35 Uhr ist z.B. sinnvoller als 9:34:22.5.
Es ist also, obwohl nicht absolut notwendig, praktischer wenn auch die Ankunfts- und Abfahrtszeiten als diskrete Mengen dargestellt werden.

2. Der Suchraum ist nicht linear.

Die Nichtlinearität hat ihre Ursache in den nicht linearen Funktionen in der Zielfunktion und im Constraint G4.

3. Die Größe des Suchraums.

Es kann leicht nachgerechnet werden, daß bei einem Netzwerk mit "b" Umsteigebahnhöfen, einem Durchschnitt von "r" Linien, welche an jedem Umsteigebahnhof halten und einem Durchschnitt von "n" Bussen pro Linie, die Anzahl der Variablen $O(br^2n^2)$ beträgt.
Schon bei einem kleinen Netzwerk mit einem Umsteigebahnhof (b = 1), drei Linien (r = 3), die am Umsteigebahnhof halten und 10 Bussen (n = 10) für jede Linie, gibt es dann insgesamt 660 Variablen, wovon allein 600 δ - Variablen sind.
Darüber hinaus kann auch leicht ausgerechnet werden, daß es noch zusätzlich $O(br^2n^2)$ Constraints gibt, die auch mit dem Problem verbunden sind.
Damit ist selbst bei einem kleinen Netzwerk die Anzahl der Variablen schon immens und macht es schwer das Problem mittels klassischer Methoden zu lösen.

Diese Merkmale bzw. Probleme legen es nahe eine andere Optimierungsmethode zu suchen, welche die Probleme verringert und das Erlangen optimaler Planungen erleichtert.

4.2 Warum eignen sich GA's besonders gut zur Lösung des Problems?

Aus der Formulierung des Mathematischen Programms kann erkannt werden, daß ein großer Teil der Variablen beschränkt ist, vor allem durch die Festlegung von Grenzen bezüglich der Haltezeiten und Abstände. (Constraints G1, G2 und G3)
Bei einem GA's ist es im Gegenteil zu anderen Optimierungsmethoden ganz normal, daß er mit **Constraints** arbeitet. Dadurch entsteht kein zusätzlicher Aufwand.

Des weiteren tragen vor allem die Constraints G5 und G6 und die δ - Variablen zur Komplexität des Problems bei. Sie sind nur dazu da um festlegen, daß nur einmal umgestiegen wird und daß das Umsteigen überhaupt möglich und optimal ist.
Darüber hinaus ist Constraint G7 nur dazu da festzulegen, daß die Ankunftszeit an einem nachfolgenden Bahnhof von der Abfahrtszeit am vorherigen Bahnhof abhängt.
GA's bieten, um diese Problematik behandelbarer zu machen, die einfache Benutzung bzw. Einbindung von **externen, procedurbasierten Deklarationen** an, welche die Benutzung von Daten, bzw. Informationen externer, nicht zum Optimierungsalgorithmus gehörender Proceduren ermöglicht. Dadurch wird die Entfernung der Constraints G5, G6 und G7 und der δ - Variablen möglich.

Hilfreich, auch vor allem im Hinblick auf die große Anzahl an diskreten Variablen, ist die **Binärstringcodierung**, die bei GA's normal bzw. gewohnt ist und die Handhabung mit diskreten Variablen erleichtert, da sie von Natur aus mit diskreten Suchräumen arbeiten. Obwohl die Benutzung diskreter Variablen in der MP - Beschreibung die Komplexität (vor allem in der Darstellung) um ein Vielfaches vergrößert, hat dieselbe Benutzung und Darstellung bei GA's keinen Einfluß auf die Komplexität.

Dies führt natürlich zu einer **Reduzierung der Komplexität der Berechnungen**, bzw. zur **Reduzierung der Anzahl der Variablen und Constraints**.

Daher ist es sinnvoll einen binär codierten GA (mit Fortpflanzung, Crossover und Mutation) zu benutzen, vor allem weil potentiell auch verschiedenste Fälle des Transportsystem - Zeitplanungsproblems mit ein und demselben GA, der jeweils nur etwas angepaßt werden muß, gelöst werden können.
Diese Fälle werden dann im nächsten Kapitel angesprochen.

5. Fallstudien - Anwendung von GA's auf Erweiterungen des Ausgangsproblems.

5.1 Fall 1
- ein Umsteigebahnhof- exakte Zeitplaneinhaltung
- unbegrenzte Buskapazität

Dies ist ein besonderer Fall des Mathematischen Problems aus Kapitel 3. Die Anzahl der Umsteigebahnhöfe "b" beträgt jetzt 1. Die Formulierung des MP's kann, bis auf die Tatsache, daß der Constraint G7 nicht mehr notwendig ist, da es jetzt ja nur einen Umsteigebahnhof gibt, übernommen werden. Selbst bei diesem Problem beträgt die Komplexität $O(r^2n^2)$. Versuche dieses Problem mittels klassischer Methoden zu lösen, die im Rahmen früherer Studien durchgeführt wurden, scheiterten, da der in diesem Fall benutzte Algorithmus wiederholt nicht in der Lage war zu einer Lösung zu konvergieren.

5.1.1 Reduzierung der Anzahl der Variablen

Die **Variablen bei der MP - Formulierung** sind folgende:
Ankunftszeiten $\mathbf{a^l_{ij}}$,
Abfahrtszeiten $\mathbf{d^l_{ij}}$, und
Umsteigevariablen $\delta^{\mathbf{lm}}_{\mathbf{ijk}}$.

Im Hinblick auf die Constraints G1 bis G3, die Abstands- und Haltezeitbegrenzungen enthalten, werden für die **GA - Beschreibung** folgende zwei Arten von **Variablen** benötigt:

$$\mathbf{x^l_j = (a^l_j - a^{l-1}_j)}$$

Dies ist der Abstand zwischen dem "l"ten und dem "l-1"ten Bus der Linie "j".

$$\mathbf{dx^l_j = (d^l_j - a^l_j)}$$

Damit wird die Haltezeit des "l"ten Busses der Linie "j" beschrieben.

Die Ankunfts- und Abfahrtszeiten können unter Benutzung der Abstands- und Haltezeitbegrenzungen mit der Anfangsbedingung ($\mathbf{a^0_j} = 0$) und unter Benutzung folgender rekursiver Gleichungen berechnet werden:

$$\mathbf{a^l_j = a^{l-1}_j - x^l_j,} \quad \mathbf{d^l_j = a^l_j - dx^l_j}$$

Ferner können die Umsteigevariablen aus den Ankunfts- und Abfahrtszeiten abgeleitet werden und müssen dadurch nicht mehr notwendigerweise mitgeführt werden.

5.1.2 Bestandteile eines GA - Strings

Es wird nun ein GA - String betrachtet, der einen vollständigen Planungszyklus repräsentiert. Dazu müssen aber noch einige Details erklärt werden:

Bei jeder Linie gibt es genauso viele Ankunfts- und Abfahrtszeiten (oder $\mathbf{x^l_j}$ und $\mathbf{dx^l_j}$) wie es Busse gibt. Um die Angelegenheit zu vereinfachen, wird vorausgesetzt, daß alle Busse einer Linie die gleiche Haltezeit haben. Somit ist $\mathbf{d^l_j = d_j}$. Daher gibt es für die η_j Busse (η = Anzahl der Busse, $_j$ = Linie, für welche die Anzahl an Bussen gilt) einer Linie "j" an einer Haltestelle insgesamt $\eta_j + 1$ Variablen. Um die Planung auf ein bestimmtes Zeitfenster T (T wie "time window") zu begrenzen, wird die Ankunftszeit des letzten Busses auf das Ende des Zeitfensters festgesetzt. Somit werden die Ankunfts- und Abfahrtszeiten von η_j - 1 Bussen, anstatt aller η_j verändert. Daher gibt es jetzt insgesamt für jede Linie an jeder Haltestelle in der GA - Beschreibung η_j Variablen. (In diesem Fall, wenn die Anzahl der Busse an jeder Linie gleich ist, könnte auf eine Indizierung der Busanzahl η verzichtet werden, andernfalls ist die Indizierung aber notwendig.) Jede Variable wird durch Binäre Teilstrings dargestellt. Zum Schluß werden alle η_j Variablen der anderen Linien zusammengehängt um den gesamten String zu erhalten. Der folgende String zeigt die Sequenz der Variablen eines GA - Strings, der einen vollständigen Planungszyklus für einen einzelnen Umsteigebahnhof mit "**R**" Linien repräsentiert:

$$\mathbf{((dx_1\, x^1{}_1\, x^2{}_1 .....x^{n1}{}_1) .....(dx_R\, x^1{}_R\, x^2{}_R .....x^{nR}{}_R))}$$

Die Tatsache, daß die Haltezeiten und die Abstände aller Busse einer Linie zusammen codiert werden, unterstützt die Verbreitung guter Teilplanungen, da sie sich ja nicht unabhängig voneinander fortpflanzen.

5.1.3 Die Bearbeitung der Constraints innerhalb des GA

Da die Constraints G1 - G3 Größenbegrenzungen (für die Variablen) darstellen, können sie durch die Einführung von oberen und unteren Grenzen für die Variablen - allgemein ausgedrückt Größenbegrenzungen - in den GA übernommen werden.
Damit kann relativ einfach mit diesen Constraints innerhalb des GA's umgegangen werden, wenn die Abstands- und Haltezeitvariablen in den binären Teilstrings einfach entsprechend nach oben und unten begrenzt werden (obere und untere Grenzen).
Dies stellt sich dann folgendermaßen dar (wobei es sich hier um die Constraints aus der ursprünglichen MP - Formulierung handelt, angepaßt an die neuen Variablen):

$$G1 \equiv x_j^l \leq h_j \;\forall\, j,l$$

$$G2 \equiv dx_j^l \leq s_j^{\max} \;\forall\, j,l$$

$$G3 \equiv dx_j^l \geq s_j^{\min} \;\forall\, j,l$$

Ferner wird die untere Grenze des Abstands $\mathbf{x^l_j}$ auf ein passendes niedriges Niveau festgesetzt. Damit können also die Constraints G1 bis G3 entfernt werden.

Die Constraints G5 und G6 können durch folgende Procedur, welche die Umsteigevariablen $\delta^{\mathbf{lm}}_{\mathbf{jk}}$ berechnet, entfernt werden:

```
flag = false
for all Kombinationen von Linien (j,k) und Bussen (l,m)
    if d^l_j < a^m_k or flag = true then
                δ^lm_jk = 0
    else
                δ^lm_jk = 1
                flag = true
```

Die Arbeitsweise dieser Procedur kann folgendermaßen ausgedrückt werden:
Die Ankunfts- und Abfahrtszeiten aller Kombinationen von Linien und Bussen werden miteinander in Verbindung gebracht. Ist die Abfahrtszeit des "l"ten Busses der Linie "j" größer als die Ankunftszeit des "m"ten Busses der Linie "k", so ist ein Umsteigen vom "l"ten Bus der Linie "j" auf den "m"ten Bus der Linie k möglich, sonst nicht. Die Umsteigevariable wird entsprechend gesetzt. Ist einmal eine Umsteigemöglichkeit gefunden, (Umsteigevariable auf "1" gesetzt) so kann es keine weiteren Umsteigemöglichkeiten geben und alle weiteren Umsteigevariablen werden automatisch auf "0" gesetzt.

5.1.3.1 Reduzierung der Probleme durch die Constraints

Somit ist die, im Rahmen des GA's überarbeitete Beschreibung des Transportsystem - Zeitplanungsproblem, darauf reduziert worden, die Zielfunktion nur noch im Hinblick auf einen Constraint zu minimieren (Constraint G4).
Die anderen Constraints stehen inzwischen implizit in der GA - Beschreibung.

Der Constraint G4 wird durch den GA mittels eines Strafausdrucks "Ω" bearbeitet:

$$\Omega(g) = \begin{cases} Rg^2, & falls\ g < 0; \\ 0, & sonst. \end{cases}$$

Dabei ist "R" ein konstanter Strafparameter der Größe 10^3 und g ist der linksseitige Funktionswert des Constraints (G4). Für weitere Informationen zu diesem Strafausdruck wird auf (Deb, 1995; Reklatis, Ravindran, & Ragsdell, 1983) verwiesen.

Abschließend dazu noch ein paar Worte über die **Verbesserungen gegenüber dem MP - Ansatz:**
Die Anzahl der Problemvariablen in der GA - Beschreibung beträgt $2rn$, die der Problemconstraints beträgt $r(r-1)n^2$. Die Verringerung der Anzahl der Variablen (vom quadratischen zum linearen bei r und n) und der Anzahl der Constraints - von $3r(r-1)n^2 + 3rn$ zu $r(r-1)n^2$ - ist einer der Hauptvorteile der Benutzung von GA's für das Transportsystem - Zeitplanungsproblem. Dabei stellt n die Anzahl der Busse und r die Anzahl der Linien dar.

5.1.4 Die Parameter des GA

Um Simulationen mit dem vorgestellten GA durchführen zu können, müssen noch einige Parameter gesetzt werden.

5.1.4.1 Allgemeine Parameter

Es wird davon ausgegangen, daß insgesamt 30 Busse (10 für jede Linie) verfügbar sind, die drei Linien befahren. Das Planungszeitfenster (T) wird auf 7.00 Uhr bis 11.00 Uhr vormittags, also 240 min, festgesetzt.
Des weiteren müssen noch folgende Parameter gesetzt werden:

- Minimaler Abstand $\mathbf{h^{min}_j}$ = 14 Minuten, mit Ausnahme des ersten Busses bei dem $\mathbf{h^{min}_j}$ = 0 Minuten beträgt, da kein Bus vor ihm fährt.
- Maximaler Abstand $\mathbf{h^{max}_j}$ = 45 Minuten, mit Ausnahme des ersten Busses bei dem $\mathbf{h^{max}_j}$ = 31 Minuten beträgt.
- Minimale Haltezeit $\mathbf{s^{min}_j}$ = 2 Minuten.
- Maximale Haltezeit $\mathbf{s^{max}_j}$ = 5 Minuten.
- Maximale Umsteigezeit TT = 30 Minuten.

5.1.4.2 Stringlänge eines vollständigen Planungszyklus

Wenn man die obigen Parameter zugrunde legt, kann die Gesamtlänge eines Strings, der einen vollständigen Planungszyklus repräsentiert berechnet werden. Bei einer Linie "j" würden die Variablen aus den Abständen (x^l_j, l = 1, 2, ...9) für neun Busse ("η_j - 1", siehe Kapitel 5.1.2) und einer Haltezeit (dx_j) bestehen. Wenn als Variablen nur Integer - Werte zugelassen sind, dann legen die gewählten Variablenbegrenzungen nahe, daß jeder Abstand 5 Bits benötigt (da man 32 Möglichkeiten hat) und jede Haltezeit 2 Bits (da man 4 Möglichkeiten hat). Daher beträgt die Gesamtlänge eines Strings für einen vollständigen Planungszyklus [3*((9*5)+2)] also 141. Die interne Darstellung der Integer - Werte und ihre Speicherallokation, die auch von der gewählten Programmiersprache abhängt und sich von den hier angenommenen Werten stark unterscheiden kann, wird hier nicht in Betracht gezogen.

5.1.4.3 GA - Parameter

Die folgenden GA - Parameter wurden unter Benutzung von Vorschlägen aus der GA - Literatur und der Durchführung einiger Testversuche gewählt:

- Die Populationsgröße beträgt 350.
- Benutzung von Binärer Turnierselektion.
- Ein "Ein - Punkt - Crossover" über den gesamten String wird benutzt.
- Die Crossoverwahrscheinlichkeit beträgt $p_c = 0.95$.
- Benutzung von Bitweiser Mutation mit der Wahrscheinlichkeit $p_m = 0.005$.
- Der GA wird entweder nach dem Überschreiten von 200 Generationen oder wenn der Unterschied im Minimum und Durchschnitt der Populationen weniger als 10^{-7} beträgt beendet.

5.1.4.4 Ergebnisse

Zuerst wird als Ziel nur die Minimierung der Umsteigezeit (TT) in Betracht gezogen. In diesem Fall ist eine optimale Zeitplanung diejenige, in der die Busse verschiedener Linien, die den Umsteigebahnhof anfahren, ungefähr zur gleichen Zeit am Bahnhof ankommen und abfahren.
In Abbildung 3 ist solch eine Zeitplanung zu sehen, die mittels des GA errechnet wurde. Dabei stellen die Pfeile, die auf die horizontale Linie zeigen, die Ankunftszeiten dar und die Pfeile, die von der horizontalen Linie ausgehen, stellen die Abfahrtszeiten dar. Diese Zeitplanung erfordert nur 160 Minuten Gesamtumsteigezeit, während die beste Zeitplanung der Anfangspopulation des GA's noch eine Gesamtumsteigezeit von 1170 Minuten erforderte. Wie erwartet, kommen die Busse, welche die drei Linien befahren mehr oder weniger zur gleichen Zeit an und fahren auch mehr oder weniger zur gleichen Zeit ab.

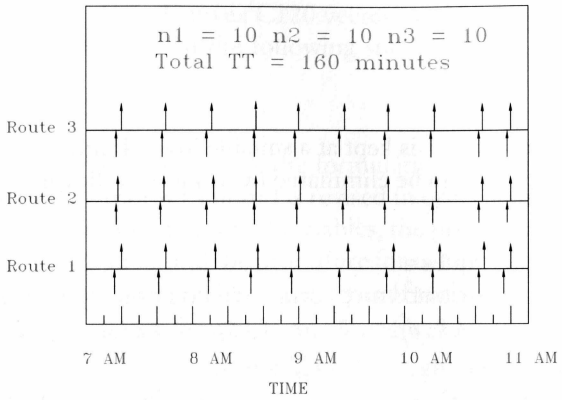

Figure 2. Optimized schedule for TT obtained by GAs.

Abbildung 3 - Minimierung der TT

Darüber hinaus kann auch der alleinige Einfluß der anfänglichen Wartezeit (IWT) auf die optimale Planung untersucht werden. Das Ankunftsmuster der Passagiere $V_j^l(t)$ wird dreieckig gewählt, mit einer Höhe L_j von 1244, wie man in Abbildung 4 erkennen kann.

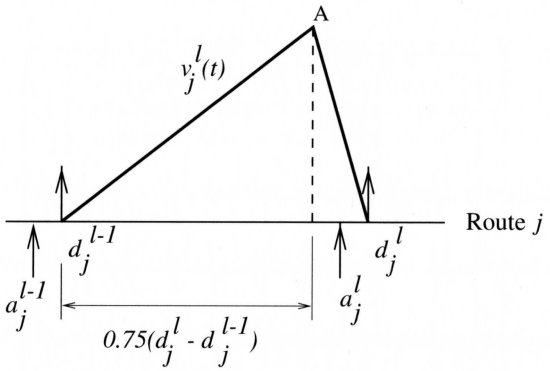

Figure 3. The triangular arrival pattern of passengers.

Abbildung 4 - Ankunftsmuster

In diesem Fall ist zu erwarten, daß bei der optimalen Zeitplanung bei jeder Linie die Abstände gleich sind.
Abbildung 5 zeigt diese optimale Planung, alle Abstände sind wie erwartet mehr oder weniger gleich.

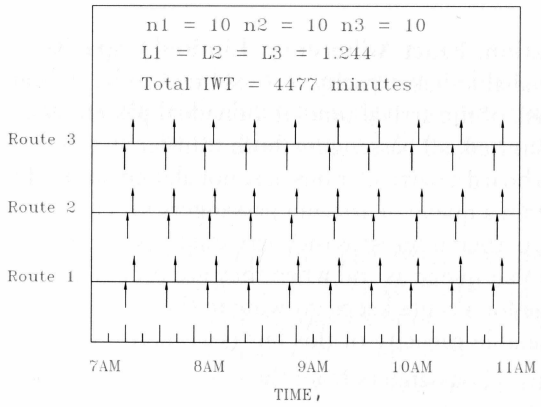

Abbildung 5 - Minimierung der IWT

Anzumerken ist noch, daß die optimale Zeitplanung, die nur im Hinblick auf die anfängliche Wartezeit (IWT) minimiert wird, auch die Lösung für den Fall ist, daß im Hinblick auf die gesamte Wartezeit TWT optimiert wird. (Abbildung 5)

5.2 Überblick über weitere Fallstudien

Über die u.a. in Fall 1 vorgestellte Fallstudie hinaus gibt es noch weitere Fallstudien. Im einzelnen handelt es sich um die Fälle:

- Ein Umsteigebahnhof, exakte Zeitplaneinhaltung, beschränkte Buskapazität (2)
- Ein Umsteigebahnhof, zufällige Zeitplaneinhaltung, unbeschränkte Buskapazität (3)
- Mehrere Umsteigebahnhöfe, exakte Zeitplaneinhaltung, unbeschränkte Buskapazität (4)

5.3 Anpassung des GA's an die weiteren Fallstudien

5.3.1 Fall 2 - Ein Umsteigebahnhof - exakte Zeitplaneinhaltung - beschränkte Buskapazität

Im obigen Fall wurde die zur Verfügung stehende Buskapazität als unbegrenzt vorausgesetzt. Daher war es nicht nötig die Ankunftszeit eines jeden Passagiers im Auge zu behalten. Wenn jedoch die zur Verfügung stehende Buskapazität begrenzt ist, können u.U. nicht alle Passagiere (sowohl die umsteigenden als auch die nicht umsteigenden Passagiere) die am Bahnhof ankommen und einen bestimmten Bus besteigen wollen dies auch wirklich tun. Deshalb ist es erforderlich in diesem Falle eine Warteschlange für die ankommenden Passagiere jeder Linie zu führen. Nicht umsteigende Passagiere stellen sich, wenn sie am Bahnhof ankommen, in die Warteschlange der Linie mit der sie fahren wollen. Passagiere die zu einer bestimmten Linie umsteigen wollen, stellen sich zu der Warteschlange dieser Linie exakt dann, wenn sie von einer anderen Linie zum Bahnhof gebracht wurden. Die Warteschlange einer Linie wächst solange auf diese Weise weiter bis ein Bus dieser Linie am Bahnhof ankommt. Falls die zur Verfügung stehende Kapazität dieses Busses (im folgenden der "l"te Bus der Linie "j") C^l_j ist, dann steigen jetzt die ersten C^l_j Passagiere der Warteschlange in den Bus. Der Rest bildet die anfängliche Warteschlange für den nächsten Bus dieser Linie. Dieser setzt sich bis zum Ende des Planungszeitfensters (T) fort. Die anfängliche Wartezeit (IWT) und die Umsteigezeit (TT) werden jetzt durch die Summierung der Zeiten der einzelnen umsteigenden und nicht umsteigenden Passagiere, die in der Warteschlange gestanden haben berechnet.
Die Stringdarstellung wird gegenüber Fall 1 nicht verändert. Die Auswertung eines Strings variiert jedoch erheblich. Wie in Fall 1 repräsentiert ein String immer noch die Ankunfts- und Abfahrtszeiten jedes Busses jeder Linie. Jedoch wird mit den Ankunftsmustern der nicht umsteigenden Passagiere $v^l_j(t)$ und der umsteigenden Passagiere (w^l_{jk}) und den Ankunfts- und Abfahrtszeiten jedes Busses der oben beschriebene Warteschlangenprozess durch eine Procedur implementiert. Unter Benutzung dieser Procedur werden die Ausdrücke für die anfängliche Wartezeit IWT und die Umsteigezeit TT berechnet. Die Procedur zur Bestimmung der δ^{lm}_{jk}'s ist nicht länger notwendig, da die Variablen in ihrer obigen Form nicht mehr bedeutungsvoll sind. Zu erwähnen wäre noch, daß die Straffunktion zusätzlich zu den Zeitplanungen aus Fall 1 jetzt noch Zeitplanungen bestraft, bei denen am Ende des Zeitfensters einige Passagiere irgendeiner Linie "j" noch darauf warten in einen Bus steigen zu können. Dabei muß natürlich die gesamte, zur Verfügung stehende Buskapazität der Linie größer sein, als die Gesamtzahl der Passagiere, die am Bahnhof ankommen um diese Linie zu besteigen.
Die Zeitplanung für den hier beschriebenen Fall ist stark von der exakten Größe der Kapazität der Busse abhängig. Allgemein kann gesagt werden, daß die optimale Zeitplanung in Richtung der optimierten Zeitplanung für den gleichen Fall mit unbegrenzten Kapazitäten strebt.

5.3.2 Fall 3 - Ein Umsteigebahnhof - zufällige Zeitplaneinhaltung - unbeschränkte Buskapazität

Alle Parameter bzw. Variablen wie Ankunftszeit, Abfahrtszeit, Umsteigezeit, anfängliche Wartezeit und Gesamtwartezeit sind nun von stochastischer Natur. Dies entsteht aber nur aus der Tatsache, daß die Ankunftszeit zufällig verteilt ist. Die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Variablen müssen durch spezielle stochastische Funktionen (z.B. Verteilungsfunktionen) berücksichtigt werden und gehen so mit in die Berechnung der einzelnen Variablen ein. Für die Ankunftszeit bedeutet dies, daß für sie vorausgesetzt wird, daß die Busse am Umsteigebahnhof abhängig von einer "Wahrscheinlichkeits" - Dichtefunktion ankommen. Jede sinnvolle, stetige Dichtefunktion, wie z.B. eine Normal-, Exponential- oder Gammaverteilte Funktion kann benutzt werden. Bei der Abfahrtszeit, die jetzt von der Ankunftszeit abhängt, ist zu beachten, daß wenn ein Bus vor oder genau zur geplanten Ankunftszeit ankommt, dann muß der Bus bis zu seiner geplanten Abfahrtszeit warten, selbst wenn er dadurch länger wartet als eigentlich geplant. Andererseits, wenn ein Bus nach der geplanten Ankunftszeit ankommt, und entsprechend der geplanten bzw. festgelegten Haltezeit am Bahnhof wartet, dann kann er daher nicht mehr zur geplanten Abfahrtszeit abfahren. Durch die Abhängigkeit der Abfahrtszeit von der Ankunftszeit ist die Abfahrtszeit dann auch zufällig verteilt und muß in Abhängigkeit der zwei oben beschrieben Punkte (zu frühe oder zu späte Ankunft am Bahnhof) und der Abfahrtszeit am vorherigen Bahnhof berechnet werden. Die Anfängliche Wartezeit hängt von den Abfahrtszeiten zweier aufeinander folgender Busse eine Linie ab.
Aus diesem Grund ist auch sie stochastischer Natur und muß mittels einer Wahrscheinlichkeits - Verteilungsfunktion berechnet werden. Da Ankunfts- und Abfahrtszeiten zufällig verteilt sind, ist auch die Umsteigezeit von stochastischer Natur. Sie kann durch eine Wahrscheinlichkeits - Verteilungsfunktion berechnet werden, welche die Wahrscheinlichkeit, daß ein Umsteigevorgang stattfindet und die Wahrscheinlichkeit daß die Umsteigezeit einem bestimmten Wert entspricht berücksichtigen muß. Die Gesamte Wartezeit, die auch über eine Wahrscheinlichkeits - Verteilungsfunktion berechnet werden kann, ist eine Funktion die abhängig von den Verteilungsfunktionen der Anfänglichen Wartezeit und der Umsteigezeit ist und ist daher natürlich auch stochastischer Natur. Die einzelnen Verteilung zu erhalten ist ein Vorgang von nicht unerheblicher Komplexität. Daher wird hier nicht im Detail auf die einzelnen Verteilungen eingegangen.

Die Gesamtwartezeit (TWT) kann in diesem Fall nicht als Optimalitätskriterium herangezogen werden, denn sie beruht auf einer Planung, die nur Bedeutung hat wenn die Busse genau nach Plan ankommen und abfahren.
Daher werden zwei anderen Optimalitätskriterien eingeführt, die der Zufälligkeit der Ankunfts- und Abfahrtszeiten Rechnung tragen:

1. Minimierung der durchschnittlichen Gesamtwartezeit. (Der Durchschnitt kann als Maß für die Gesamttendenz der Verteilung interpretiert werden.)
2. Maximale Zuverlässigkeit. (Die Wahrscheinlichkeit, daß die Gesamtwartezeit weniger oder gleichviel wie eine tolerierbare Grenze beträgt.)

Eine optimale Zeitplanung für diesen Fall (zufällige Zeitplaneinhaltung) zu bekommen verfolgt das Ziel eine Planung zu erhalten, die selbst dann noch eine der "besten" ist, wenn der Zeitplan nicht exakt eingehalten wird. Dafür sind aber einige Berechnungen notwendig. Mittels einer speziellen Procedur muß die beste unter den vielen "durchführbaren" Zeitplanungen ermittelt werden.
Diese Procedur kann folgendermaßen vorgehen:
1. Erschaffung möglichst vieler realistischer Situationen für jede "durchführbare" Zeitplanung.
2. Berechnung der Gesamtwartezeit jeder dieser Situation jeder einzelnen Zeitplanung
3. Vergleich der Gesamtwartezeiten (oder des Durchschnitts der Gesamtwartezeiten, o.ä.)

Die obige Procedur kann durch die Fähigkeit der GA's externe, procedurbasierte Deklarationen zu erlauben, bzw. deren Daten verwenden zu können, ohne großen zusätzlichen Aufwand durch den GA simuliert werden. Die dadurch gewonnenen Informationen über die Vergleiche können dann während des Optimierungsprozesses benutzt werden.
Da bei den Ergebnisse für eine optimierte Zeitplanung mit zufälliger Zeitplaneinhaltung noch zwischen verschiedene Verteilungen unterschieden werden müßte, werden die Ergebnisse hier nicht weiter vertieft. Erwähnt werden könnte noch, daß die Ergebnisse für eine optimierte Planung, die Gesamtwartezeit betreffend, bei zufälliger Zeitplaneinhaltung fast immer schlechter sind als die Ergebnisse bei exakter Zeitplaneinhaltung (Fall 1).
Dies ist aber auch nicht weiter verwunderlich. Interessant ist jedoch, daß die Zeitplanungen bei zufälliger Zeitplaneinhaltung immer zuverlässiger sind, als die Zeitplanungen bei exakter Zeitplaneinhaltung.

5.3.3 Fall 4 - Mehrere Umsteigebahnhöfe - exakte Zeitplaneinhaltung - unbeschränkte Buskapazität

Bisher wurde immer nur ein Umsteigebahnhof in Betracht gezogen. Daher war in diesen Fällen Constraint G7 irrelevant. In diesem Fall jedoch muß dieser Constraint mit einbezogen werden, wenn die geplanten Ankunfts- und Abfahrtszeiten bestimmt werden. Außerdem erfordert die Bestimmung der Umsteigezeiten TT einige spezielle Überlegungen. Gegenüber Fall 1 müssen nur die Proceduren zum Erhalten der Ankunfts- und Abfahrtszeiten und die Proceduren zum Erhalten der Umsteigezeiten (TT) verändert werden. Die Proceduren müssen zusätzlich unterscheiden können, ob es sich bei einer Linie um eine unabhängige oder eine gemeinsame Linie (s.u.) handelt und die Ankunfts- und Abfahrtszeiten dann davon abhängig unterschiedlich berechnen. Durch diese Proceduren wird auch Constraint G7 entfernt. Diese Proceduren sollen hier jedoch nicht weiter vertieft werden. Wichtig ist noch anzumerken, daß die Problematik dieses Falles in der Berechnung der Umsteigezeiten besteht, die durch künstlich vergrößerte bzw. undefinierten Umsteigezeiten erschwert wird. Die künstlich vergrößerten bzw. undefinierten Umsteigezeiten entstehen durch die Tatsache, daß es zwei verschiedene Arten von Linien gibt:

1. unabhängige Linien (fahren nur einen Umsteigebahnhof an)
2. gemeinsame Linien (fahren mindestens zwei Umsteigebahnhöfe an)

Undefinierte Umsteigezeiten entstehen, da es auf den gemeinsamen Linien Passagieren der letzen Busse innerhalb des Zeitfensters nicht möglich ist auf andere Linien umzusteigen, da auf diesen Linien keine Busse mehr fahren. Künstlich vergrößerte Umsteigezeiten entstehen, da Passagier der ersten Busse einer unabhängigen Linie an bestimmten Bahnhöfen sehr lange warten müssen, da der erste Bus einer gemeinsamen Linie erst nach einer bestimmten Zeitspanne (die wegen den Halte- bzw. Umsteigezeiten so groß ist) ankommen kann. Diese Problematik wird mittels einer speziellen Procedur umgegangen, die den Namen DATA trägt. Anzumerken ist noch, daß die Probleme mit den Umsteigezeiten nur künstlicher Natur sind und in der Realität nicht auftreten, da dort auch Busse außerhalb des festgelegten Zeitfensters fahren und es dann z.B. keine undefinierten Umsteigezeiten mehr gibt.
Auf die Procedur DATA und die Ergebnisse der Zeitplanungen für diesen Fall (mehrere Umsteigebahnhöfe) wird hier nicht weiter eingegangen.

6. Anmerkungen

In diesem Kapitel soll noch ein wenig auf die Eindrücke eingegangen werden, die der Schreiber der Ausarbeitung im Rahmen seines Vortrags und seiner Ausarbeitung erhalten hat.

- Der Artikel ist teilweise zu idealisiert, klingt streckenweise wie eine Werbung für Genetische Algorithmen.
- Der große Umfang des Artikels erschwert die Auswahl der Teile, die im Rahmen des Vortrags vorgestellt werden können. Besonders diffizil ist zu erwägen, was im Artikel wichtig und was weniger wichtig ist, also auch was die Zuhörenden interessieren könnte oder was nicht.
  Teile die der Vortragende für interessant hält, können einzelne Zuhörende je nach ihren Neigungen und Vorkenntnissen für trivial bzw. uninteressant halten.
- Soll man ein Beispiel im Rahmen seines Vortrags bringen und dafür auf einige Teile des Artikels verzichten? Wie groß sollte dieses Beispiel werden und verstehen die Zuhörenden das Beispiel überhaupt. Ist das Beispiel im didaktischen Sinne überhaupt sinnvoll, d.h. lohnt die Vorstellung eines Beispiels den Verzicht auf einzelne Teile des Artikels und hat es einen höheren Lerneffekt. Dies ist vor allem in Anbetracht des großen Themenumfangs des Artikels relevant.
- Ein "Multimedialer" Vortrag mit PowerPoint ist natürlich eindrucksvoller und ansehnlicher als ein "nur Folien" Vortrag. Aber er ist auch schwerer zu halten. Man muß seinen Vortrag wirklich bis ins Detail auswendig können, den im Gegenteil zu Folien gibt es hier keine Vorschau für den Vortragenden auf die nächste Folie oder das nächste Argument.
  Es fällt also viel stärker auf, wenn der Vortragende nicht wirklich gut vorbereitet ist.
  Natürlich ist der Aufwand für das Erstellen einer PowerPoint Präsentation größer als für einen Folien - Vortrag. In einem PP - Vortrag kann mehr präsentiert werden, als bei einem Folien - Vortrag, da die Zeit für Auf- und Ablegen der Folien und das abdecken einzelner Teile entfällt. Daher ist die Erwartungshaltung (z.B. den Präsentationsumfang betreffend) größer.
- In wie weit soll man Rücksicht auf das Verständnis seiner Zuhörer nehmen und dabei im speziellen auf bestimmte Zuhörer oder die Mehrheit der Zuhörer. D.h. z.B. gestaltet man den Vortrag so, daß ihn auch jeder versteht, (Auswahl der Themen...) führt Verständnispausen ein usw. oder ist man mehr darauf bedacht soviel wie möglich zu zeigen.

Zusammenfassend kann man sagen:
Wenn der Materialumfang etwas größer ist, steckt man in der Zwickmühle zwischen dem Verständnis der Zuhörer, der Vorstellung von möglichst großen Teilen des Artikels und der Tatsache, daß nichts zu ausführlich präsentiert werden soll. Das betrifft natürlich auch bzw. sogar vor allem die Form der Präsentation (ganze Sätze oder nur einzelne Worte).