



Graz University of Technology

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Nachfrageabhängige verkehrsbetreiberübergreifende Fahrplanoptimierung

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Anton Marauli

Betreuer und Erstgutachter:

Univ. Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf

Weitere Gutachter:

Univ. Prof. Dr.-Ing. Carsten Sommer und

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Veit

Graz, Jänner 2013

Deutsche Fassung:
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date

.....
(signature)

Danksagung

Bei all meinen Kolleginnen und Kollegen des Institutes für Straßen- und Verkehrswesen bedanke ich mich herzlichst für die Zusammenarbeit in den vergangenen sechs Jahren. Fachliche Unterstützung sowie interessante Gespräche über verschiedenste Fachthemen des Verkehrswesens und Aufheiterungen in den Pausen ermöglichten eine spannende und abwechslungsreiche Zeit.

Ganz besonderer Dank gilt dem Institutsleiter Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf für die Unterstützung in der Ideenfindung und der anschließenden umfassenden Betreuung während der Bearbeitung meiner Dissertation und vor allem für die lehrreiche, interessante sowie vielseitige wissenschaftliche Tätigkeit am Institut.

Des Weiteren gebührt den Gutachtern meiner schriftlichen Arbeit, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing Carsten Sommer (Fachgebiet Verkehrsplanung und Verkehrssysteme, Universität Kassel) und Herrn Univ.-Prof. Dipl.- Ing. Dr. techn. Peter Veit (Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, Technische Universität Graz) großer Dank.

Großer Dank gilt auch den Personen, die an der vorliegenden Arbeit Interesse zeigten und mir Korrektur- und Verbesserungsvorschläge unterbreiteten.

Abschließend möchte ich mich noch bei meiner Lebensgefährtin, meiner Familie, meinen Verwandten und meinen Freunden bedanken, die mich bei der Bearbeitung meiner Dissertation immer wieder motivierten und inspirierten.

Kurzfassung

Die Qualität eines Angebots im Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) hängt maßgeblich vom Fahrplan ab. Da in der Regel zahlreiche Verbindungen die Nutzung mehrerer Linien erfordern, sind Umstiege erforderlich. Die Umstiege sind bei der Fahrplangestaltung zu berücksichtigen. Die Gestaltung des Fahrplans wird zusätzlich erschwert, weil sich gerade in Verkehrsverbänden mit mehreren Verkehrsunternehmen im Tagesverlauf Takte, Fahrzeiten oder Linienführungen ändern können. Die Gestaltung eines Fahrplans wird damit zu einer komplexen Aufgabe, die mathematisch nur schwer eindeutig lösbar ist.

In dieser Arbeit wird ein Algorithmus entwickelt, der die Summe der Wartezeiten aller Fahrgäste verkehrsbetreiberübergreifend auf Basis eines bestehenden Fahrplans minimiert. Dabei werden die Abfahrtszeiten der Linien aller ÖPNV-Verkehre (S-Bahn, Straßenbahn und Bus) sowohl mit als auch ohne Taktfahrplan so gegeneinander verschoben, dass die Gesamtwartezeit unter Einbeziehung der Verkehrsnachfrage optimiert wird. Ein wesentlicher Gedanke des Algorithmus liegt darin, dass die manuelle Fahrplangestaltung einer automatisierten Herangehensweise zu Grunde liegt. Dadurch soll nicht nur eine Transparenz des Verfahrens gegeben sein, sondern auch die nötige Akzeptanz bei Verkehrsplanern und Verkehrsbetreibern erzielt werden. Zur Lösung der Fahrplangestaltung wird ein iteratives Optimierungsverfahren entwickelt. Die Gesamtwartezeit eines bestehenden Fahrplans wird durch linienweises Verschieben von Abfahrtszeiten nur verbessert und niemals verschlechtert, bis das globale Minimum erreicht wird. Alle Abfahrtszeiten einer Linie werden um jeweils eine Minute so lange verschoben bis der gesamte aufsummierte Zeitversatz dem Taktintervall der Linie entspricht. Für jede Verschiebung wird die Wartezeit aller umsteigenden Fahrgäste entlang einer Linie berechnet, um in weiterer Folge das Wartezeitenminimum bestimmen zu können. Bei Anschlussverbindungen, die ein Fahrgast aufgrund der späteren Ankunftszeit des ersten Fahrzeuges nicht mehr erreichen kann, wird die Wartezeit bis zur Abfahrt des nächstmöglich erreichbaren Anschlussfahrzeuges berechnet. Dürfen Wendezeiten an den Endhaltestellen einer Linie variieren, ergibt sich durch ungleichmäßiges Verschieben der Abfahrtszeiten der beiden Richtungen zusätzliches Einsparungspotential an Wartezeit.

Das entwickelte Verfahren zur Bestimmung wartezeitminimaler Fahrpläne wird anhand eines bestehenden Verkehrsnachfragemodells für das ÖV-Netz der Stadt Graz angewendet. Linien anderer Verkehrsunternehmen, mit Start- oder Durchgangshaltestellen im Stadtgebiet Graz werden ebenso berücksichtigt. Die Verkehrsnachfrage und das Liniennetz werden aus dem Verkehrsmodell für einen repräsentativen Werktag aus der Kalenderperiode 2011 einen Tageszeitbereich von 12 bis 14 Uhr übernommen. Die mittlere Wartezeit pro Umstieg wird durch die angewandte Optimierung von 140 auf 117 Sekunden reduziert, was einer Verbesserung von rund 16 % entspricht. Während das beste Drittel der Fahrten nach der Optimierung im Mittel 136 Sekunden Wartezeit einspart, hat das schlechteste Sechstel eine nahezu ebenso hohe Wartezeitzunahme; d.h. einige Fahrgäste müssen zu Lasten der Mehrheit Verschlechterungen in Kauf nehmen. Mit dem entwickelten Werkzeug lassen sich jedoch die Auswirkungen automatisiert ermitteln und mögliche Wartezeiteinsparungen klar dokumentieren.

Abstract

The quality of public transport services highly depends on its timetable. Since many connections usually require changes of lines, interchanges have to be considered within the process of timetable planning. Timetable planning is a complex task, especially within public transport agencies with various transport operators, because of changes in base headways, run times or line routes within a day. Thus, the construction of a timetable is a complex task, which can hardly be solved by a single mathematical optimum.

This work deals with the development of an algorithm, which minimizes the total waiting time of all passengers considering all transport operators based on existing timetables in urban public transport networks. Departure times of all lines of different traffic operators with LRT, tram or bus services are shifted until the total waiting time is minimized. Approved travel demand is taken as an input. It is an essential concept of the algorithm that the automated approach is considered similar to manual scheduling. This approach provides a transparent process which fosters the acceptance of implementation by transport operators. The optimization of timetable uses an iterative method. The total waiting time of an existing timetable is consistently improved and never deteriorated when shifting the departure time for lines, until the global minimum of waiting time is reached. The waiting time of all transfer passengers is calculated along a line for each shift. Subsequently the minimum of the total waiting time can be determined. If the arrival time of a vehicle is later than the departure time of the successor line, the calculation of the waiting time for transfer passengers takes into account the next possible connection. If the layover time can vary at the final stops, the departure times of both directions can be shifted differently. Hence, it is possible to save additional waiting time.

The developed tool is applied for the public transport network of the city of Graz for a 2-hour weekday time period using the travel demand data of an existing, calibrated and therefore established traffic model. All public transport lines of other operators with stops within the municipality of Graz are considered as well. The results show that the mean transfer waiting time can be reduced from 140 to 117 seconds by departure time optimization. This represents an improvement of about 16%. While the best third of the trips exhibits a reduction of mean waiting time by 136 seconds, the worst sixth of trips experiences an increase of about the same travel time; thus a minority will have to suffer for the majority of winners. However, the tool allows a reduction of overall waiting times and provides sufficient documentation.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	9
1.1 Problemstellung.....	9
1.2 Ziele	10
1.3 Aufbau der Arbeit	11
2 Grundlagen der ÖV- Gestaltung	13
2.1 Planungen im ÖV	13
2.2 Linienplanung	15
2.2.1 Grundlagen.....	15
2.2.2 Optimierungsmethoden der Linienplanung.....	16
2.3 Fahrplangestaltung.....	19
2.3.1 Grundlagen.....	19
2.3.2 Fahrplananforderungen	20
2.3.3 Ziele eines Fahrplans	20
2.3.4 Anschlussverbindung	22
2.3.5 Wechselwirkung Fahrplan- Betrieb.....	22
2.4 Betriebliche Planung.....	23
2.5 Kennzahlen zur Bewertung eines Fahrplans	25
2.5.1 Topologische Kennzahlen.....	25
2.5.2 Bewertung der Umsteigequalität.....	26
2.5.3 Zeitaufwand	27
2.5.4 Bewertung der zeitlichen Verfügbarkeit	29
2.5.5 Qualitätskriterien des Verkehrsablaufs.....	30
3 Methoden der Fahrplangestaltung	31
3.1 Strategien zur Fahrplangestaltung	31
3.1.1 Zielkriterien	32
3.1.2 Nebenbedingungen.....	32
3.1.3 Rendezvous-Technik.....	32
3.1.4 Integraler Taktfahrplan	33
3.1.5 Fahrplanabstimmung in Verkehrsverbänden	38
3.2 Ansätze der Fahrplanoptimierung.....	39
3.2.1 Lineare Optimierung	40
3.2.2 Fuzzy- Logik	41
3.2.3 Quadratic Semi-assignment Problem.....	42

3.2.4	Periodic Event Scheduling Problem	43
3.2.5	Mehrkriterielle Optimierung.....	46
3.2.6	Branch-and-Bound-Verfahren.....	49
3.3	Potentiale in der Fahrplanoptimierung	52
4	Angebotseigenschaften und Nachfragewirkung	55
4.1	Anzahl Umsteigemöglichkeiten	55
4.2	Verschiebung Abfahrtszeit	57
4.3	Verkehrsnachfrage	58
5	Nachfrageabhängiger Ansatz zur Fahrplanoptimierung	63
5.1	Lösungsansatz.....	63
5.2	Grundvoraussetzungen	66
5.3	Beschreibung Steuerungsparameter.....	66
5.3.1	Analyseperiode.....	67
5.3.2	Linienbündelung.....	67
5.3.3	Linienfixierung.....	68
5.3.4	Mindestwendezeit.....	68
5.3.5	Mindestwartezeiten	69
5.3.6	Übergangsgehzeiten.....	69
5.4	Mathematische Formulierung Fahrplanoptimierung.....	70
5.4.1	Fahrzeugersparnis	71
5.4.2	Fahrplanfeine Umlegung.....	73
5.4.3	Ausgangslösung und erweiterte Auswertungen	74
5.4.4	Potentielle Wartezeit von Umsteigerelation und von Linien	76
5.4.5	Reihung der Linien und Linienwahl zur Optimierung.....	78
5.4.6	Optimierung Abfahrtszeiten einer Linie.....	79
5.4.7	Abbruch des Verfahrens.....	87
6	Modellbeispiel und Vergleichsrechnung	89
6.1	Modellbeispiel	89
6.1.1	Beschreibung.....	89
6.1.2	Optimierung	91
6.1.3	Ergebnisse	92
6.1.4	Vergleich mit fixen Wendezeiten	93
6.1.5	Abänderung Takt	93
6.2	Parameter Verkehrsmodell	93
6.2.1	Verbindungssuche mittels Branch-and-Bound	93
6.2.2	Widerstand von Verbindungen	94

6.2.3	Aufteilungsmodell Verbindungswahl	99
6.3	Vergleichsrechnung Kiel- Neumünster- Rendsburg	104
7	Anwendung der nachfrageabhängigen Optimierung für Graz	107
7.1	Mobilitätsverhalten im ÖPNV-Netz	107
7.2	Verkehrsmodell	107
7.2.1	Modelltechnische Anpassungen	108
7.2.2	Kenngößen Verkehrsmodell Graz	110
7.2.3	Umsteiger	110
7.2.4	Übergangsgehzeiten.....	111
7.2.5	Wartezeiten.....	112
7.3	Fahrplanoptimierung für das Zeitfenster 12:00 bis 14:00.....	112
7.3.1	Rahmenbedingungen Optimierung.....	112
7.3.2	Nachfrageabhängige Fahrplanoptimierung	113
7.3.3	Vergleich Ausgangslösung mit dem optimierten Fahrplan	114
8	Resümee	117
8.1	Fazit	117
8.2	Potentiale und Weiterentwicklungen	120
	Glossar.....	123
	Literaturverzeichnis.....	127
	Anhang	135
A	Einfluss Nachfrage auf Fahrplan	135
B	Variation der Parameter des Aufteilungsmodells der Nachfrage	148
C	Fahrplan und Kenngößenvergleich Modellbeispiel.....	150
D	Modelltechnische Anpassungen.....	152
E	Fahrplanoptimierung Graz Zeitfenster 12:00 bis 14:00	155

1 Einleitung

Die Urbanisierung und der Einwohnerzuwachs in Städten in der Vergangenheit bewirken eine steigende Nachfrage im Öffentlichen Verkehr (ÖV). Ausgehend von mittel- und langfristigen umweltpolitischen Zielen, die eine Entlastung der vom motorisierten Individualverkehr (MIV) erzeugten Emissionen in zentralen Stadtgebieten anstreben und gesundheitsförderliche sowie umweltfreundliche Verkehrsformen forcieren, ist auch in Zukunft von einer weiteren Steigerung der Nachfrage im ÖV auszugehen. Um der Zunahme von mittels ÖV getätigten Wegen gerecht zu werden und um Mobilitätsbedürfnisse von Fahrgästen auch in Zukunft zu befriedigen, bedarf es einer effizienten und attraktiven Gestaltung des Systems ÖV. Um die derzeitige Verbindungsqualität im ÖV beizubehalten und um diese zu verbessern, ist in allen Planungsbereichen (Liniennetz-, Fahr- und Betriebsplanung) über Optimierungen und Veränderungen nachzudenken. Effizienzsteigerungen für ein verbessertes Angebot im ÖV sind durch bekannte Optimierungsverfahren möglich.

Neben den Faktoren Kosten, Bequemlichkeit, Komfort, Unabhängigkeit und Flexibilität ist die Reisezeit ein wesentliches Entscheidungskriterium in der Verkehrsmittelwahl. Die Reisezeit im ÖV wird von der Zugangszeit zu einer Haltestelle, der Fahrzeit im Fahrzeug, der Wartezeit, der Umsteigezeit und der Abgangszeit von einer Haltestelle beeinflusst. Umsteigen ist häufig unumgänglich, jedoch wird die Akzeptanz bei gut funktionierenden Umsteigemöglichkeiten und günstigen Umsteigezeiten, die von der Gestaltung des Fahrplans abhängig sind, deutlich erhöht.

1.1 Problemstellung

In einigen Städten erfolgt die Planung von neuen Fahrplänen für eine Fahrplanperiode ohne Verwendung eines Optimierungsansatzes oder einer Software. Die Basis bildet ein historisch gewachsener Fahrplan, bei dem versucht wird fahrplanbezogene Fahrgastbeschwerden zu berücksichtigen. Die Vorgangsweise ist dabei meist jene, dass die Auswirkungen von Wartezeiten beim Verschieben von Abfahrtszeiten an Umsteigehaltestellen Linie für Linie quantifiziert werden. Netzweite Auswirkungen können dabei nur begrenzt berücksichtigt werden. Es besteht die Gefahr, dass einzelne Umsteigerelationen vom Planer über- oder unterbewertet werden. Die Erstellung eines Fahrplanes für eine Kalenderperiode ist mit großem Aufwand verbunden, da Fahrpläne einerseits für unterschiedliche Tageszeiten und andererseits wochentags- sowie jahresabhängig geplant werden müssen.

Für Fahrten ohne erforderlichen Linienwechsel spielen kleinere Verschiebungen von Abfahrtszeiten keine wesentliche Rolle. Vielmehr gilt es dabei Anschlussverbindungen so zu planen, dass sich für

Fahrgäste, die zum Erreichen ihres Zielortes umsteigen müssen, keine unangenehmen langen Wartezeiten ergeben. Jedoch sind auch zu knapp geplante Anschlüsse zu vermeiden, da sie für umsteigende Fahrgäste Stress verursachen können. Ein günstiger Anschluss liegt vor, wenn trotz kleiner Verspätung des Zubringerfahrzeuges ein Anschluss erreicht werden kann. Eine große Anzahl an Anschlüssen mit kurzen Wartezeiten erhöht bei Nichteinhalten des Sollfahrplanes den Aufwand für die betriebliche Anschlussicherung und hat bei häufigem Nichterreichen Einfluss auf die Kundenzufriedenheit. Verbesserungen an der stärksten Umsteigerelation oder an der Haltestelle mit den meisten Umsteigevorgängen durch Verschieben der Abfahrtszeiten haben nicht zwingend den größten Effekt auf die Gesamtwartezeiten in einem Verkehrsnetz. Vielmehr sind alle Umsteigerelationen entlang eines gesamten Linienumlaufes und deren Auswirkungen bei zeitlichen Änderungen zu berücksichtigen. Durch viele Überschneidungen in einem Netz entstehen viele Wechselwirkungen, die bei größeren Netzen manuell nur schwer zu koordinieren sind. Mit entsprechenden planerischen und lokalen Kenntnissen kann auf manueller Basis prinzipiell ein günstiger Fahrplan erreicht werden, jedoch stellt sich die Frage, ob dieser das netzweite globale Minimum der gesamten Umsteigewartezeit darstellt. Je mehr Linien ein Netz umfasst, umso schwieriger wird es, auf manueller Basis einen guten Fahrplan zu kreieren. Bei Berücksichtigung aller innerstädtischen und regionalen Linien treten viele unregelmäßige Fahrten, Linienverläufe und Taktintervalle auf. Dadurch wird die Gestaltung eines Fahrplanes zu einer komplexen Aufgabe und mathematisch nur schwer eindeutig lösbar.

Durch die Gründung von Verkehrsverbänden ist die Bereitschaft zur Zusammenarbeit von Verkehrsbetreibern gegeben. Informationen über notwendige Abstimmungen von fahrplanmäßigen Anschlüssen sind dadurch bekannt, jedoch hat der wirtschaftliche Gedanke des einzelnen Betreibers meist höhere Priorität als das Ziel, einen hochwertigen verkehrsbetreiberübergreifenden ÖV in einem Netz anbieten zu können. Bei fahrplanmäßig abgestimmten Anschlussverbindungen sind für Fahrgäste hohe Umsteigequalitäten vorhanden und bei nicht abgestimmten Verbindungen treten für umsteigende Fahrgäste Wartezeiten auf. Wartet hingegen ein Fahrzeug einer Anschlussverbindung die fahrplanmäßige Zubringerlinie ab, kann eine Verspätung einer einzigen Linie netzweite Auswirkungen verursachen.

Aus der Literatur bekannte Methoden für eine Minimierung der Summe aller Umsteigezeiten erfordern einerseits Regelmäßigkeiten von Takt und Fahrzeitprofilen und betrachten andererseits nur eine Teilmenge der Linien eines Netzes, wie z.B. U-Bahnlinien einer Stadt. Eine betreiberübergreifende Gesamtbetrachtung aller Anschlüsse ist mit einem hohen Maß an Unregelmäßigkeiten bezüglich Fahrzeitfolgezeiten, Fahr- und Umlaufzeiten sowie sich ändernder Linienverläufe verbunden. Verkehrsbetreiberübergreifende Abstimmungen von Anschlüssen berücksichtigen meist nicht die Verkehrsnachfrage. Es fehlt eine Methode, die nachfrageabhängig und betreiberübergreifend die Summe aller Wartezeiten eines Fahrplans für ein gesamtes Netz unter Berücksichtigung aller verkehrenden Linien und möglichen Verbindungen zwischen Quelle-Zielbeziehungen minimiert.

1.2 Ziele

Zur Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage in der Fahrplangestaltung sind die Mengen von Einsteigern, Aussteigern und vor allem jene der Umsteiger an Haltestellen notwendig. Umsteigemengen sind aus Hochrechnungen von Befragungsdaten, des Einsatzes von Technologien wie Bluetootherefassung oder Bilderkennung sowie aus dem Ticketverkauf ermittelbar. Es kann daraus jedoch nicht auf Quelle-Zielbeziehungen von Fahrgästen geschlossen werden. In engmaschigen ÖV-Netzen kann sich für eine Quelle-Zielbeziehung bei Fahrplanänderungen eine schnellere Verbindung einstellen. Um netzweite Auswirkungen der Wartezeiten und Verbindungswahlen bei Fahrplanänderungen in Städten berücksichtigen zu können, ist die Verwendung eines Verkehrsmodells notwendig. Mit einem ÖV-Verkehrsmodell liegt ein planerisches Hilfsmittel vor, das den Fahrplan einer Kalenderperiode und Nachfragedaten zwischen Quell- und Zielorten beinhaltet. Mittels einer Umlegungsberechnung, bei der Verbindungen für alle Fahrten ermittelt werden, können Auswirkungen bei Änderungen eines Fahrplans anhand von Kennzahlen wie z.B. mittlere Wartezeit oder Umsteigehäufigkeit festgestellt werden. Prinzipiell könnte für jede theoretisch mögliche Ausprägung eines Fahrplans eine Umlegungsberechnung sowie eine anschließende Gegenüberstellung der Kennzahlen erfolgen und somit der optimale Fahrplan gefunden werden. Eine Programmierung für eine derartige automatisierte Berechnung ist technisch möglich, jedoch wäre dafür ein zu großer Rechenaufwand, der stark von der Netzgröße und der Netzverknüpfung abhängt, nötig. Durch die Verwendung eines Verkehrsmodells sind die Umsteigemengen aller Haltestellen quantitativ bekannt.

Das zentrale Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens, dem ein bestehender Fahrplan zu Grunde liegt, um die Gesamtwartezeit aller Fahrgäste in einem Netz zu optimieren. Abfahrtszeiten von Linien werden dabei so verschoben, dass Wartezeiten für Fahrgäste minimiert und somit die Beförderungszeiten zwischen Start- und Endhaltestellen reduziert werden. Ein weiterer Aspekt dieser Arbeit ist die Implementierung des Algorithmus in ein Fahrplantooll, das nach Definition von Rahmenbedingungen nachfrageabhängig einen bestehenden Fahrplan optimiert. Dabei werden nur Fahrten mit mindestens einem Umstieg berücksichtigt. Direktfahrten werden aufgrund der sich nicht ändernden Beförderungszeiten bei Fahrplanverschiebungen nicht betrachtet. Für die Optimierung des Fahrplanes können alle Linien unabhängig vom Verkehrssystem herangezogen werden. Bei Berücksichtigung der Nachfrage ergeben sich durch zeitliche Verschiebungen immer Gewinner und Verlierer, jedoch überwiegt nach der Fahrplanoptimierung die Anzahl der Fahrgäste mit reduzierter Umsteigewartezeit. Darüber hinaus geht das entwickelte Verfahren auch auf die Verbindungswahl von Fahrgästen bei einem geänderten Fahrplan ein. Ergibt sich aufgrund einer Verschiebung einer Linie eine schnellere Verbindung zwischen einer Quelle-Zielbeziehung, so wird diese in der Optimierung berücksichtigt. Dadurch können sich Auslastungen von Linien ändern. Werden dadurch bei niedrig frequentierten Linien Fahrgäste abgezogen, ist eine Überlegung über eine Vergrößerung des Taktintervalls sinnvoll. Somit ergibt sich mit einer Fahrplanoptimierung die Möglichkeit auch indirekt wirtschaftliche Einsparungen im Bereich Fahrzeug- und Personaleinsatz zu erreichen. Für einzelne Umsteigerrelationen wird eine kurze Wartezeit trotzdem nicht erreichbar sein, aber in der

Gesamtbetrachtung aller Fahrgäste liegt eine minimale Wartezeit in einem betrachteten Netz vor. Um aus Sicht eines Verkehrsbetreibers einen attraktiven ÖV anzubieten, ist eine Linien- und Umlaufoptimierung vor der Durchführung einer Fahrplanoptimierung sinnvoll.

1.3 Aufbau der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit werden zuerst Planungsgrundsätze des ÖV beschrieben. Nachdem die Linien- und Fahrplangestaltung stark von der Nachfrage abhängig sind, werden diese beiden Planungsbereiche detaillierter betrachtet. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Fahrplangestaltung, insbesondere in der Optimierung eines bestehenden Fahrplanes. Anforderungen, Ziele, Wechselwirkungen und Bewertungsmöglichkeiten eines Fahrplanes werden erklärt. Betriebliche Planungen, die stark im Zusammenhang mit der Linienplanung und der Fahrplangestaltung stehen, werden angeführt. Darüber hinaus finden sich Informationen über Bewertungsmöglichkeiten eines Fahrplans. Im Kapitel 3 sind Methoden zur Gestaltung, zur Entwicklung und zur Optimierung eines Fahrplanes angeführt. Dabei werden mehrere Optimierungsansätze mit unterschiedlichen Zielkriterien und Ausgangslagen beschrieben, wobei viele Verfahren besonders gut für Fahrpläne spurgebundener Fahrzeuge geeignet sind. Um ein besseres Grundverständnis für die Komplexität und Auswirkungen eines Fahrplans zu erhalten, erfolgt im Kapitel 4 eine Analyse von Fahrplaneinflüssen, die zum Teil auch anhand von Beispielen bestätigt werden. Die Anzahl von Umsteigemöglichkeiten, eine Verschiebung der Abfahrtszeiten und der Einfluss der Verkehrsnachfrage werden hinsichtlich der Qualität einer Lösung analysiert und die Sensibilität eines Fahrplanes bestimmt. Im Kapitel 5 findet sich die mathematische Formulierung des entwickelten Optimierungsverfahrens. Dazu sind Parameter und Komponenten, wie Linienbündelung, Mindestwendezeiten und Mindestwartezeiten, die Einfluss auf das Ergebnis der Fahrplanoptimierung für ein gesamtes Netz haben, angeführt. Eine mögliche Fahrzeugsparnis, die Berechnung von Kenngrößen, die Optimierungsmöglichkeiten von Linien und der Abbruch des Verfahrens werden formuliert und eine Vergleichsrechnung mit einem bestehenden Verfahren zur periodischen Fahrplanoptimierung für das Dreieck Kiel- Neumünster- Rendsburg sowie ein Demonstrationsbeispiel präsentiert. In einer exemplarischen Anwendung für das ÖV- Netz der Stadt Graz wird für einen gewählten Zeitbereich die Funktionalität des Tools überprüft und das Optimierungspotential aufgezeigt.

2 Grundlagen der ÖV- Gestaltung

Im folgenden Kapitel wird auf Planungsgrundsätze des ÖV eingegangen. Dabei wird die Herangehensweise für die Entwicklung eines hochwertigen ÖV- Systems beschrieben. Der Schwerpunkt liegt im Bereich der Linienplanung und der Fahrplangestaltung, da nur diese nachfrageabhängig geplant werden. Eine besondere Gewichtung und Konzentration hat der Fahrplan, weswegen eine Fahrplanoptimierung Kern dieser Arbeit ist. Deshalb werden die Aufgaben, Anforderungen, Ziele, Wechselwirkungen und Bewertungsmöglichkeiten eines Fahrplanes ausführlich erläutert. Betriebliche Planungen, die stark im Zusammenhang mit der Linienplanung und der Fahrplangestaltung stehen, sind angeführt.

2.1 Planungen im ÖV

Eine erfolgsversprechende Angebotsplanung im ÖV, und somit auch die Fahrplangestaltung, muss sich am Markt orientieren. Das vom Betreiber angebotene Produkt samt seinen Eigenschaften wird durch die Nutzung von Fahrgästen charakterisiert. Angebot und Nachfrage pendeln sich wie bei jedem üblichen Markt auf ein Niveau ein. Für Kunden sind am Produkt des ÖV besonders die Komponenten Pünktlichkeit und Taktfrequenz von hoher Bedeutung. Betriebs- und Bedienungsqualität sind im ÖV aufgrund des Kostendrucks zu verbessern. (Vgl. FGSV, 2001)

Aufgrund begrenzter Zahlungsbereitschaften, sowohl seitens der öffentlichen Hand als auch von Nutzern des ÖV, besteht ein Spannungsfeld zwischen Angebotsattraktivität und Wirtschaftlichkeit. (Vgl. Liebchen, 2006)

Ein gutes Angebot mit einer günstigen Wirtschaftlichkeit findet sich im Berufs-, Schulverkehr und im Freizeitverkehr bei großen Veranstaltungen. Konträr steht hierzu das Angebot in Randzeiten und die Erreichbarkeit mittels ÖV in periphere Gebiete. (Vgl. Kirchhoff u. Tsakarestos, 2007)

Der ÖV ist aufgrund vieler unterschiedlicher Abhängigkeiten, die sich stark gegenseitig beeinflussen, ein komplexes System. Um eine wirtschaftliche Gestaltung des ÖV zu gewähren, bedarf es in den Bereichen der Netz-, Linien-, Haltestellen-, Fahrplangestaltung sowie des Fahrzeug- und Personaleinsatzes einer sorgfältigen gegenseitig abgestimmten Planung. (Vgl. Becker, 2006)

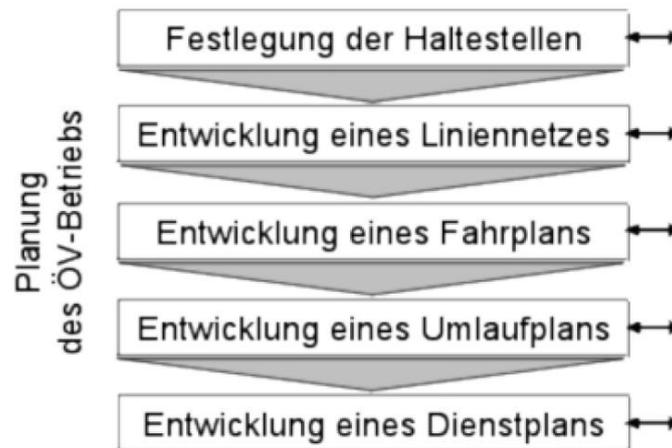


Abb. 1 Wechselbeziehungen im ÖV (Becker, 2006)

Eine hohe Verkehrsqualität und eine günstige Wirtschaftlichkeit kann durch eine Gesamtoptimierung erreicht werden. In der Praxis werden jedoch nur einzelne Teilbereiche, teils mit eher geringen Rückkopplungen, optimiert. Eine Gesamtoptimierung erscheint eher unlösbar. Optimierungsverfahren werden besonders in den Bereichen Linien-, Touren- sowie Einsatzplanung und in der Betriebsdurchführung im ÖV angewendet. Optimierungsmethoden erfordern dabei die Kenntnis praktischer Nebenbedingungen und deren begleitenden Anforderungen. (Vgl. Becker, 2006)

Aufgrund der verschiedenen Teilgebiete in der Planung ist die strategische Planung der oben dargestellten Bereiche übergeordnet. Bei der Ermittlung des Verkehrsbedarfes sind bestehende Infrastrukturanlagen und Verbindungen sowie die Bevölkerungsentwicklung, die Siedlungsstrukturen, usw. nicht zu vernachlässigen. Dabei kann die Arbeit des Planers durch mathematische Optimierungsmethoden und Softwarelösungen unterstützt und beschleunigt werden. Um eine hohe Planungsqualität im ÖV vorzufinden, sind kurze Reisezeiten, viele durchgängige Verbindungen, komfortables Umsteigen, häufige Bedienung und kurze Wege zu Haltestellen die entscheidenden Kriterien. Wirtschaftlichkeit aus Sicht eines Verkehrsbetriebes und Akzeptanz durch Fahrgäste sind wichtige Kriterien zur Beurteilung eines Fahrplanes. Ein kleines Taktintervall, günstige Umsteigebedingungen und Anschlusssicherungen beeinflussen die Akzeptanz stark. (Vgl. Genc, 2003)

Nachdem die Linienplanung und die Fahrplangestaltung für die Verkehrsnachfrage zwischen Quell- und Zielorten von Fahrgästen als Grundlage verwendet werden, wird im folgenden Abschnitt auf diese beiden Themen vertiefend eingegangen. Strategisch kommt der Linienplanung ein höherer Stellenwert zu als der Fahrplangestaltung. Eine Linienplanung oder eine Optimierung der Liniengestaltung kann Infrastrukturmaßnahmen wie beispielsweise Haltestellenverlegungen erfordern. Benachteiligungen für Fahrgäste können entstehen, wenn bei einer Neugestaltung Haltestellen nicht mehr angefahren werden oder die Anzahl erforderlicher Umstiege zwischen einer Quelle-Ziel-Beziehung zunimmt. In städtischen Bereichen bringt das Aufsuchen einer neuen

Ersatzhaltestelle aufgrund der höheren Haltestellendichte einen deutlich kleineren Nachteil mit sich als in ländlichen Regionen, in denen üblicherweise größere Haltestellenentfernungen vorliegen.

2.2 Linienplanung

Liniennetze von Städten sind meist historisch auf Basis von vielen Einzelplanungen ohne Berücksichtigung von Netzwirkungen entstanden. Aufgrund von mehreren Teilbetrachtungen kann dadurch teilweise ein Über- oder Unterangebot vorherrschen und eine Neugestaltung eines Liniennetzes sinnvoll sein. Mittels einer Liniennetzneugestaltung kann entweder der Finanzbedarf für den ÖV gesenkt oder das Einsparungspotenzial durch Angebotsausweitungen zur Gewinnung neuer Fahrgäste genutzt werden.

2.2.1 Grundlagen

Die Linienplanung ist eine strategische Aufgabe, besonders bei spurgebundenen Fahrzeugen, mit einer bedeutsamen nachhaltigen Wirkung. In der Linienplanung wird der Verlauf von Linienrouten auf Basis von festgelegten Taktintervallen ermittelt. Unterschiedliche Zielkriterien können bei der Linienplanung verfolgt werden: Minimierung der Kosten des Linienplans, Minimierung von Fahrzeiten, Minimierung der Umsteigehäufigkeit oder Steigerung des Modal-Split. (Vgl. Borndörfer u. Neumann, 2011)

Als Eingangsdaten in der Liniengestaltung werden Haltestellen, potentielle Endhaltestellen, Fahrzeitangaben befahrbarer und zeit kürzester Streckenabschnitte, eine Nachfragematrix sowie einsetzbare Fahrzeuge mit Kapazitätsangabe benötigt. Individuell können noch Fahrzeugkosten, Haltestellenfolgen, Takte oder vorgegebene Linien berücksichtigt werden. In der Netzbildung von Linien erfolgt prinzipiell eine Unterscheidung in mehrere Verfahren. Diese sind im Folgenden angeführt, wobei die Ziele der Methode in Klammern angeführt sind: Intuitivverfahren (manuelle Linienfestlegung), Reduktionsverfahren (monetäre Bewertung von Strecken) sowie Progressivverfahren, Verkehrsstromverfahren und Fahrtensummenverfahren (Minimierung der Fahrzeit oder Maximierung der Direktfahrer). (Vgl. VDV, 1992)

Bei einer nachfrageorientierten Liniennetzoptimierung wird auf vorhandene Fahrgastströme der Ist-Situation, ohne Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Angebot und Nachfrage, aufgebaut. Linienoptimierungen eignen sich grundsätzlich für alle Verkehrssysteme des ÖV. Eine Anwendung für das Verkehrssystem Bus ist ohne wesentliche bauliche Eingriffe im Gegensatz zu spurgebundenen Fahrzeugen verbunden. (Vgl. Marauli, 2011)

2.2.2 Optimierungsmethoden der Linienplanung

Nachtigall und Jerosch (2008) verwenden als Basis einer Linienoptimierung die mengenbezogenen Fahrgastströme der Ist-Situation. Dabei werden Verbindungen, die einen definierten Umwegfaktor nicht überschreiten, zwischen allen definierten potentiellen Endhaltestellen anhand einer Verbindungsqualität von Wegen zwischen Quelle-Ziel-Beziehungen bewertet. Der Umwegfaktor gibt das zulässige zeitliche Überschreitungsmaß im Vergleich zur minimalen Beförderungszeit einer Quelle-Ziel-Beziehung an. Die Verbindungsqualität ist ein Maß für die Güte der Beförderungszeit einer Route im Vergleich zur zeitkürzesten Verbindung einer Quelle-Ziel-Beziehung und sinkt mit zunehmender Beförderungszeit der Route. Jeder Umstieg kann dabei mit einem Strafparameter versehen werden. Somit liegen für jeden Teilweg (z.B. zwischen zwei Haltestellen oder ein Linienast) die Verbindungsqualitäten aller darüber liegenden Routen vor. Das Produkt einer Routenverbindungsqualität mit der Personenanzahl der Routenbelastung der Quelle-Ziel-Beziehung sind die Eingangsgrößen der Optimierung. Die aufsummierten Minuten aus den Verbindungsqualitäten der Routenelemente werden dann so maximiert, dass Fahrgästen über die am besten bewerteten Routen im Liniennetzplan verkehren. Zusätzlich werden Kapazitätsgrenzen berücksichtigt, um keine Überlastung an Teilwegen zu erhalten, und Budgetrestriktionen als Nebenbedingungen definiert. Dabei werden nur die Kosten der Fahrplanleistung berücksichtigt. (Vgl. Nachtigall und Jerosch, 2008).

Das Modell von Nachtigall und Jerosch wird von Müller, Opitz und Rittner (2011) um folgende Rahmenbedingungen, die eine realitätsnähere Linienfindung ermöglicht, erweitert:

- Um nicht zu viele Linienäste zu erhalten, wird eine Taktverdichtung bis zu einem bestimmten Auslastungsgrad gegenüber dem Einfügen neuer Linien bevorzugt.
- Mittels Gefäßgrößen können unterschiedliche Kapazitäten von Verkehrssystemen und streckenabhängige Restriktionen berücksichtigt werden.
- Um einen direkten Einfluss auf die Linienplanung zu gewähren, ist eine Bevorzugung von einzelnen Linien möglich. (Vgl. Müller, Opitz und Rittner, 2011)

Ähnlich wie bei Nachtigall und Jerosch werden beim Linienvorschlagsverfahren von Nökel (2006) mittels einer Kurzwegsuche potentielle Linien zwischen allen möglichen festgelegten Endhaltestellen bestimmt. Dieser Pool der neu kreierte Linien kann manuell überarbeitet werden, um Vorgaben berücksichtigen zu können. Linien können dabei entfernt, geändert oder hinzugefügt werden. Für die verbleibenden Linienkandidaten ist die Definition eines Taktes erforderlich. Fahrzeitprofile können aus dem Bestand übernommen werden, auf Basis einer manuellen Festlegung oder der Vorgabe einer mittleren Geschwindigkeit errechnet werden. Mittels einer Umlegungsberechnung erhalten bestehende Linien und in weiterer Folge bereits neu ermittelte Linien eine Nachfragebelastung. Durch Subtraktion dieser Nachfrage von der ursprünglichen Quelle-Ziel-Matrix wird die Menge der noch nicht erfassten Fahrten berechnet. Nach einer taktfeinen Umlegungsberechnung erfolgt eine Reihung der noch im Pool befindlichen Linien nach definierten wählbaren Kenngrößen. Linien können nach Fahrgastanzahl, Personenkilometer, Betriebskosten, etc. bewertet werden. Die bestgereichte

oder aber auch eine manuell gewählte Linie kann in das bereits optimierte Liniennetz übernommen werden. Ein definiertes Ziel (Netzabdeckung, Linienlänge, Fahrzeuganzahl, etc.) des gewünschten Liniennetzes begrenzt dieses Verfahren. (Vgl. Nökel, 2006)

Dieses Liniennetzoptimierungsverfahren wird von Walter (2011) adaptiert. Durch die Reduktion der Nachfragematrix der bereits erfassten Fahrten treten in einem Netz kaum Parallelführungen von Linien und somit keine Verdichtung des Taktes im Bereich von stark belasteten Streckenabschnitten auf. Vielmehr steigt das Angebot in der Fläche durch eine Verästelung von Linien und nicht durch die Kapazität auf Linienabschnitten. Wird eine Quelle-Ziel-Beziehung bereits durch ein Angebot abgedeckt, wird es in weiterer Folge nicht mehr berücksichtigt, obwohl prinzipiell eine direktere schnellere Verbindung möglich wäre. Walter verzichtet daher bei der Linienbewertung auf die Nachfragereduktion und verwendet immer die gesamte Nachfragematrix. Bei der Reihung nach Kenngrößen wird nicht unterschieden in bereits ermittelte und bestehende Linien. Zusätzlich können Linien in Bereichen mit zu niedrigem Angebot gebündelt und somit Kapazitäten von Streckenabschnitten gesteigert werden. Als Kenngrößen verwendet Walter definierte Umsteigehäufigkeiten und das Verhältnis zwischen Personen- und Servicekilometer, das die Effizienz einer Linie beschreibt. (Vgl. Walter, 2011)

Der Ansatz von Borndörfer, Neumann und Pfetsch (2008) basiert auf einer Verknüpfung von Fahrgastwegen und den Linienverläufen in einem Netz, die dynamisch im Zuge des Lösungsprozesses generiert werden. Die verwendete Zielfunktion setzt sich aus den Parametern Fahrzeit und Kosten, die entsprechend gewichtet werden können, zusammen. Der Einfluss von Betreiber- und Passagierinteresse kann auf diese Weise in die Linienplanung einfließen. Routenänderungen können während der Berechnung des Systemoptimums aufgrund der Zielfunktion durchaus auftreten. Zusätzlich können Schranken gesetzt werden, um beispielsweise nicht zu große Abweichungen der getätigten Routen der Fahrgäste von den zeit- oder kostenoptimalen Lösungen zu erhalten. (Vgl. Borndörfer, Neumann und Pfetsch, 2008)

Scholl (2005) setzt auf ein Verfahren, bei dem eine Minimierung der Fahrzeit unter Berücksichtigung von allen Umsteigevorgängen in einem Netz erfolgt. Das Umsteigen wird durch eine zeitliche Strafe berücksichtigt. Zur Lösung wird ein Change-and-Go-Graph herangezogen, der ein Verkehrsnetz samt allen möglichen Linienführungen berücksichtigt. Auf den Kanten eines Graphen, die die Umsteigebeziehungen repräsentieren, können Gewichte definiert werden, wodurch Routen mit Umstiegen bestraft werden können. (Vgl. Scholl 2005)

Das Verfahren von Borndörfer und Neumann (2011) kombiniert die beiden letztgenannten Verfahren, um eine realitätsnahe Methode in der Linienfindung zu erhalten. Das Ziel des gemischt-, ganzzahligen Optimierungsmodells zur Linienfindung ist einerseits, dass möglichst geringe Betriebskosten für den Betreiber entstehen und andererseits, dass minimale Fahrzeiten und eine minimale Anzahl an Umsteigevorgängen für den Fahrgast entstehen. Bei der Entwicklung des

Potsdamer Linienplans 2010, der rund 20 Bus- und Straßenbahnlinien beinhaltet, wurde dieses Verfahren eingesetzt. Für die wechselseitige Gewichtung der Zielkriterien Kosten und Fahrzeit erfolgte eine bikriterielle Optimierung, bei der eine untere Schranke für die jeweilige Gewichtung des optimalen Linienplans errechnet wird. Diese ist in folgender Abbildung dargestellt:

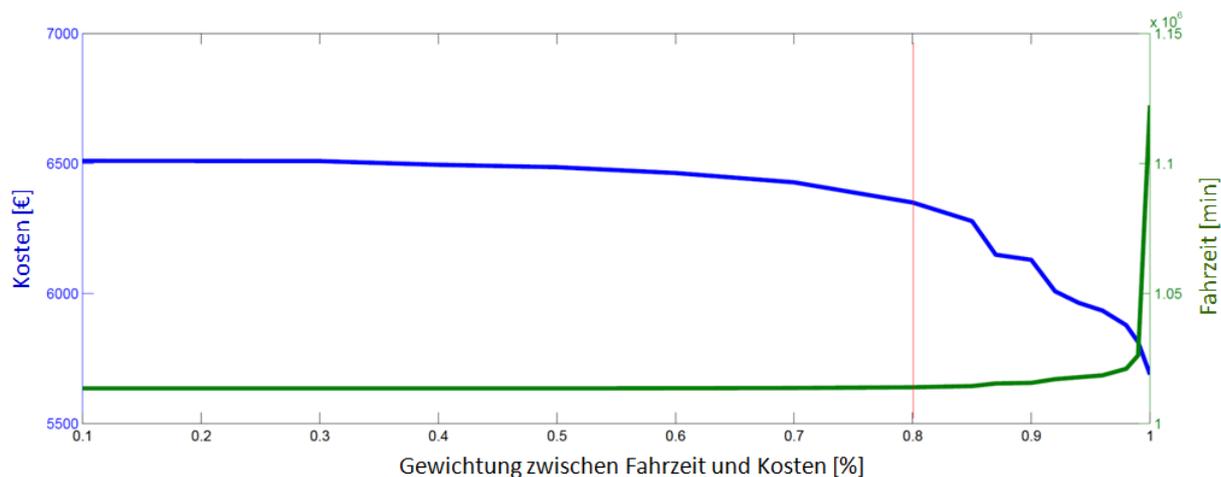


Abb. 2 Bikriterielle Optimierung- Variation der Gewichtungsfaktoren zwischen Fahrzeit und Kosten (0,3 bedeutet 30 % Kosten und 70 % Fahrzeit) für die Zielfunktion, (Vgl. Borndörfer und Neumann, 2011)

Es zeigt sich, dass die Kosten mit zunehmender Gewichtung deutlich früher abnehmen und die Fahrzeit nur geringfügig zunimmt. Bei einer Gewichtung der Kosten von 80 % (rote Linie) weisen beide Kurven einen leichten Knick auf. An dieser Stelle liegt ein verstärkter Anstieg der Fahrzeit pro zusätzlich eingesparten Euro vor. (Vgl. Borndörfer und Neumann, 2011)

In einigen Städten konnte durch eine Neugestaltung des ÖV-Liniennetzes bei gleichbleibenden Kosten die Kundenzufriedenheit gesteigert werden. Ein primäres Ziel des neuen Liniennetzes ist die Erhöhung der Verkehrsnachfrage. Die Stadtwerke Dortmund beispielsweise strukturierten im Jahr 1999 ihr Bussystem völlig neu und erreichten bei einem um 12 % erhöhten Angebot eine Steigerung der Fahrgastzahlen um 40 %. (Vgl. Walter, 2011)

Ein anderes Ziel, welches bei der Neugestaltung eines Netzes verfolgt wird, ist eine Steigerung der Netzlänge bei nahezu unveränderten Fahrzeugbeständen. Das Busnetz 2010 der Dresdner Verkehrsbetriebe steigert die Netzlänge durch Leistungsverlagerung und soll dadurch einen Fahrgastzuwachs, der die bedingt höheren Betriebskosten durch die Mehrerlöse finanziert, erreichen. (Vgl. Dresdner Verkehrsbetriebe AG, 2009)

2.3 Fahrplangestaltung

In der Fahrplangestaltung werden die Abfahrts- und Ankunftszeiten an Haltestellen von Linien festgelegt. Jedoch finden sich je nach Verkehr (Nah- oder Fernverkehr) und Verkehrssystem (z.B. Zug oder Bus) Unterschiede im Fahrplan. Im Nahverkehr entsprechen Abfahrtszeiten meist den Ankunftszeiten. Ausnahmen ergeben sich neben den Anfangs- und Endhaltestellen an Knotenpunkten, an denen größere Wartezeiten planmäßig auftreten, oder in Schwachverkehrszeiten, da hier häufig längere Wartezeiten an wichtigen Umsteigeknoten erfolgen.

2.3.1 Grundlagen

Die Gestaltung eines Fahrplans erfolgt nach der Linienplanung, aber noch vor der Betriebsplanung. Als Basis dient bei Taktverkehren ein Minutenplan. Dieser gibt die Ankunftszeiten von Fahrzeugen linienfein für jede Haltestelle an, unabhängig von der Tageszeit. Beispielsweise könnte ein Ergebnis des Minutenplans sein, dass immer zu den Minuten 05, 25 und 45 Fahrzeuge einer Linie von einer bestimmten Haltestelle abfahren. Eine weitere zu berücksichtigende Komponente bei der Fahrplangestaltung ist eine Einteilung in verschiedenen Tageszeiten. Üblicherweise weisen Fahrpläne drei bis vier Verkehrszeiten (Haupt-, Neben-, Schwach- und teilweise Nachtverkehrszeit) auf. Die Länge der Verkehrszeiten orientiert sich dabei häufig an betriebswirtschaftlichen Aspekten der Personal- und Fahrzeugeinsatzplanung sowie an Vorgaben des Bestellers und ist nur begrenzt in Form von bekannten Tagesganglinien der Nachfrage angepasst. Die Wahl über die Dauer der Verkehrszeit hat einen starken Einfluss auf das Ergebnis der Fahrplangestaltung. Häufig gilt ein Minutenplan der Schwachverkehrszeit als Ausgangslösung für einen verdichteten Fahrplan in der Hauptverkehrszeit. Jedoch kann aufgrund unterschiedlicher Fahrzeiten für jede Verkehrszeit ein gesonderter Minutenplan notwendig sein. (Vgl. Liebchen, 2005)

Grundinformationen eines Fahrplanes sind Fahrzeiten, Fahrgastwechselzeiten und Verlustzeiten. Mittels Zeitanalysen können Beförderungszeiten einschließlich der Lokalisierung und Quantifizierung eventueller Störungen detailliert erfasst werden. Dabei sind tagesabhängige Verkehrsverhältnisse bei Mischverkehren zu berücksichtigen. Dadurch können unterschiedliche Fahrzeitprofile entstehen, die für die entsprechende Verkehrszeit und einen Wochenverlauf Anwendung finden. Fahrzeitvorgaben unterhalb der tatsächlich mittleren gefahrenen Zeiten sind zu vermeiden, um keine fahrplanbedingten Wartezeiten im Betrieb zu erhalten. Haltestellenaufenthalte verursachen rund 15 bis 20 % der Beförderungszeit, die vom Fahrgastwechsel und von verkehrsbedingten Halten abhängt. Ein hoher Besetzungsgrad erhöht die Fahrgastwechselzeiten. (Vgl. FSV, 1999)

Linienfahrpläne haben während der Schulzeit, abgesehen von einzelnen Veranstaltungen, deutlich die größte Bedienungshäufigkeit. Nachdem in den Schulferien die Nachfrage meist geringer ist, wird das Angebot reduziert. (Vgl. VDV, 2001)

2.3.2 Fahrplananforderungen

Die zeitliche Gestaltung eines Fahrplanes muss so konzipiert sein, dass der Fahrplan im realen Betrieb unter Berücksichtigung des Verkehrs- sowie des Fahrgastaufkommens und unter Beachtung von Verlusten an Knotenpunkten prinzipiell eingehalten werden kann. Bei spurgebundenen Linien sind in der Gestaltung des Fahrplanes neben der Vorgabe des Linienplans Eingleisigkeiten der Infrastruktur, Begegnungsmöglichkeiten und Sicherheitsabstände von Fahrzeugen miteinzubeziehen. Eine spezielle Art des Fahrplans stellt der Taktfahrplan dar. Von einem periodischen Fahrplan (Taktfahrplan) spricht man, wenn Abfahrts- und Ankunftszeiten an Haltestellen von einer Linie immer den gleichen zeitlichen Abstand zueinander und denselben Fahrzeitverlauf haben. (Vgl. Schmidt 2006)

Prinzipiell ist im Linienbetrieb ein Taktfahrplan anzustreben. Neben möglichst wenigen Taktsprüngen im Laufe eines Tages ist auch bei der Wahl von Takten auf entsprechende Verträglichkeit von Takten untereinander zu achten. Bei der Festlegung von Takten sind Taktfamilien zur Anschlussplanung zu berücksichtigen. In der Regel basieren Taktfamilien auf einem 10 oder 15-minütigen Grundtakt, wie 10/20/40/60 oder 15/30/60. In Gebieten, in denen sich kein Taktverkehr aufgrund geringer Verkehrsnachfrage und raumstruktureller Bedingungen im Busbetrieb lohnt, sind gezielte Einzelfahrten bedarfsgerecht zu planen. Für Räume, in denen ein Angebot nur für die Fahrtzwecke Arbeit und Ausbildung angeboten wird, sollen je ein bis zwei Fahrmöglichkeiten zum und vom Arbeitsplatz, je ein bis zwei Fahrmöglichkeiten zur und von der Ausbildungsstätte und je eine Fahrmöglichkeit am Vor- und Nachmittag mit entsprechenden Rückfahrtmöglichkeiten für Versorgung und private Erledigungen angeboten werden. (Vgl. VDV, 2001)

Ein Fahrplan sollte prinzipiell gut merkbar sein. Es bleibt jedoch offen, inwieweit die Begreifbarkeit und Einfachheit relevante Größen für die Benützung des ÖV in Zukunft bleiben werden. Mittels Smartphones kann jederzeit und überall auf Internet-Fahrplanauskunftssysteme zugegriffen werden, wodurch die Bedeutsamkeit dieser beiden Aspekte deutlich sinkt.

2.3.3 Ziele eines Fahrplans

Zu den wichtigsten Komponenten im Angebot des ÖV zählen die Reisezeit und die Zuverlässigkeit. Diese beiden Faktoren hängen stark von einem Taktfahrplan ab. Jedoch steht der Begriff der Zuverlässigkeit bei kleinen Taktintervallen jenen der Dichtigkeit gegenüber, da eventuelle Verspätungen kaum noch abgefangen werden können. Kurze Reisezeiten zwischen Haltestellen, keine unnötigen Wartezeiten und möglichst viele Direktfahrten sowie Pünktlichkeit und eine Anschlusssicherung sind wesentliche Ziele für einen hochwertigen Fahrplan. (Vgl. Genc, 2003)

Ungünstige und nicht abgestimmte Fahrpläne führen insbesondere bei kurzen Intervallen zu Pulkbildungen und somit zu gegenseitigen Behinderungen. Zu kurze Ausgleichszeiten an Endhaltestellen bringen eine Übertragung von Verspätungen mit sich. Um das Ziel, Beförderungszeiten für den Fahrgast so kurz als möglich zu halten, ist eine Koordination und

Abstimmung des Fahrplans an Umsteigepunkten notwendig. Auf Streckenabschnitten, die von mehreren Linien bedient werden, ist eine zeitliche Abstimmung der einzelnen Linien für ein dichteres Angebot notwendig. Für eine hohe Beförderungsqualität, ist eine hohe Pünktlichkeit erforderlich. (Vgl. FSV, 1999)

Mit steigender Linienanzahl und zunehmender Anzahl an Linienverknüpfungen in einem Netz nehmen die Anforderungen an einen Fahrplan zu. Die Bedienungsoptimierung bei Linienüberlagerungen, die Umlaufoptimierung und damit zusammenhängende wirtschaftliche Aspekte und vor allem optimale Anschlussbedingungen sind zentrale Interessen bei der Gestaltung eines Fahrplanes. Das Angebot des ÖV ist in allen Gebieten unter Attraktivitätsgesichtspunkten zu bemessen. Unabhängig vom Verkehrsmittel werden folgende raumbezogene Taktintervalle, die einer Qualitätsstufe entsprechen, empfohlen. Die Qualitätsstufe A zeichnet sich durch ein hohes und die Qualitätsstufe E durch ein niedriges Fahrtenangebot aus. (Vgl. VDV, 2001)

		Fahrtenangebot				Qualitätsstufe
		Normalverkehrszeit		Schwachverkehrszeit		
		Taktfamilie 1	Taktfamilie 2	Taktfamilie 1	Taktfamilie 2	
Ober- zentrum	Kernzone	5 / 10	7,5 / 15	20	15 / 30	A
	Gebiete mit hoher Nutzungsdichte	10 / 20	15 / 30	20	30 / 60	B
	Gebiete mit geringer Nutzungsdichte	20	30	60	60	C
Mittel- zentrum	Gebiete mit hoher Nutzungsdichte	20	15 / 30	20 / 60	30 / 60	B
	Gebiete mit geringer Nutzungsdichte	20 / 60	30 / 60	60	60	C
Unter- zentrum	Zentraler Bereich	60	30 / 60	60	60	C
	Übriges Gebiet	60	60	60 / 120	60 / 120	D
Gemeinde		60	60	60 / 120	60 / 120	D
Verkehrs- achsen	Hauptverkehrsachsen	20	30	60	60	C
	Nebenverkehrsachsen	60	60	60 / 120	60 / 120	D
	Sonst. Verkehrsverbindungen	120/ Einzelfahrt	120/ Einzelfahrt	120/ Einzelfahrt	120/ Einzelfahrt	E

Tab. 1 Empfohlenes Fahrtenangebot für Normal- und Schwachverkehrszeit in Abhängigkeit von der räumlichen Bezugsbasis (Vgl. VDV, 2001)

In der Hauptverkehrszeit ist das Fahrplanangebot gegenüber der Normalverkehrszeit bedarfsgerecht zu verdichten. In der Planung eines Fahrplanes ist die Minimierung aller Umsteigezeiten in einem Netz vorrangig. Die Betriebskosten können in Form von Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. (Vgl. VDV, 2001)

2.3.4 Anschlussverbindung

Bei der Gestaltung eines Fahrplanes oder bei einer Fahrplanoptimierung treten im Regelfall zeitliche Auswirkungen nur für die Fahrgäste auf, die zwischen ihrem Quell- und Zielort zumindest einen Umstieg in eine andere Linie absolvieren müssen. Für Direktfahrer haben zeitliche Änderungen keine Auswirkungen auf die gesamte Beförderungszeit. Nur im Falle, dass ein Fahrgast mit einer Direktverbindung zu einer definierten Zeit am Zielort sein muss und die Abfahrtszeiten von Verbindungen einer Linie deutlich später erfolgen, können für einzelne Fahrgäste Nachteile entstehen. Jedoch tritt bei Linien mit kleinen Taktintervallen, wie sie im städtischen Verkehr üblich sind, kein nennenswerter Nachteil ein. Bei größeren Takten (z.B. 60 Minuten) ist der Abfahrtszeitpunkt ein wesentlicher Faktor in der Entscheidung der Verkehrsmittelwahl. In der Gestaltung eines Fahrplanes wird in der Planungsphase in der Praxis bei Linien mit geringer Bedienungshäufigkeit auf die Ankunftszeit an besonderen Zielhaltestellen (beispielsweise Arbeitsstätte oder Schule) Rücksicht genommen. Es können aber niemals alle Bedürfnisse von einzelnen Personen berücksichtigt werden.

Ein Anschluss zwischen zwei Verkehrsmitteln liegt vor, wenn Fahrgäste fahrplanmäßig weniger als fünf Minuten Wartezeit ohne Berücksichtigung der Umsteigewege vorfinden. Bei jedem Umstieg sind eine Ausgleichszeit, um Verspätungen abfedern zu können, und die Gehzeit zu berücksichtigen. Ein gleichzeitiges Eintreffen von Fahrzeugen mehrerer Linien an einem zentralen Verknüpfungspunkt erleichtert ein Umsteigen in alle Richtungen. In der Regel ist die wichtigste Umsteigebeziehung einer Linie meist jene mit der größten Nachfrage. Bei einem größeren Takt als zehn Minuten ist eine fahrplanmäßige Anschlussverbindung erforderlich. Alle anderen Umsteigebeziehungen von und zu einer Linie können nur nachrangig berücksichtigt werden. Bei der Festlegung der Umsteigezeit ist auf die örtlichen und betrieblichen Gegebenheiten zu achten. Bei Taktverkehren können Anschlüsse nur dann regelmäßig eingehalten werden, wenn die Linien den gleichen Takt haben oder einer Taktfamilie angehören. (Vgl. VDV, 2001)

Aus einer Befragung von Fahrgästen von Königshofer (2009), die vom Verkehrssystem Zug auf Stadtbus/Straßenbahn oder umgekehrt umsteigen, geht hervor, dass die Bereitschaft für einen zusätzlichen Umstieg bei Einsparung der Reisezeit durchaus vorhanden ist und dass das Umsteigen von rund 20 % als etwas oder stark störend empfunden wird. Weitere Erkenntnisse sind, dass Alternativrouten nicht immer bekannt sind und dass nicht immer Routen mit der geringsten Umsteigeanzahl gewählt werden. (Vgl. Königshofer 2009)

2.3.5 Wechselwirkung Fahrplan- Betrieb

Zwischen dem Fahrplan und der Anschlusssicherung besteht ein starker Zusammenhang, sodass bei knapp geplanten Umsteigebeziehungen eine hohe Zuverlässigkeit erforderlich ist, um Anschlussverbindungen zu gewähren. Verspätungen pflanzen sich vielfach fort und können sich stark auf den Betrieb auswirken, daher kommt der Fahrplanoptimierung ein besonderer Stellenwert zu.

Dabei soll möglichst vielen Fahrgästen ein angenehmes Umsteigen ohne lange Wartezeiten ermöglicht werden. Anschlüsse sollen unter Einhaltung der Umsteigezeiten auch bei minimalen Fahrplanabweichungen gesichert sein. Je nach Verkehrszeit treten unterschiedliche Anforderungen an die Anschlusssicherung auf. Unter betrieblicher Anschlusssicherung versteht man die Entscheidung, ob ein Anschlussfahrzeug im Falle von Verzögerungen des Vorgängerfahrzeuges die Verspätung abwartet oder nicht. Ein Abwarten hat wiederum nicht nur Auswirkungen auf alle weiteren Anschlussverbindungen entlang dieser Anschlusslinie, sondern bei größerem Ausmaß auch auf die Umlauf- und Dienstplanung. Ein gut geplanter und koordinierter Fahrplan, der auch bei leichten Verspätungen ein Erreichen eines Anschlusses ermöglicht, ist eine günstige Grundlage, um die betriebliche Anschlusssicherung mit einem geringen Aufwand betreiben zu können gegeben. Die Aufgabe der betrieblichen Anschlusssicherung hat das Ziel, die Auswirkungen des zeitlichen Verzuges auf die Fahrgäste und auf das Verkehrssystem zu minimieren. Zur Erreichung dieser Anforderung bedarf es mathematischer Methoden. Optimierungskriterien können dabei die Abweichung zum Sollfahrplan, die Gesamtverspätung, die Anzahl verspäteter oder verpasster Anschlüsse, die minimale Summe von Verspätungen oder die maximalen Verspätungsminuten aller Reisenden sein. Dem Disponenten stehen mit den mathematischen Optimierungsmethoden unterstützende Instrumente für die Entscheidung, ob ein Anschluss gehalten wird, zur Verfügung. Der betrieblichen Anschlusssicherung kommt auch in den Randzeiten bei großen Taktintervallen und besonders bei den letzten angebotenen Fahrten eines Verkehrstages ein hoher Stellenwert zu. Ein Erreichen aller Anschlüsse für Fahrgäste steigert die Angebotsqualität eines Verkehrsbetreibers. (Vgl. Becker 2006)

2.4 Betriebliche Planung

In der betrieblichen Planung (Fahrzeug und Personaleinsatzplanung) gehört die Verwendung von mathematischen Optimierungsmodellen und Softwares zum Alltag von mittelgroßen und großen ÖV-Betreibern. Dies beruht unter anderem auf der Tatsache, dass Fahrplanverbesserungen einerseits Vorteile primär für den Kunden und andererseits einen Nutzen für den Betreiber darstellen. Das Ergebnis von Optimierungen im betrieblichen Bereich sind finanzielle Einsparungen.

Fahrzeugplanung

Im Zuge der Fahrzeugplanung wird das Beförderungsmittel für Linien geplant. Bei spurgebunden Fahrzeugen sind Nebenbedingungen, wie Waggonart, Bautyp, Zuglänge und Waggonanzahl zu berücksichtigen. Ein Fahrzeug muss nicht den ganzen Tag einer Linie zugeordnet sein. In der Fahrzeugplanung gilt es auch zeit- und kilometerabhängige Wartungsarbeiten zu berücksichtigen. Ziel der Fahrzeugplanungsoptimierung ist die Minimierung von Betriebskosten unter den oben genannten Nebenbedingungen. (Vgl. Schmidt, 2006)

Umlaufplanung

Die Umlaufplanung schließt sich der Erstellung eines Fahrplanes an. Ein Umlauf eines Fahrzeuges setzt sich aus einer Einsatzfahrt, einer oder mehreren Fahrgastfahrten sowie Kopplungen und einer

Aussetzfahrt zusammen und stellt dabei die aufeinanderfolgenden Fahrten dar. Die Umlaufplanung hat als Aufgabe, dass für jede planmäßige Fahrt eines Fahrplanes ein Fahrzeug zur Verfügung steht. Ziel der Umlaufplanung ist die Minimierung der Kosten für Umläufe, die im Regelfall mit einer minimalen Anzahl an notwendigen Fahrzeugen erreicht werden. Die Kosten setzen sich aus den Fahrtkosten und den Umsetzkosten (Kosten für Standzeiten und Leerfahrten) zusammen. (Vgl. Becker, 2006)

Eine mathematische Beschreibung zur Ermittlung und Optimierung der minimalen Anzahl an Fahrzeugen findet sich im Kapitel Fahrzeugersparnis (5.4.1.). Ein zentraler Zusammenhang zwischen der Umlaufplanung und einem Fahrplan ergibt sich aus der Abhängigkeit vom Taktintervall. Beispielsweise ergibt sich durch Vergrößerung eines Taktintervalls, wie es beim Übergang zwischen Haupt- und Nebenverkehrszeit von 10 auf 20 Minuten erfolgen kann, eine Änderung der benötigten Fahrzeuganzahl und der auftretenden Wendezeiten an den Endhaltestellen. In folgender Grafik ist auf der linken Seite die Anzahl der erforderlichen Fahrzeuge und auf der rechten Seite die auftretende gesamte Wendezeit jeweils in Abhängigkeit von der Fahrzeit eines Umlaufes für verschiedene Taktintervalle (5, 7.5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 und 60 min) dargestellt.

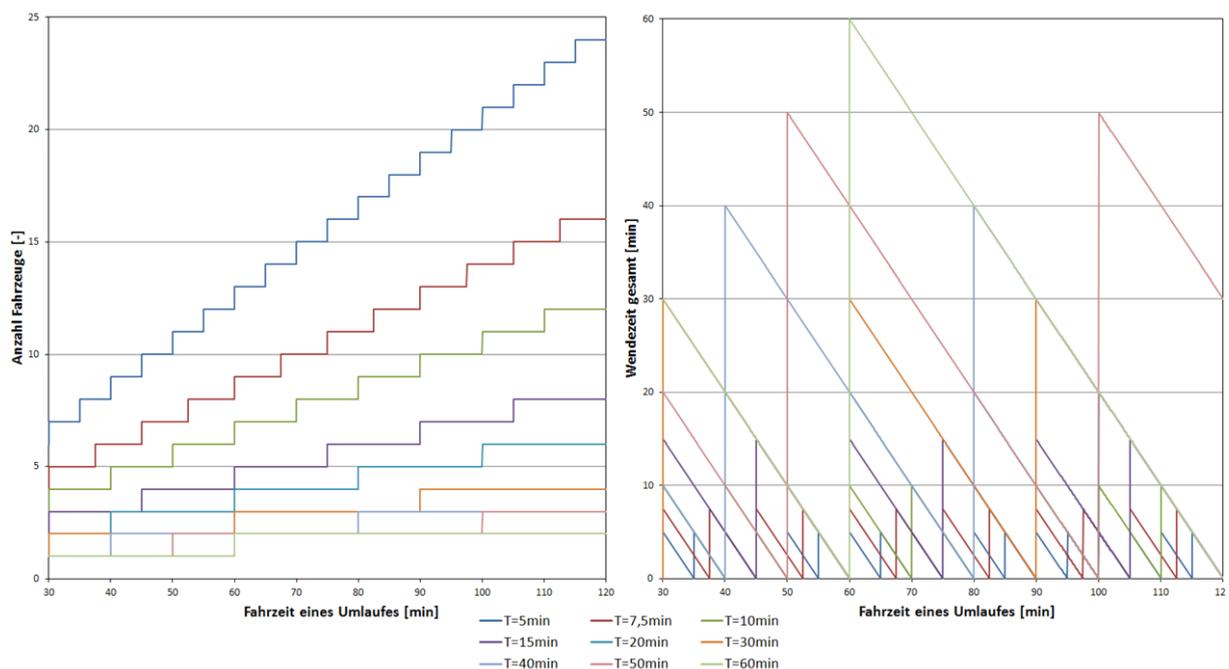


Abb. 3 Zusammenhang Fahrzeit eines Umlaufes, Anzahl Fahrzeuge und Wendezeit gesamt

Aus wirtschaftlichen Gründen ist die Fahrzeuganzahl für den Betreiber so gering als möglich zu halten und die Wendezeiten so zu gestalten, dass Puffer- und Pausenzeiten eingehalten werden können, jedoch längere zusätzliche Stehzeiten von Fahrzeugen vermieden werden.

Personalplanung

Die Personalplanung umfasst die Einteilung von Arbeitszeiten und -orten für sämtliches Personal. Dazu zählen je nach Betriebsart Fahrzeuglenker, Kontrollorgane, Personal für Wartungsarbeiten, Reinigungspersonal, Rangierer und andere. Neben der zu berücksichtigenden Qualifizierung, sind besonders Arbeits- und Pausenzeitregelungen in der Planung zu beachten. Zielkriterien in der Optimierung der Personalplanung sind die Minimierung der Personalkosten oder die Maximierung der Belegschaft. Häufig werden Teile von Planungen simultan durchgeführt, wie beispielsweise die Fahrzeug- und Personaleinsatzplanung oder eine gemeinsame Erstellung der Umlauf- und der Dienstplanung. (Vgl. Schmidt, 2006)

2.5 Kennzahlen zur Bewertung eines Fahrplans

Für die Bewertung von ÖV- Angeboten stehen prinzipiell zahlreiche Möglichkeiten zur Verfügung. Im Folgenden werden Kennzahlen und Methoden, die direkt und indirekt in Zusammenhang mit der Fahrplanqualität und den Anschlussverbindungen stehen, beschrieben. Primär werden verkehrsleistungsbezogene Kenngrößen verwendet. Damit kann die Qualität eines Fahrplanes ausgedrückt werden. Kenngrößen sind dabei immer übergreifend zu betrachten. Aufgrund der Tatsache, dass zwischen den fünf Planungsbereichen Wechselbeziehungen herrschen und Topografie, Raum- und Siedlungsstrukturen nur schwer quantifizierbar sind, ist ein Vergleich von Netzen kritisch zu betrachten. Hinzu kommen noch, dass das System ÖV auch der Daseinsfürsorge unterliegt und somit einen Mindestbedienungsstandard aufweisen soll. Nachdem der ÖV subventioniert wird und eine vollständige Kostendeckung nicht zwingend gegeben ist, sind Vergleiche richtungsweisend, jedoch ist eine Bewertung in Anlehnung an viele lokale Umstände zu betrachten. Darüber hinaus ist auch das Wechselspiel zwischen Angebot und Nachfrage in Abhängigkeit von der Preisgestaltung schwer messbar.

2.5.1 Topologische Kennzahlen

Topologische Kennzahlen beschreiben den geometrischen Zusammenhang eines Netzes. Die Anzahl der Umsteigemöglichkeiten einer Haltestelle ist unter 4.1 angeführt.

Verknüpfungsgrad

Er beschreibt das Verhältnis der vorhandenen Verknüpfung einer Linie zur optimalen Verknüpfung, bei der die Linie mit jeder anderen Linie im Netz genau einmal verknüpft ist.

$$g_l = \frac{n_L}{n_N - 1} * 100 \quad (1)$$

g_l	Verknüpfungsgrad einer Linie [%]
n_N	Linienanzahl im Netz N [-]
n_L	Anzahl der mit der Linie L verknüpften Linien [-]

Netzverknüpfungsgrad

Der Netzverknüpfungsgrad ist das arithmetische Mittel aus dem Verknüpfungsgrad sämtlicher Linien.

$$g_N = \frac{\sum g_l}{n_N} \quad (2)$$

g_N Netzverknüpfungsgrad [%]

Netzbildungsfaktor

Der Netzbildungsfaktor beschreibt die Verknüpfung von Linien in einem Netz. Er ist ein Indikator für den Anteil an Direktfahrten und die Umsteigehäufigkeit.

$$b = \frac{n_L}{n_K} \quad (3)$$

b Netzbildungsfaktor [-]

n_K Gesamtanzahl der Linienverknüpfungen im Netz [-]

(Vgl. Simonis und Wall, 1980)

2.5.2 Bewertung der Umsteigequalität

Kenngrößen zur Bewertung der Umsteigequalität sind unter Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage zu betrachten. Dazu sind Verkehrsplanungsprogramme mit integrierter Umlegungsberechnung, bei der Verbindungen für jede Fahrt ermittelt werden, gut geeignet.

Relativer Anteil Direktverbindungen

Der relative Anteil an Direktverbindungen ergibt sich aus dem Quotienten aller Fahrten ohne Umstieg zu den Gesamtfahrten innerhalb eines Netzes. Bei der Linienplanung ist ein hoher relativer Anteil an Direktverbindungen anzustreben.

Mittlere Umsteigezeit

Die mittlere Umsteigezeit ist die Zeitspanne, die im Mittel zwischen Ankunft eines Fahrzeuges und Abfahrt eines Fahrzeuges einer anderen Linie bei einem Umstieg verstreicht. Sie setzt sich aus der mittleren Wartezeit und der mittleren Übergangsgezeit zusammen. Die Wartezeit hat für den Fahrgast große Bedeutung, da sie bei zu langer Dauer als unangenehm und bei zu kurzer Dauer als Stress empfunden werden kann. Die Umsteigezeit wird von betrieblichen und fahrgastbezogenen Komponenten beeinflusst.

Betriebliche Einflüsse sind:

- die Pünktlichkeit des ankommenden Fahrzeuges,
- die Anordnung und Kapazität der Aus- und Einstiegsmöglichkeiten von Fahrzeugen,
- die Entfernung zwischen den Haltepunkten einer Haltestelle und
- die örtlichen Gegebenheiten an der Umsteigehaltestelle (Breite der Gehfläche, Stiegen, Lift, Straßenquerungen, etc.).

Fahrgastbezogene Einflüsse sind

- die Gehgeschwindigkeit von Fahrgästen zwischen Aus- und Einstiegspunkt,
- die lokalen Ortskenntnisse von Fahrgästen und
- das aktuelle Fahrgastaufkommen.

Die mathematische Beschreibung der mittleren Umsteigezeit einer Umsteigerelation findet sich in dieser Arbeit unter 5.4.3.

Mittlere Umsteigehäufigkeit

Die mittlere Umsteigehäufigkeit gibt die Häufigkeit an, wie oft im Mittel ein Umstieg in einem Netz notwendig ist.

$$\mathbf{u} = \frac{\sum_{\mathbf{Ur} \in \mathbf{H}} \mathbf{F}_{\mathbf{Ur}}^{\mathbf{H}}}{\sum_{\mathbf{ij} \in \mathbf{OD}} \mathbf{F}_{\mathbf{ij}}} \quad (4)$$

\mathbf{u}	mittlere Umsteigehäufigkeit [-]
$\mathbf{F}_{\mathbf{Ur}}^{\mathbf{H}}$	Anzahl aller Umsteiger einer Umsteigerelation [-]
\mathbf{H}	Menge aller Umsteigeverbindungen [-]
$\mathbf{F}_{\mathbf{ij}}$	Anzahl Fahrten einer Quelle-Ziel-Beziehung einer ÖV-Matrix [-]
\mathbf{OD}	Menge aller Quelle-Ziel-Beziehungen einer ÖV-Matrix [-]

(Vgl. Simonis und Wall, 1980)

2.5.3 Zeitaufwand

Der Zeitaufwand einer Fahrt wird in Stufen, die die Angebotsqualität beschreiben, unterteilt und kann mittels folgenden Kenngrößen quantifiziert werden.

Reisezeit

Sie ist jene Zeitdauer, die vom Antritts- bis zum Ankunftszeitpunkt (Tür zu Tür) einer Reise vergeht und sich im ÖV aus der Beförderungszeit, der Zugangs- und der Abgangszeit zusammensetzt.

Beförderungszeit

Sie ist jene Zeit, die vom Einstieg in das erste benutzte Fahrzeug bis zum Verlassen des letzten verwendeten Fahrzeuges einer Reise verstreicht. Sie besteht aus der Fahrzeit im Fahrzeug und der Umsteigezeit.

Zugangszeit

Die Zugangszeit ist die Zeit, die zum Zurücklegen der Strecke vom Startort eines Weges bis zur ersten Einstiegshaltestelle benötigt wird.

Abgangszeit

Die Abgangszeit ist die Zeit, die zum Zurücklegen der Strecke von der letzten Ausstiegshaltestelle bis zum Zielort eines Weges benötigt wird.

Fahrzeit im Fahrzeug

Sie ist die Zeit, in der sich ein Fahrgast im Zuge eines Weges in einem Fahrzeug befindet.

Umsteigezeit

Die Umsteigezeit ist jene Zeit, die zwischen Ankunft eines Fahrzeuges und der Abfahrt in das Anschlussfahrzeug vergeht. Die Umsteigezeit ist die Summe aus der Umsteigewarte- und der Übergangsgezeit und tritt bei Reisen mit mindestens einem Umstieg auf.

Umsteigewartezeit

Sie gibt jene Zeit an, die ein Fahrgast bis zur Abfahrt des Folgefahrzeuges warten muss. Dabei wird eine Fahrt mit einem vorherigen Fahrzeug vorausgesetzt.

Übergangsgezeit

Die Übergangsgezeit ist jene Zeitdauer, die zum Zurücklegen der Distanz zwischen dem Haltepunkt des Ausstieges bis zum Haltepunkt des Wiedereinstieges in ein Fahrzeug einer anderen Linie benötigt wird.

Zur Veranschaulichung sind die zeitlichen Kenngrößen und die Zugehörigkeiten in folgender Grafik dargestellt:



Abb. 4 Zeitbezogene Kenngrößen

Reiseweite

Die Reiseweite gibt die Entfernung vom Anfangs- bis zum Endpunkt einer Reise an.

Beförderungsweite

Sie ist die zurückgelegte Distanz zwischen der Eintrittshaltestelle und der Austrittshaltestelle eines Fahrgastes im ÖV-System.

Luftlinienentfernung

Die Luftlinienentfernung ist die direkte Streckenlänge vom Quell- bis zum Zielort.

Luftliniengeschwindigkeit

Sie ergibt sich aus dem Quotienten der Luftlinienentfernung und der Reisezeit. (Vgl. FGSV, 2009)

2.5.4 Bewertung der zeitlichen Verfügbarkeit

Ein Fahrplan steht eng in Zusammenhang mit der zeitlichen Verfügbarkeit des ÖV- Angebotes. Sie kann mittels der Bedienungshäufigkeit, der Regelmäßigkeit und der Betriebszeit beschrieben werden, denen jeweils Qualitätsklassen des LOS für innerörtlich und zwischenörtlich zugeordnet sind.

Bedienungshäufigkeit

Für eine Bewertung der Angebotsqualität muss diese Kenngröße auf Quelle-Zielbasis angewendet werden, um ein Umsteigen und somit ein Benutzen mehrerer Linien für einen Fahrgast zu charakterisieren. Sie wird durch die Zahl der täglichen Verbindungen oder der Verbindungspaare gemessen.

Regelmäßigkeit

Sie beschreibt die zeitliche Verteilung des Angebotes und die Merkbarkeit der Abfahrtszeiten (Taktverkehr oder nicht).

Betriebszeit

Ist die Dauer, in der Verbindungen angeboten werden. (Vgl. Friedrich und Gerlach, 2002)

2.5.5 Qualitätskriterien des Verkehrsablaufs

Bei der Planung von ÖV- Verbindungen gilt es zu überprüfen, ob die zu erwartende Verkehrsbelastung der gewünschten Qualität entspricht und ob Fahrzeuge eine Strecke mit der definierten mittleren Geschwindigkeit passieren können. Die mittlere Geschwindigkeit hängt von der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten betriebsbedingter Störungen ab. Neben Störungen durch andere Fahrzeuge auf Strecken kann es zu betriebsbedingten Störungen an Haltestellen kommen, die durch die Wahrscheinlichkeit des Nichtauftretens quantifiziert werden können.

$$\rho(X \leq n) = \sum_{i=0}^a \frac{(a * \lambda * t_H)^i}{i!} e^{-a * \lambda * t_H} \quad (5)$$

$\rho(X \leq n)$ Wahrscheinlichkeit, dass im Zeitintervall t_H die Anzahl der ankommenden Fahrzeuge die Anzahl der verfügbaren Haltepositionen nicht überschreitet [-]

n Anzahl der Haltepositionen an der Haltestelle [-]

λ Zuflussintensität [ÖV-Fz/s]

t_H mittlere Haltestellenaufenthaltszeit [min]

$$a = \begin{cases} -0,02t_H - 108\lambda + 5,4 & \text{für } n = 1 \\ -0,02t_H - 72\lambda + 4,3 & \text{für } n > 1 \end{cases}$$

Eine Störung liegt vor, wenn keine freien Haltepositionen für ankommende Fahrzeuge zur Verfügung stehen und Fahrzeuge vor dem planmäßigen Halt warten müssen. Die Beförderungsgeschwindigkeit und die Wahrscheinlichkeit von Störungen an Haltestellen sind in Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs A bis F eingeteilt. (Vgl. FGSV, 2005)

3 Methoden der Fahrplangestaltung

In diesem Kapitel werden Herangehensweisen zur Gestaltung, zur Entwicklung und zur Optimierung eines Fahrplanes beschrieben. Am Ende dieses Kapitels sind Potentiale in der Fahrplanoptimierung angeführt, die in weiterer Folge dieser Arbeit, mittels des entwickelten Optimierungsverfahrens, in der Fahrplanoptimierung berücksichtigt werden.

3.1 Strategien zur Fahrplangestaltung

Besonders in der Vergangenheit erfolgte die Fahrplangestaltung häufig noch manuell. Dabei dienen empirische Fahrpläne, die in weiterer Folge um bekannte Mängel und Potentiale verbessert werden, als Grundlage für den vom Verkehrsplaner neu zu gestaltenden Fahrplan. Mit entsprechenden lokalen Kenntnissen können gute Fahrpläne erreicht werden. Dabei werden primär nur bedeutende Umsteigepunkte berücksichtigt. Jedoch kann nicht sichergestellt werden, dass ein globales Optimum mit den Zielkriterien eines betrachteten Netzes erreicht werden kann. Häufig werden Fahrpläne für eine bestimmte Verkehrszeit ermittelt und in weiterer Folge auf eine größere Zeitspanne ausgedehnt. Die Frage, ob eine Ausdünnung des Fahrplanes für die Hauptverkehrszeit oder eine Verdichtung des Fahrplanes für die Nebenverkehrszeit oder sogar die Verwendung von unabhängigen Fahrplänen für jede Verkehrszeit sinnvoller ist, kann aus der Literatur nicht eindeutig beantwortet werden. Einigkeit in der Literatur ist jedoch darin gegeben, dass die Übergänge zwischen verschiedenen Verkehrszeiten in der Modellierung nicht oder nur schwer berücksichtigt werden können und somit eine vollautomatische Bearbeitung dieser Übergangszeiten nicht möglich ist. Die meisten Verkehrsbetreiber koppeln diese Übergänge entsprechend der Verkehrsnachfrage und der Personaleinsatzplanung. Es treten daher aus Sicht des Fahrgastes in diesen komplexen Übergangsphasen, die je nach Netzstruktur und Netzgröße unterschiedlich lange dauern können und in der Regel bis zur vollständigen Umstellung bis zu einer Stunde dauern, nur suboptimale Lösungen auf. Entscheidend ist auch die Frage, ob Optimierungen nur für ein abgeschlossenes System (Zug im Fernverkehr, U-Bahn etc.) oder für ein übergreifendes System (Zug oder U-Bahn kombiniert mit Straßenbahn und ev. noch mit Bus) vorgenommen werden.

Bei einer günstigen Splittung von einem gesamten Liniennetz in Teilbereiche und einer anschließenden Optimierung der Teilnetze kann ein guter Fahrplan gefunden werden. (Vgl. Genc, 2003)

3.1.1 Zielkriterien

Ziel eines Fahrplanes ist es, Ankunfts- und Abfahrtszeiten für alle bedienten Haltestellen eines Netzes zu bestimmen. Aus wirtschaftlichen Gründen ergibt sich das Ziel einen definierten Taktfahrplan mit einem Minimum an Fahrzeugen zu bedienen. Aus Sicht der Kunden sind kleinstmögliche Beförderungszeiten, die nur von den Wartezeiten abhängig sind, anzustreben. (Vgl. Schmidt 2006)

Der Ansatz zur Maximierung von zeitlichen Sicherheitsabständen in einem Netz ist im spurgebundenen Verkehr notwendig. Ziel dieser Methode ist eine gleichmäßige Verteilung der Ankunftszeiten von Linien, sodass kleine auftretende Verspätungen einer Linie nur geringe Auswirkungen auf andere Linien haben. Es wird eine Lösung gesucht, bei der die Summe der Sicherheitsabstände maximal ist. (Vgl. Genc, 2003)

Jede zeitliche Änderung von Abfahrtszeiten in einem Fahrplan bewirkt eine Veränderung der Gesamtwartzeit eines betrachteten Netzes. Bei einer Veränderung des Fahrplanes wird es immer Gewinner und Verlierer geben. Die Kunst des Planers ist es jedoch, die Anzahl der Gewinner so zu maximieren, dass sich der zeitliche Nachteil für Verlierer in Grenzen hält.

3.1.2 Nebenbedingungen

Je nach Verkehrssystem, Stadtgröße oder Netzgröße und der angebotenen Betriebsform werden unterschiedliche Restriktionen berücksichtigt.

- minimale und maximale Fahrzeiten für alle Fahrten,
- minimale und maximale Fahrzeiten für alle Aufenthalte,
- minimale und maximale Umsteigezeiten für alle Umsteigerelationen,
- minimale und maximale Wendezeiten an allen definierten Endbahnhöfen,
- Anschlüsse an benachbarte Systeme (z.B. U-Bahn, Straßenbahn oder andere Netzausschnitte)
- maximale Umsteigezeiten an Umsteigerelationen niedriger Priorität und
- maximale Haltezeiten an unkritischen Orten. (Vgl. Schmidt 2006)

3.1.3 Rendezvous-Technik

Bei dieser Technik treffen mehrere bis alle Fahrzeuge, die eine Haltestelle in einem definierten Zeitraum anfahren, etwa zum gleichen Zeitpunkt ein und verlassen diese auch wieder zum gleichen Zeitpunkt. In der Zwischenzeit können alle Umsteigevorgänge von Fahrgästen durchgeführt werden. Die Verknüpfung von Linien wird dabei nur auf definierte Knotenpunkte eingeschränkt. Dabei können Engpässe in der vorhandenen Infrastruktur (bei einer großen Anzahl von spurgebundenen Fahrzeugen) und in der Leistungsfähigkeit (im Falle, dass viele Linien über den gleichen Punkt die Haltestelle verlassen) auftreten. Bei Linienbündelungen entsteht das Problem des ungleichmäßig verteilten Angebotes auf gemeinsam geführten Linienbereichen. Daher bedarf es der mengenbezogenen

Kenntnis von Direktfahrern und Umsteigern. Der große Nutzen dieser Methode liegt in einer angebotenen flächendeckenden Erreichbarkeit in Verkehrszeiten mit geringer Nachfrage. Bei diesem System treten für umsteigende Fahrgäste kurze Wartezeiten auf. Im Falle von Verspätungen einzelner Linien reagiert dieses Konzept sensibel. Randbedingungen wie einheitlicher Takt und Symmetriezeit sowie Einhaltung der Kreisgleichung und der Kantengleichung sind nicht zwingend für ein funktionierendes Rendezvous-System erforderlich. Die Rendezvous-Technik findet Anwendung in mittleren bis größeren Städten im Nahverkehr in den Nebenverkehrszeiten. In kleineren Städten (z.B. Dornbirn) ist dieses Prinzip häufig für die gesamte Betriebszeit vorgesehen. Es handelt sich dabei um Radiallinien mit gleichem Takt, die sich in einem zentralen Knoten treffen. (Vgl. FGSV, 2001)

3.1.4 Integraler Taktfahrplan

Der Integrale Taktfahrplan (ITF) hat als Grundprinzip das Rendezvous-System, jedoch werden zusätzliche Randbedingungen definiert und in der Fahrplangestaltung berücksichtigt. Der ITF zeichnet sich durch Regelmäßigkeiten im Angebot aus. Der ITF umfasst die Koordination von getakteten Linien zu einem abgestimmten Gesamtfahrplan, wobei eine maximale Anzahl an Verknüpfungen an ausgewählten Taktknoten zu optimalen Anschlussbedingungen führt. Beim ITF treffen sich mehrere (so viele als möglich) Fahrzeuge von Linien zur Minute x an einer Haltestelle. Das heißt, dass die planmäßige Ankunft dieser Fahrzeuge zeitgleich oder aus betrieblichen Gründen auch leicht versetzt ist. Dadurch ist nach Ankunft des letzten Fahrzeuges ein Umsteigen zwischen allen Linien möglich. Nach einer bestimmten Aufenthaltszeit, in der alle Umsteigevorgänge abgeschlossen sein sollen, fahren alle Fahrzeuge zeitnah oder zeitgleich wieder von der Haltestelle ab.

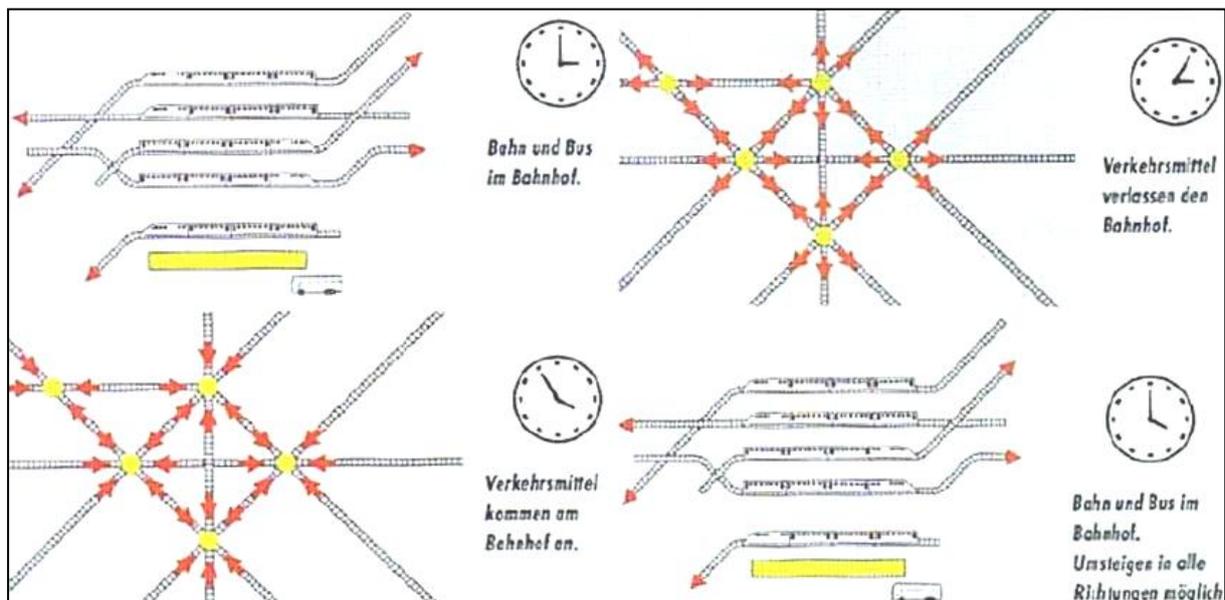


Abb. 5 Ablaufprinzip des ITF (Lichtenegger, 2004)

Folgende Restriktionen müssen für einen idealen ITF vorhanden sein:

- netzweite betreiber- und verkehrssystemunabhängige Verknüpfung von Linien,
- einheitliche Taktzeiten,
- einheitliche Symmetriezeiten,
- Einhaltung der Kantengleichung und
- Einhaltung der Kreisgleichung.

Bei Linien im Taktverkehr treffen sich durch den zeitlich festen Abstand Fahrzeuge von Richtung und Gegenrichtung immer zu den gleichen Zeitpunkten (halbe Taktzeit) an denselben Örtlichkeiten (Knoten oder freie Strecke). Günstige Verknüpfungen von Linien können nur an Taktknoten erfolgen. Diese regelmäßigen zeitlichen Wiederholungen werden Symmetriezeit genannt. Dies bedeutet, dass alle sich an einem Taktknoten treffenden Linien die gleiche Symmetriezeit haben müssen. An einem Taktknoten eintreffende Fahrzeuge müssen vor dem oder genau zum Symmetriezeitpunkt einfahren und nach dem oder genau zum Symmetriezeitpunkt ausfahren. Dabei bedarf es keiner Symmetrie zwischen Abfahrt und Ankunft. (Vgl. FGSV, 2001)

Transportkettengraph

Zur Abbildung von Netzabhängigkeiten eignet sich die Graphentheorie, da Beziehungen in Netzwerken den Grapheneigenschaften entsprechen. Die Knoten eines Graphen bilden die Voraussetzungen und Folgemöglichkeiten einzelner Vorgänge und die Kanten des Graphen entsprechen den einzelnen Tätigkeiten oder Vorgängen. Die Verknüpfungspunkte eines Netzes entsprechen den Knoten und die Transportverbindungen den gerichteten Kanten. In einem Transportkettengraph stellt sich die Frage, wie viele Zyklen sinnvoll sind. Je mehr Zyklen in einem Netz auftreten, desto mehr Haltestellen können als Taktknoten in den ITF eingebunden werden. Jedoch können dadurch auch größere netzbedingte Wartezeiten entstehen. (Vgl. Lichtenegger, 1990)

Mittels der Graphentheorie wird eine Abstraktion von realen Netzen auf die notwendigen Zusammenhänge ermöglicht. Zeitliche Abhängigkeiten zwischen Linien in einem bestimmten Zeitraum können damit gut abgebildet werden. Fahrten zwischen zwei Knoten werden zu Knoten und die Kanten stellen Beziehungen wie Linienhalte, Umsteigebindungen, Wendezeitbedingungen dar. Alle Ab- und Ankunftszeiten werden am Knoten berücksichtigt. Eine Attributierung von Kanten erfolgt mit Zeiten, die durch Restriktionen gegeben sind, wie z.B. Synchronzeiten. (Vgl. Krista, 1996)

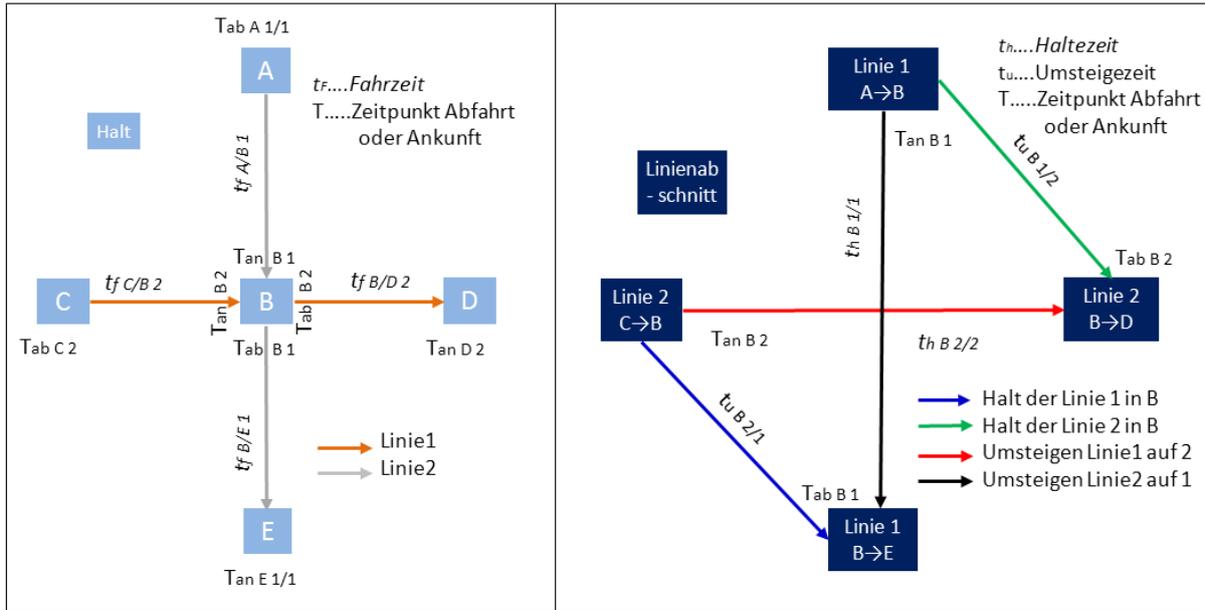


Abb. 6 Abbildung links Liniennetz und Abbildung rechts Transportkettengraph (Vgl. Krista, 1996)

Im Restriktionensystem werden alle Bedingungen abgebildet. Dazu werden Kanten des Transportkettengraphen in jeweils eine Gleichung mit folgender Form transformiert.

$$T_{\text{Ende}} - T_{\text{Beginn}} = t_{\text{Dauer}} \tag{6}$$

Für Kanten des Liniennetzgraphen (Fahrt zwischen Haltestellen) gilt:

$$t_{\text{dauer}} = t_{\text{const}} + t_{\text{var}} \tag{7}$$

- $T_{\text{Beginn}} = t_{L_j}^{\text{AbY}}$ Abfahrtszeit einer Servicefahrt der Linie j an der Haltestelle Y [hh:mm]
- $T_{\text{Ende}} = t_{L_j}^{\text{AnZ}}$ Ankunftszeit einer Servicefahrt der Linie j an der Haltestelle Z=Y+1 [hh:mm]
- $t_{\text{dauer}} = t^{F_{ij}}$ Fahrzeit der Linie zwischen den beiden Knoten [min]
- $t_{\text{const}} = t_{z,n,m,\text{min}}$ konstanter Zeitanteil, z.B. technische Mindestfahrzeit [min]
- $t_{\text{var}} = t_{z,n,m,\text{puf}}$ variabler Zeitanteil, z.B. Pufferzeit [min]

(Vgl. Krista, 1996)

Kantenzzeit

Beim ITF werden Warte- und Umsteigezeiten optimiert. Dazu erfolgen Anpassungen der Fahrzeiten zwischen Knoten um im Bereich der Symmetriezeiten an Knoten anzukommen oder von Knoten abzufahren. Für den gesamten Netzzusammenhang ist die Kantenzzeit zwischen zwei ITF- Knoten relevant. Diese setzt sich näherungsweise wie folgt zusammen:

$$t^{K_{i,j}} = t^{F_{i,j}} + \sim 0,5 * (t_{U_r}^{W_i} + t_{U_r}^{U_{t,i}} + t^{H_i} + t_{U_r}^{W_j} + t_{U_r}^{U_{t,j}} + t^{H_j}) \quad (8)$$

$t^{K_{i,j}}$	Kantenzeit zwischen dem Knoten i und dem Knoten j [min]
$t^{F_{i,j}}$	Fahrzeit zwischen dem Knoten i und dem Knoten j [min]
$t_{U_r}^{W_i}, t_{U_r}^{W_j}$	Wartezeit am Knoten i bzw. am Knoten j [min]
$t_{U_r}^{U_{t,i}}, t_{U_r}^{U_{t,j}}$	Umsteigezeit am Knoten i bzw. am Knoten j [min]
t^{H_i}, t^{H_j}	Haltezeit am Knoten i bzw. am Knoten j [min]

Die Fahrzeit setzt sich dabei aus der reinen Fahrzeit, den Fahrzeitzuschlägen, den Pufferzeiten und den Haltezeiten von Zwischenhalten zusammen. (Vgl. Lichtenegger, 1990)

Kreisgleichung

Neben den zyklischen Wiederholungen von Vorgängen ist das Fahren im Kreis zum zeitlichen Ausgangspunkt die zweite grundlegende Eigenschaft eines ITF. Im Transportkettengraph beschreiben Kanten die Umsteigemöglichkeiten in einem getakteten Knotenpunkt und Knoten die Strecken zwischen zwei Knotenpunkten. Netzweite Wirkungen und Effekte können mittels der Kreisgleichung berücksichtigt werden. Um kleine Pufferzeiten und einen effizienten Fahrzeugeinsatz zu erhalten, sind die netzabhängigen Nebenbedingungen zu berücksichtigen. Dabei muss die Summe aller Kantenzeiten beliebiger Rundfahrten (Kreise in der Graphentheorie) dem Gleichen oder dem Vielfachen der Taktzeit entsprechen:

$$\sum_{i=1}^{n_K} t^{K_{i,j}} = m * T \quad (9)$$

n_K	Anzahl der Kanten entlang eines Kreises [-]
T	Taktintervall des ITF [min]
m	Natürliche Zahl [-]

Bei gleichzeitigem Erfüllen der Kanten- und Kreisgleichung treten in der Gestaltung des Fahrplans Einschränkungen ein, die jedoch auch Auswirkungen auf die Linienführung haben. Bei vorhandenen Netzen und Erfüllen der Gleichungen ist die Fahrzeuggeschwindigkeit die steuerbare Größe. Zur Erfüllung des ITF sind Verkürzungen oder Verlängerungen der Kantenzeit erforderlich. Durch Einführung einer Unbekannten, die die zeitlichen Änderungen beschreibt, ändert sich die Kreisgleichung wie folgt:

$$\sum_{i=1}^{n_K} (t_{\text{vorh}}^{K_{i,j}} - \Delta t^{K_{i,j}}) = \mathbf{m} * \mathbf{T} \quad (10)$$

$t_{\text{vorh}}^{K_{i,j}}$ vorhandene Kantenzeit zwischen dem Knoten i und dem Knoten j [min]

$\Delta t^{K_{i,j}}$ erforderliche Fahrzeitänderung zwischen dem Knoten i und dem Knoten j [min]

Die Einhaltung der Kreisgleichung an jedem Knotenpunkt ist die Grundvoraussetzung für einen ITF in einem betrachteten Netz.

Kreuzungs- oder Kantengleichung

Die notwendige Kantenzeit einer Linie zwischen zwei ITF- Knoten berücksichtigt die gegenseitige Abhängigkeit aus Richtung und Gegenrichtung und ist nur unter folgender Bedingung möglich:

$$t^{K_{i,j}} = t_{\text{vorh}}^{K_{i,j}} - \Delta t^{K_{i,j}} = 0,5 * \mathbf{m} * \mathbf{T} \quad (11)$$

Die Kantenzeit zwischen zwei benachbarten ITF- Knoten entspricht dem halben oder einem ganzzahligen Vielfachen der halben Taktzeit. Die Kantenzeit berücksichtigt die anteiligen Haltezeiten zwischen den Symmetriezeitpunkten von zwei benachbarten ITF- Knoten und die Fahr- sowie Haltezeiten für Zwischenhalte auf der ITF- Kante. Der Kreuzungspunkt muss nicht zwingend die nächste angefahrene Haltestelle sein. Der Kreuzungspunkt kann durchaus die nächst dahintergelegene oder eine noch weiter dahinterliegende Haltestelle sein. In diesem Falle ergibt sich eine leicht abgewandelte Form der Kreuzungsgleichung:

$$\sum_{i=1}^{n_{\text{Be}}} (t_{\text{vorh}}^{K_{i,j}} - \Delta t^{K_{i,j}}) - 0,5 * \mathbf{m} * \mathbf{T} = \mathbf{0} \quad (12)$$

n_{Be} Anzahl der Kanten von Begegnungsbahnhof zu Begegnungsbahnhof [-]

Die Kantenzeit zwischen zwei Kreuzungspunkten ergibt sich dabei aus der Summe der Einzelkantenzeiten zwischen Haltestellen.

Kreismatrix

Die Gesamtheit aller auftretenden Kreise in einem Transportkettengraph muss folgende erweiterte Kreisgleichung erfüllen:

$$\sum_{i=1}^{n_{\text{Kno}}} (\mathbf{d}_j * \mathbf{t}_{\text{vorh}}^{K_{i,j}}) - \sum_{i=1}^{n_{\text{Kan}}} (\mathbf{d}_j * \Delta \mathbf{t}^{K_{i,j}}) - \mathbf{m} * \mathbf{T} = \mathbf{0} \quad (13)$$

n_{Kno}	Anzahl aller Knoten in einem Transportkettengraph [-]
n_{Kan}	Anzahl aller Kanten in einem Transportkettengraph [-]
$d_j = 1$	im Falle, dass die Kante i oder der Knoten i Teil des Kreises sind [-]
$d_j = 0$	für alle sonstigen Fälle [-]

In der Literatur finden sich mehrere Möglichkeiten zur Lösung des Optimierungsproblems. Dabei wird zwischen Methoden, bei denen eine direkte Bestimmung von Kreismatrizen erfolgt oder bei denen alle Kreise eines Graphen ermittelt werden, unterschieden. (Vgl. Lichtenegger, 1990)

Da die für einen idealen ITF notwendigen mathematischen Randbedingungen nicht immer eingehalten werden können und Systeme nicht beliebig verknüpfbar sind, ergeben sich für einen ITF Einsatzgrenzen. Das Ergebnis eines idealen ITF muss in der Praxis häufig hinsichtlich räumlicher, zeitlicher und betrieblicher Randbedingungen modifiziert werden, der sogenannte modifizierte ITF. Restriktionen eines ITF können aufgrund von vorgegebenen Entfernungen aus der Siedlungsstruktur, wirtschaftlichen Gesichtspunkten oder konzeptionellen Aspekten häufig nicht erfüllt werden. Durch Anpassungen, wie Einfügen oder Entfernen von Verknüpfungspunkten (Haltestellen), Herausnehmen von zu verknüpfenden Linien, Einlegen besonderer Linien oder Fahrten außerhalb des Grundtaktes, Ausbilden von Richtungsanschlüssen, Zulassen verschiedener Takte einer Taktfamilie oder betriebliche Modifikationen bei der Verknüpfung, kann jedoch ein modifizierter ITF angeboten werden. Unter Berücksichtigung von weiteren Maßnahmen (z.B. räumliche und zeitliche Angebotsverbesserungen oder moderne Fahrzeuge) wird der Begriff des ITF im erweiterten Sinne häufig verwendet. Die Anwendung des ITF wäre theoretisch für alle Verkehrssysteme, in allen Bereichen und Netzen möglich. In der Praxis wird er üblicherweise jedoch nur im Eisenbahnwesen angewendet. (Vgl. FGSV, 2001)

3.1.5 Fahrplanabstimmung in Verkehrsverbänden

Fahrpläne mehrerer Verkehrsunternehmen zu einem gut koordinierten regionalen Gesamtfahrplan zusammenzuführen, ist aufgrund der Vielzahl von Verknüpfungspunkten eine komplexe Angelegenheit. Netzweite Auswirkungen bei Modifikationen des Fahrplanes können schwer überschaubar sein und mit Unsicherheiten hinsichtlich der Auswirkungen auf die Anschlussqualität belegt sein. Unternehmen planen Fahrpläne für die von ihnen betriebenen Linien, daher sind Abstimmungen der Betreiber in Verkehrsverbänden unumgänglich, um dem Fahrgast gute Anschlussmöglichkeiten anbieten zu können. (Vgl. Schröder und Schüle, 2008)

Bei der Gesamtbetrachtung des Verkehrs herrscht eine bestimmte Hierarchie. Der Fernverkehr ist grundsätzlich dem Regionalverkehr in der Fahrplangestaltung übergeordnet, da es städteübergreifende Abhängigkeiten bezüglich Anschlussverbindungen an Taktknoten gibt. Verkehren verschiedene Linien in einem einheitlichen Takt oder in einem Vielfachen eines Taktes in einer definierten Verkehrszeit, so tritt eine Regelmäßigkeit der Umsteigezeiten an Haltestellen ein. Treffen sich Linien unterschiedlicher Takte an einem Umsteigeknoten, ist die Situation aus Sicht der Fahrgäste aufgrund unterschiedlich langer Wartezeiten nicht zufriedenstellend. So beträgt die Wartezeit beispielsweise bei einem Umstieg von einer Linie mit einem 10 Minutentakt in eine Linie mit einem 15 Minutentakt einmal 0 und einmal 5 Minuten. In die Gegenrichtung der Umsteigerelation betragen die Wartezeiten 0, 5 oder 10 Minuten. Das Abstimmen von Anschlüssen in Knotenpunkten ist eine komplexe Angelegenheit, besonders bei spurgebundenen Fahrzeugen aufgrund der betrieblichen Nebenbedingungen (Mindestzugfolgezeit, Haltestellenabstand, Vorbeifahrtmöglichkeit, Begegnungsmöglichkeiten, Weichenstellungen, etc.). Gegenseitige Beeinflussungen hinsichtlich fahrplanmäßiger Anschlusssicherung sind aufgrund des Netzzusammenhanges zu berücksichtigen. Mit verschiedenen Optimierungen können im Netz eines Verkehrsbetreibers oder eines Verkehrsverbundes günstige Umsteigesituationen für Fahrgäste bestimmt werden. (Vgl. Lichtenegger, 1990)

Im Eisenbahnwesen ist ein ITF im Fern-, Regional- und Nahverkehr mittlerweile in vielen Ländern Standard. Die Schweizer Bundesbahnen haben dabei die Entwicklung des ITF stark geprägt. Straßenbahn- und Busverkehre in Städten verfügen über Taktverkehre, jedoch sind damit die Anforderungen für einen ITF noch nicht gänzlich erfüllt. Nebenbedingungen wie Koordination von Parallellinien oder Anschlüsse an Verknüpfungspunkten, die nicht zum ITF gehören, sind zu berücksichtigen. Die Verwendung eines ITF ist nicht sinnvoll bei einer kleinen Umsteigehäufigkeit, bei Nichterfüllen der Kreisgleichung oder Takten kleiner als 15 Minuten. (Vgl. FGSV, 2001)

3.2 Ansätze der Fahrplanoptimierung

In der Literatur sind Optimierungsalgorithmen für die Fahrplangestaltung, die verschiedenste Zielkriterien verfolgen, bekannt. In der Praxis finden diese Vorgangsweisen eher selten Anwendung.

Die Optimierungsmethoden der mathematischen Modellierung erzwingen üblicherweise eine Reihe von Idealisierungen um konkrete Probleme lösen zu können. (Vgl. Casazza, 1995)

Das Ergebnis einer optimalen Lösung ist immer situationsbezogen. Bei Änderung eines einzigen Parameters (z.B. Anzahl der Umsteiger, Takt einer Linie, benötigte Übergangszeit, Betrachtungszeitraum) kann sich die Qualität stark verändern, wie auch in Kapitel 4 nachgewiesen wird. Daraus resultiert, dass Modellvereinfachungen und Modellannahmen einen Nachweis zur Rechtfertigung benötigen. Nachdem eine Fahrplanoptimierung prinzipiell eine statische Methode ist, bei der das Ergebnis ein länger gültiger Fahrplan (im Regelfall ein Jahr) ist, sind repräsentative

Mittelwerte (z.B. für die Nachfrage oder die Übergangsgehzeiten) zu verwenden. Zwar kann für eine einzelne Situation das Optimum des Fahrplanes nicht sichergestellt werden, jedoch ist der optimierte Fahrplan, die statistisch ermittelte beste Lösung aller auftretenden Situationen. Folgend werden einige aus der Literatur verwendete Optimierungsansätze, die im Zuge der Arbeit analysiert wurden und aus denen Teilaspekte für das entwickelte Optimierungsverfahren herangezogen wurden, beschrieben. Ein Vergleich verschiedener bekannter Methoden ist aufgrund der Anwendung an unterschiedlichen Netzen, der unterschiedlichen Anzahl an betrachteten Linien, der Güte der Ergebnisse und vor allem aber auch aufgrund der stark steigenden Rechenleistungen nicht aussagekräftig.

3.2.1 Lineare Optimierung

Ein lineares Optimierungsproblem liegt vor, wenn unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen eine lineare Zielfunktion spezifiziert wird. Das System zur Lösung einer linearen Optimierung ist in folgender Abbildung dargestellt:

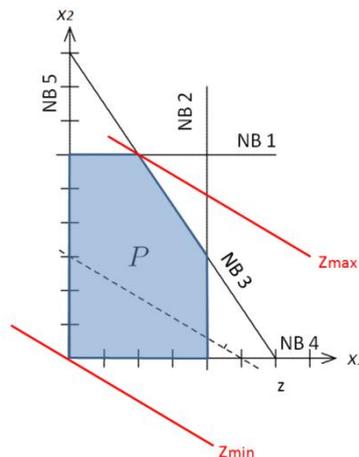


Abb. 7 Grafische lineare Optimierung (Vgl. Hamacher und Klamroth, 2006)

Aus den Nebenbedingungen NB1 bis NB5 ist die Menge der zulässigen Lösungen P des linearen Programmes gegeben. Das ist die Menge, die alle Nebenbedingungen erfüllt. Die Zielfunktion $z = c * x$ ergibt mit beliebigen Werten eine Gerade. Zwei verschiedene Werte von z ergeben parallele Geraden. Der Schnittpunkt einer Geraden z mit P ist eine zulässige Lösung. Für eine Optimierung wird die Gerade, je nachdem ob das Maximum oder das Minimum gesucht wird, so weit wie möglich parallel verschoben, bis sie P gerade noch in einem Punkt berührt. (Vgl. Hamacher und Klamroth, 2006)

Krista (1996) führt den Ansatz von Lichtenegger (1991) weiter und minimiert für spurgebundene Netze die Synchronzeiten mittels eines linearen Optimierungsmodells. Synchronzeiten entstehen beim Umsteigen, wenn technische Mindestumsteigezeiten überschritten werden, um eine Anschlußbildung zu bewirken. Die Zielfunktion wird aus den Anforderungen der Kunden hergeleitet.

Synchronzeiten werden dabei mit der Nachfrage der Umsteiger entsprechend gewichtet, sodass als Zielfunktion eine Minimierung der Netzweiten Summe des Produktes aus Synchronzeiten und der Anzahl der Fahrgäste resultiert. Mittels der Einführung von Beziehungen zwischen beliebigen Linienkanten des Netzgraphs werden verkehrstechnische und betriebliche Bedingungen berücksichtigt. Linienfahrzeiten, Linienhaltezeiten, Zugfolgezeiten, Begegnungsverbote, Mindestwendezeiten, Konflikte in Abzweigstellen, Gleisbelegungen, Taktverdichtung, Linienbündelung und Umsteigebindungen werden als Nebenbedingung berücksichtigt. Zur Verkürzung der Rechenzeit und zur Reduktion des Problems wird ein Entfernen von Verbindungen, deren Belastungswerte unterhalb einer definierten Schranke liegen, vorgeschlagen. Dadurch kann nicht mehr das Gesamtoptimum erreicht werden, jedoch ergibt sich bei einer geeigneten Auswahl der definierten Schranke nur ein kleiner Fehler. (Vgl. Krista, 1996)

3.2.2 Fuzzy- Logik

Bei der Fuzzy Logik erfolgt eine Verarbeitung von unscharfem Wissen mittels linguistischer Variablen. Unscharfe Mengen bestehen aus den Elementen x_i mit den zugehörigen Wahrheitswerten μ_i . Durch die Unschärfe können festgelegte Grenzen überwunden werden, da ein gleitender und kein sprunghafter Übergang erfolgt. Beispielsweise kann die Wartezeit bei einem Umsteigevorgang bei einer binären Logik nur die Ausprägungen „zumutbar“ und „nicht zumutbar“ haben. Mittels der Fuzzy Logik sind Zwischenstufen möglich, wobei die Wartezeit mehr „zumutbar“ als „nicht zumutbar“ sein kann, wie folgende Grafik verdeutlicht.

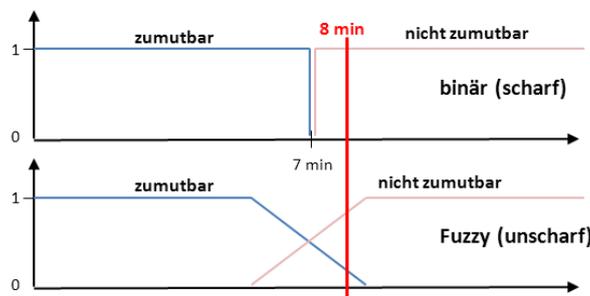


Abb. 8 Vergleich Binär- zu Fuzzy-Logik anhand der Wartezeit eines Fahrgastes (Vgl. Casazza, 1995)

Die Struktur eines Fuzzy-Reglers setzt sich aus mehreren linguistischen Eingangsgrößen zusammen, und einer Fuzzifizierung, einer Inferenz, einer Defuzzifizierung und der Ausgangsvariable, wie auch in folgender Abbildung ersichtlich.

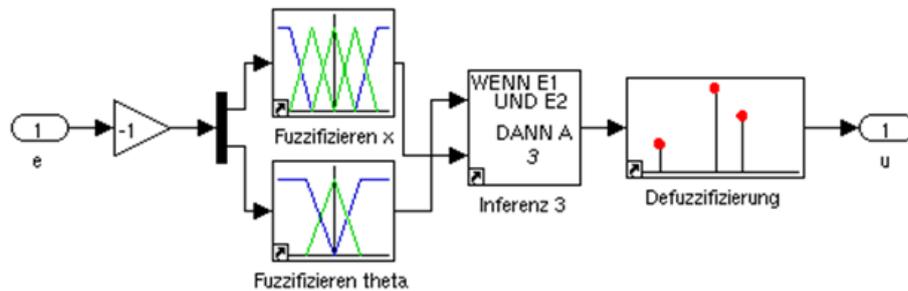


Abb. 9 Struktur der Fuzzy-Logik (Junglas, Juni 2011)

Bei der Fuzzifizierung werden scharfe Größen normiert und anschließend in unscharfe Größen umgewandelt. Dazu ist eine Skalierung der linguistischen Variablen zu definieren. Eine Verknüpfung von unscharfen Größen erfolgt mittels definierter Produktionsregeln im Zuge der Inferenz. Mittels Operatoren können logische Zusammenhänge zwischen unscharfen Mengen formuliert werden (z.B. wenn Bedingung 1 nicht erfüllt wird, dann wird Bedingung 2 herangezogen). Das Ergebnis der Inferenz ist eine unscharfe Größe, die im Zuge der Defuzzifizierung in eine scharfe Ausgangsgröße rücktransformiert wird. Casazza (1995) verwendet in einem ersten Schritt die Ankunftszeit und die Fahrplanabweichungen der Zubringer- und der Abbringerlinie sowie die Halte- und Umsteigezeit als Eingangsgrößen. Daraus resultiert ein operatives Zwischenergebnis, das mit weiteren normierten Größen wie Wartezeit, zumutbare Wartezeit, Haltezeitverlängerung, Umsteigeweg und Umsteigemöglichkeit zu einer Bewertungsgröße für die Umsteigeattraktivität umgerechnet wird. Damit kann eine Aussage über die Anschlussqualität der einzelnen Knoten und des gesamten Netzes gemacht werden. Jede Umsteigebeziehung wird einzeln betrachtet und anschließend mit den anderen Umsteigebeziehungen aufsummiert und auf die Anzahl der Umsteigebeziehungen normiert. Bei der Wahl der linguistischen Terme wird eine fünfteilige Bewertungsskala (sehr gut, gut, befriedigend, genügend und nicht genügend) verwendet. Das Regelwerk wird auf Basis von Mittelwerten aus einem Expertenkreis von 25 Personen gebildet. Im Zuge der Optimierung erfolgt zuerst eine Reihung von Knoten nach einer Knotenbewertung und anschließend werden Fahrpläne von Linien solange gegeneinander verschoben, bis das Optimum der gesamten Umsteigebewertung erreicht ist. Mit diesem heuristischen Verfahren kann eine gute Lösung nahe dem globalen Minimum erreicht werden. (Vgl. Casazza, 1995)

3.2.3 Quadratic Semi-assignment Problem

Bei der nachfrageorientierten Minimierung der Summe aller Wartezeiten liegt ein quadratic semi-assignment problem (QSAP) vor. QSAP sind nichtdeterministisch-polynomielle (NP) schwere Probleme und für größere Problem instanzen nicht exakt zu lösen. Zur Lösungsfindung finden sich einige algorithmische Ansätze in der Literatur. Domschke, Forst und Voß (1992) verwenden zur Lösung eine Tabu-Search-Technik und wenden diese für das Berliner U-Bahnnetz an. Sie berücksichtigen zwölf Linien mit einem jeweiligen Taktintervall von 10 Minuten. (Vgl. Domschke, Forst und Voß, 1995)

Voss (1992) verwendet zur Lösung des QSAP einen graphentheoretischen Ansatz. Durch die Formulierungsvielfalt von Graphen können Netzwerkprobleme effizient gelöst werden. Dabei wird ein gerichteter Graph erstellt. Die Ecken des Graphen stellen möglichen Verschiebungen $s_{i,j}$ dar. Durch eine Definition von Nebenbedingungen können Eckpunkte und Kanten nicht mehr Teil einer Lösung sein und werden somit nicht weiter berücksichtigt. Folgender Graph stellt 4 Linien mit je 3 zulässigen Verschiebungen dar. Die dicken Linien stellen eine zulässige Lösung und somit den Fahrplan, der alle Nebenbedingungen berücksichtigt, dar.

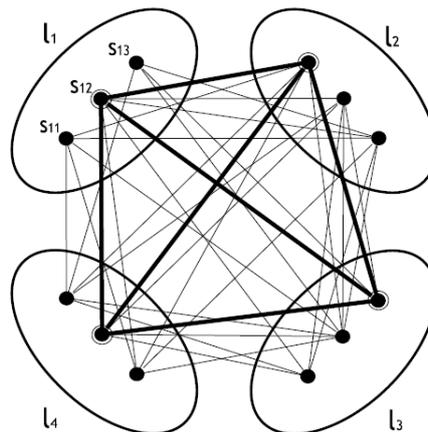


Abb. 10 Graph mit zulässigen Lösungen aus Nebenbedingungen von 4 Linien mit je 3 Verschiebungen (Schröder und Schüle, 2008)

Das Optimierungsproblem kann damit mit auf gut untersuchte mathematisch bekannten Strukturen abgebildet werden. (Vgl. Voss, 1992)

3.2.4 Periodic Event Scheduling Problem

Für die Taktfahrplanoptimierung wird ein mathematisches Modell, das Periodic Event Scheduling Problem (PESP), entwickelt. Es löst mathematische Optimierungen von sich wiederkehrenden Ereignissen. Dazu wird ein Modell mit den periodischen Ereignissen und deren zeitlichen Einschränkungen gebildet. Es liegt somit ein NP-vollständiges Problem vor, das mittels eines genetischen Algorithmus, basierend auf der Graphentheorie, gelöst wird. (Vgl. Serafini u. Ukovich, 1989).

Das PESP-Verfahren wird unter anderem im Flugverkehr bei regelmäßigen Abflugzeiten von Linienflügen zur Minimierung der erforderlichen Flugzeuganzahl verwendet. (Vgl. Gertsbakh u. Serafini, 1991)

Es findet sich auch für die Versatzzeitoptimierung bei festzeitgesteuerten Lichtsignalanlagen oder für Personal- und Fahrzeugeinsatzplanungen. Das PESP kann als gemischt ganzzahliges lineares Programm (MIP) oder als gerichteter Graph verstanden werden und ist geeignet zur Erstellung von zeitlich wiederholenden (periodischen) Ereignissen. Bei der linearen Zielfunktion werden alle zeitlichen Einflüsse (Fahr-, Halte- und Wendebögen) mit einem zur Passagieranzahl proportionalen Strafgewicht versehen. (Vgl. Schmidt 2006)

Die Zielfunktion und die Nebenbedingungen in Form von Gleichungen und Ungleichungen setzen eine Linearität voraus. In einem Liniennetz sind Abschnitte zwischen Knoten sogenannte Kanten und definieren gemeinsam einen Digraphen. Ein Knoten verfügt über die Information des Taktintervalls und eine Kante $a(i, j)$ hat eine untere und eine obere Zeitbegrenzung sowie ein Gewicht w_a , das jede über das Mindestmaß überschreitende Wartezeit bestraft.

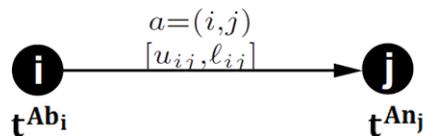


Abb. 11 Kante mit Ereignissen (Vgl. Borndörfer, Liebchen und Pfetsch, 2006)

Jede Kante hat eine untere Schranke l_{ij} (Mindestfahrzeit) und eine obere Schranke u_{ij} (Maximalfahrzeit). Das NP-schwere Problem soll mit folgender Zielfunktion bestimmen, ob ein Taktfahrplan aus einer Menge definierter Restriktion vorhanden ist. Mit der Zielfunktion kann je nach Gewichtung die Summe der Umsteigezeiten oder die Anzahl der Züge minimiert werden.

$$\min \sum_{a \in A} w_a * (t_{L_j}^{Abz} - t_{L_k}^{Anz} + p_a * T_L) \quad (14)$$

$t_{L_j}^{AbY}$	Abfahrtszeit einer Servicefahrt der Linie j an der Haltestelle Y [hh:mm]
$t_{L_j}^{AnZ}$	Ankunftszeit einer Servicefahrt der Linie j an der Haltestelle Z=Y+1 [hh:mm]
T_L	Taktintervall einer Linie [min]
p_a	beliebige ganzzahlige Variable (Periodenoffset) [-]
w_a	Strafgewicht [-]
A	Menge der gerichteten Kanten [-]

Dabei sind folgende Nebenbedingungen zu berücksichtigen:

$$l_{ij} \leq t_{L_j}^{Abz} - t_{L_k}^{Anz} + p_a * T_L \leq u_{ij}$$

$$p_a \in \mathbf{Z}$$

l_{ij} Untere Schranke der Fahrzeit [min]

u_{ij} Obere Schranke der Fahrzeit [min]

Mit den Restriktionen können verschiedenste betriebliche Komponenten berücksichtigt werden: Fahrzeiten, Aufenthaltszeiten in einer Haltestelle, Umsteigevorgänge inkl. Übergangszeiten, Fahrzeugfolgen, Mindestzugfolgezeiten, Mindestwendezeiten an Endhaltestellen, Begegnungsverbote oder Überholverbote. Die Zielfunktion sucht konstante Faktoren, die eine Bestrafung von nicht optimalen und unerwünschten Zuständen mittels Summenbildung und Multiplikation der ganzzahligen Variablen herbeiführt. Überschreitungen der unteren Schranke der Kanten werden mit verschiedenen großen Straffaktoren versehen. Zum Lösen der PESP Instanzen ist eine Überführung Knotenvariablen in Bogenvariablen vorteilhaft. Dabei wird für jeden Bogen die Übergangsdauer zwischen zwei angrenzenden Kanten an einem Knoten berücksichtigt. Für das Umrechnen der Übergangsdauern in das Taktintervall wird die künstliche Variable p_a herangezogen.

$$\min \sum_{a \in A} w_a * (t_{U_r}^{\ddot{U}} + p_a * T_L) \quad (15)$$

$t_{U_r}^{\ddot{U}}$ Übergangszeit einer Umsteigerelation [min]

Dabei sind folgende Nebenbedingungen zu berücksichtigen:

$$l_{ij} \leq t_{U_r}^{\ddot{U}} + p_a * T_L \leq u_{ij}$$

$$p_a \in \mathbf{Z}$$

Zusätzlich muss noch die Kreisbedingung eingehalten werden, um die Einhaltung der Periodizität sicherzustellen:

$$\sum_{a \in C} \gamma_{C,a} * t_{U_r}^{\ddot{U}} = k_C * T_L \quad (16)$$

$\gamma_{C,a}$ Inzidenzfaktor des Kreises mit den Ausprägungen -1 oder 1 [-]

k_C Kreisparameter [-]

C Gesamtheit der Kreise [-]

Der Inzidenzfaktor ist +1, wenn eine Kante in Vorwärts-, und -1, wenn eine Kante in Rückrichtung des Zeitkreises enthalten ist. Mit der Kreisbedingung wird ein günstiger Umlauf von Fahrzeugen sichergestellt. Mit disjunktiven Bedingungen in der PESP besteht zusätzlich noch die Möglichkeit Linien oder Teillinien zusammenzuschließen. (Vgl. Liebchen, 2006)

3.2.5 Mehrkriterielle Optimierung

Der Ansatz von Schröder und Schüle (2008) ermöglicht optimale Umsteigemöglichkeiten für einen Gesamtfahrplan in einem Verkehrsverbund. An wichtigen Übergangsknoten erfolgt dadurch eine ideale Abstimmung der Fahrpläne von allen Verkehrsbetreibern, die einen Knoten (mit teilweise unterschiedlichen Verkehrssystemen) bedienen. Die Methode kombiniert planerisches Expertenwissen mit einem interaktiven, mehrkriteriellen mathematischen Optimierungsverfahren, um bestmögliche Lösungen eines Fahrplanes schnell und effektiv zu finden. Vorgaben, wie z.B. die Erhaltung eines Anschlusses oder die Verkürzung der Wartezeit einer Umsteigerelation, sind Nebenbedingungen vom Planer für die Optimierungsalgorithmen. Bei der Wartezeitminimierung steigt das Risiko, Anschlüsse schon bei leichten Verspätungen zu verpassen. Zu lange Wartezeiten werden als unangenehm empfunden. Daher verfolgt dieses Verfahren das Ziel, komfortable Wartezeiten (nicht zu kurz und nicht zu lange) zu erhalten. Dazu können Anschlusstypen je nach Wartezeit verkehrssystem- oder netzknotenabhängig in fünf Klassen eingeteilt werden.



Abb. 12 Wartezeitstrahl mit Wartezeitintervallen (Schröder und Schüle, 2008)

Ein Anschluss Komfort ermöglicht ein angenehmes Umsteigen auch bei leichten Verspätungen. Beim Anschlusstyp Geduld treten spürbare Wartezeiten, die Kunden als unangenehm empfinden, auf. Wird eine Verbindung als Beinahe eingestuft, erfolgt die Abfahrt kurz vor Ankunft der Zubringerfahrt. Risiko bedeutet, dass bei leichten Verspätungen oder bei langsamem Schritttempo ein Anschluss nicht erreicht werden kann. Liegt zum Ankunftszeitpunkt keine Abfahrt innerhalb eines Zeitintervalls vor, spricht man von Kein Anschluss. Ziel ist es, eine große Menge an komfortablen Anschlüssen zu erreichen. Für die Zielfunktion werden Strafpunkte für jeden Anschlusstyp vergeben und die Strafpunktsomme durch Verschiebung der Abfahrtszeiten minimiert. Die entstandene Treppenfunktion muss noch stetig interpoliert werden.

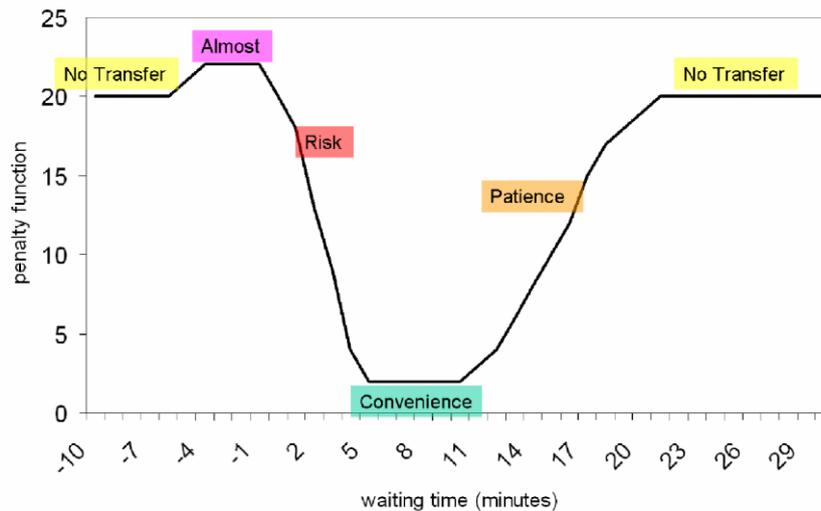


Abb. 13 Beispiel einer geglätteten Strafpunktfunktion (Schröder und Schüle, 2008)

Mit der mehrkriteriellen Optimierung, die mehrere Zielfunktionen simultan optimiert, können Anschlüsse nach Haltestellen, Linienpaaren oder Richtungsparen zu Gruppen zusammengefasst werden. Zusätzlich werden die genannten Vorgaben in der Optimierung als lineare Nebenbedingung berücksichtigt. Nachdem eine exakte Lösung aufgrund der Komplexität nicht möglich ist, wird zur Lösung ein mehrkriterieller Ant Colony Optimization Algorithmus aus der Klasse der Metaheuristik verwendet. Bei einem Quadratischen Assignment Problem, wie es hier vorliegt, liefert diese Form des Algorithmus ein gutes Ergebnis. Somit kann in annehmbarer Zeit eine gute Annäherung an die Paretomenge gefunden werden.

Zielfunktion

Im Zuge der Optimierung erfolgt eine zeitliche Verschiebung (s_i) von Abfahrten. Eine Verschiebung von fünf Minuten bedeutet, dass alle Abfahrtszeiten einer Linie um fünf Minuten verschoben werden. Mittels der mehrkriteriellen Optimierung können simultan mehrere Zielfunktionen verfolgt werden. Der Zielfunktionen liegt hier das QSAP zu Grunde. Dieses weist in der Regel viele lokale Minima auf, wodurch sich die Suche nach der global besten Lösung als schwierig erweist. Treffen sich zwei Linien an einem Knotenpunkt, so entstehen dort Übergänge. Für jede Verschiebung werden die Strafpunkte entsprechend der auftretenden Wartezeiten für den Übergang berücksichtigt. Um einen optimalen Übergang zu finden, ist die Einführung der binären Variable x_i erforderlich:

$x_i = 1$ im Falle, dass die Kante i oder der Knoten i Teil des Kreises sind [-]

$x_i = 0$ für alle sonstigen Fälle [-]

In der ersten Zielfunktion erfolgt eine relative Verbesserung gegenüber dem Ist-Fahrplan.

$$f_1 = \frac{\sum_{c \in C} \sum_{i=1}^{T_{L_i}} \sum_{j=1}^{T_{L_j}} (c_{i,j} * x_i * x_j)}{\sum_{c \in C} (c_0)} \quad (17)$$

x_i, x_j	binäre Variablen für die Linien i und j [-]
T_{L_i}, T_{L_j}	Taktintervalle der Linien i und j [-]
c_0	Strafpunkte eines Überganges der Ist-Situation [-]
$c_{i,j}$	Strafpunkte eines Überganges bei einer zeitlichen Verschiebung der Linie i und der Linie j [-]
C	Menge aller Übergänge

Die zweite Zielfunktion hält lokale Verschlechterungen aus einem neuen Fahrplan so klein als möglich. Dazu werden die maximalen prozentualen Verluste, die an einem Knoten n auftreten, minimiert.

$$f_2 = \max \left(\frac{\sum_{c \in C_n} \sum_{i=1}^{T_i} \sum_{j=1}^{T_j} (c_{i,j} * x_i * x_j)}{\sum_{c \in C_n} (c_0)} \right) \quad (18)$$

C_n	Menge aller Übergänge eines Netzknotens mit Verschlechterung
-------	--

Mittels der dritten Zielfunktion werden zu starke Änderungen eines Fahrplanes gegenüber dem Ist-Fahrplan abgefedert. Dies erfolgt in einer Form von Varianzen der zeitlichen Verschiebungen. Dabei wird darauf geachtet, dass für jeden Verkehrsbetreiber nicht zu große Änderungen eintreten. Bei dieser Zielfunktion werden die quadratischen Abweichungen der einzelnen Verschiebungen zu der Durchschnittlichen eines Unternehmens aufsummiert.

$$f_3 = \sum_{lc \in LC} \sum_{l \in lc} (FP(l) - \emptyset(FP, lc))^2 \quad (19)$$

$FP(l)$	Fahrplan bei einer Verschiebung s_i einer Linie l [-]
$\emptyset(FP, lc)$	Mittelwert aller Verschiebungen aller Linien lc eines Verkehrsbetreibers [-]
LC	Menge aller Verkehrsbetreiber [-]

Die Paretomenge aller drei Zielfunktionen wird in der Optimierung approximiert. Alle Punkte aus dem Lösungsraum, bei dem eine Verbesserung eines Zieles zu einer Verschlechterung eines anderen Zieles führen würde, sind dabei enthalten. Aus der Paretomenge kann der Verkehrsplaner entscheiden, welchen Wert er auf die einzelnen Kriterien legt.

Nebenbedingungen

Durch eine zeitliche Fixierung oder eine Einschränkung der möglichen Abfahrtszeiten einer Linie reduziert sich für diese Linie die Anzahl der Verschiebungen, die die möglichen Verschiebungen der Abfahrtszeiten angeben. Wird für eine bestimmte Verbindung ein gewünschter Anschlusstyp angestrebt, ergibt sich folgende Nebenbedingung:

$$s_i - s_j \leq d_{ij} \quad \text{bzw.} \quad s_i - s_j \geq d'_{ij}$$

s_i, s_j zeitliche Verschiebung der Linie i und der Linie j [min]

d_{ij}, d'_{ij} Disjunktionen von Differenz- Nebenbedingungen

Durch zu viele und zu starke Nebenbedingungen ist es möglich, dass es keine Lösung mehr für das Problem gibt. Zur Lösung kann ein Ant Colony Optimization verwendet werden. Ant Colony Optimization imitieren Ameisenkolonien um gute Lösungen auf einem Graphen zu finden. Virtuelle Ameisen orientieren sich dabei an den Pheromonspuren von früheren sich auf der Suche nach Futter befindlichen Ameisen. Bei guten Lösungen findet sich aufgrund der kürzer benötigten und somit stärker frequentierten Lösungen eine größere Menge an Pheromonspuren, die die nachfolgenden Ameisen in der Lösungssuche beeinflussen. Zusätzlich wird die approximierte Paretomenge in räumliche Cluster eingeteilt, wobei für jeden Cluster eine separate Ameisenkolonie mit eigenen Pheromonspuren zuständig ist. Änderungen der Nebenbedingungen im Zuge der interaktiven Optimierung bewirken eine Veränderung des Graphen. Bei kleinen Änderungen können Informationen aus den davor ermittelten Optimierungsprozessen übernommen werden, wie beispielsweise bereits gefundene und immer noch gültige Lösungen. Mit diesem kombinierten Ansatz kann das Wissen des Verkehrsplaners mit einer mathematischen Optimierungstechnik verknüpft werden, um in akzeptabler Zeit eine Lösung für die Fahrplangestaltung zu erhalten. (Vgl. Schröder und Schüle 2008)

Eine Erweiterung dieses Verfahrens ist die Berücksichtigung der Umlaufplanung. Bei der Verschiebung der Abfahrtszeiten soll neben guten Anschlüssen auch ein Minimum an Fahrzeugen für einen Umlauf notwendig sein, da es im schlimmsten Falle zu einem erhöhten Fahrzeugbedarf kommen kann. (Vgl. Schüle, Schröder und Hansen, 2011)

3.2.6 Branch-and-Bound-Verfahren

Der Ansatz von Haller (2011) hat die Fahrplanoptimierung mittels Strafpunktfunktion von Schröder, Schüle (2008) als Grundlage, jedoch erfolgt dabei eine Abänderung der Anschlusstypen und eine Erweiterung, die eine nachfragegerechte Fahrplanoptimierung ermöglicht. Es werden nur die Anschlusstypen Risiko, Komfort, Geduld und Kein Anschluss verwendet. Der Typ Beinahe wird nicht

verwendet, da in den Eingangsdaten der Optimierung solche Anschlüsse nicht enthalten sind. Jedoch sind sie auch nicht erforderlich, da im Zuge der Optimierung Situationen, in denen fahrplanmäßig ein Anschluss knapp nicht erreicht werden kann, berücksichtigt werden. Für jede Kombinationsmöglichkeit von Verkehrssystemen können separate Strafpunktfunktionen definiert werden. Für die Grenzen der Anschlusstypen (Wartezeiten) und für die Strafpunktfunktionen werden die gemittelten subjektiven Einschätzungen von mehreren Fachleuten verwendet. Folgend ein Auszug von den Sprungfunktionen zur Bewertung von Anschlusstypen für zwei unterschiedliche Fälle:

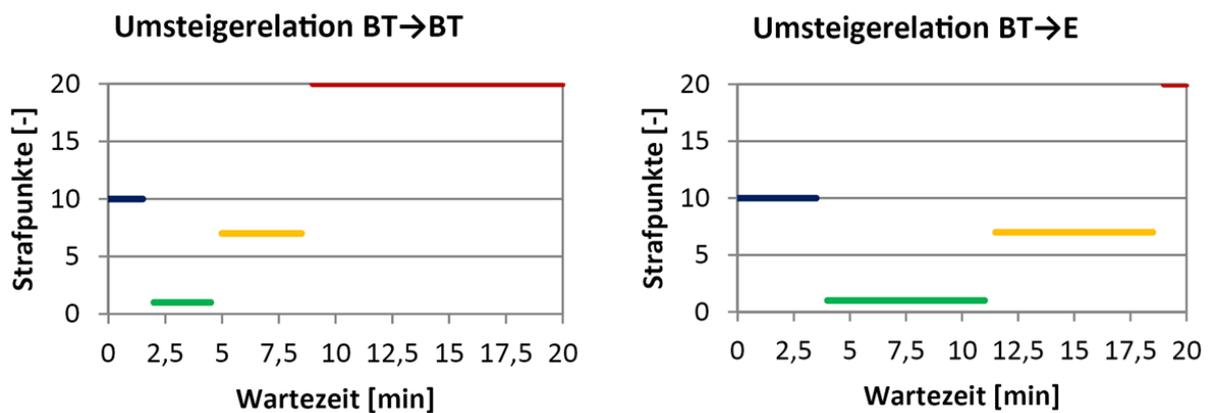


Abb. 14 Strafpunktfunktionen für den Fall von Bus oder Straßenbahn auf Bus oder Straßenbahn (links) und von Bus oder Straßenbahn auf Eisenbahn (Haller, 2011)

Die Strafpunktfunktionen haben zwei weitere Unterschiede zur Methode von Schröder, Schüle (2008). Einerseits ist die Höhe der Strafpunkte nicht identisch und andererseits ist eine Glättung der Strafpunktfunktion für die weitere Optimierung, die auf Basis einer Sprungfunktion erfolgt, nicht erforderlich. Wird eine Anschlussverbindung im Grenzfall um eine Minute verschlechtert oder verbessert, so ändert sich sprunghaft der Anschlusstyp. Zusätzlich können Linien mit teilweise gleichen Linienverläufen zu Linienbündel aggregiert werden. Das Optimierungsverfahren benötigt als Voraussetzung eine Ausgangslösung eines Fahrplanes und ein ÖV- Verkehrsmodell mit entsprechenden Nachfragedaten. Üblicherweise verfügen bestehende ÖV- Verkehrsmodelle über die Daten eines Ist-Fahrplanes eines ÖV- Netzes. Erfolgt die Optimierung auf Basis eines Fahrplanes, der in Verkehrsnetzen auch tatsächlich gefahren wird, können Potentiale aufgezeigt, Verbesserungen transparent und verständlich dargestellt und in weiterer Folge einfach umgesetzt werden. Aufgrund der verschiedenen Verkehrszeiten und des damit verbundenen unterschiedlichen Angebotes ist die Verwendung eines stundenfeinen Verkehrsmodells, jedoch zumindest eines den Verkehrszeiten entsprechenden Verkehrsmodells erforderlich. Die Methode von Schröder, Schüle (2008) berücksichtigt keine Verkehrsnachfrage. Die Qualität eines Anschlusses wird nur anhand der Strafpunktezuweisung gemessen, unabhängig davon ob ein Anschluss von 100 oder nur einer Person wahrgenommen wird. Haller (2011) bewertet eine Umsteigerelation nicht nur mit Strafpunkten, sondern die Anzahl der umsteigenden Personen wird mit den Strafpunkten des Anschlusstyps

multipliziert, sodass auch die Nachfrage Einfluss auf die Optimierung hat. Es ergibt sich somit folgende Zielfunktion:

$$c_{Ne}^{FP_j} = \sum_{Ur \in Ne} c_{Ur} * F_{Ur} \rightarrow \min \quad (20)$$

$c_{Ne}^{FP_j}$	Strafpunktsumme aller Linien eines Netzes für eine Fahrplansituation FP_j [-]
c_{Ur}	Strafpunkte einer Umsteigerelation Ur [-]
F_{Ur}	Anzahl der umsteigenden Fahrgäste einer Umsteigerelation Ur [-]
Ne	Menge aller Umsteigerelation in einem Netz [-]

Die Strafpunkte einer Umsteigerelation ergeben sich aus den entsprechenden Sprungfunktionen der Anschlussstypen. Eine Fahrplansituation FP_j ist ein Element aus der Gesamtheit aller möglichen Fahrpläne ($FP_j \in FP$), die sich aus beliebigem Verschieben der Abfahrtszeiten in Minutenschritten an Start oder Endhaltestellen von Linien ergeben. Eine einzelne Fahrplansituation ist somit gekennzeichnet durch definiertes Verschieben der Abfahrtszeiten von einer Linie oder mehreren Linien. Es ist möglich bestimmte Linien auszuschließen. Für die Größe der Verschiebung ergibt sich folgende Zusatzbedingung:

$$0 \leq s_i < T_i$$

s_i	zeitliche Verschiebung der Linie i
T_i	Taktintervall der Linie i

Für eine schnelle Lösungsfindung und um den Rechenaufwand in Grenzen zu halten, ist eine Zerlegung in Teilschritte möglich. Die Optimierung kann für einzelne oder bestimmte Verkehrssysteme angewendet werden. Beispielsweise könnten in einem ersten Schritt alle Anschlussverbindungen zwischen dem Verkehrssystem Straßenbahn ohne Berücksichtigung der Linien anderer Verkehrssysteme herangezogen werden. Anschlussverbindungen anderer Verkehrssysteme werden dann im Zuge weiterer Durchläufe unter der Fixierung der davor ermittelten Fahrpläne optimiert. Außerdem besteht die Möglichkeit, einzelne Linien für einen Optimierungsdurchlauf auszuschließen. Das Aufsuchen des Minimums der Strafpunktsumme kann durch eine Zerlegung in Teilprobleme zusätzlich beschleunigt werden. Mit größeren zeitlichen Verschiebungen von mehreren Minuten können günstige Bereiche in einem ersten Schritt gefunden werden. Durch schrittweise Verschiebungen um jeweils eine Minute in den günstigen Bereichen können lokale Minima gefunden werden. (Vgl. Haller, 2011)

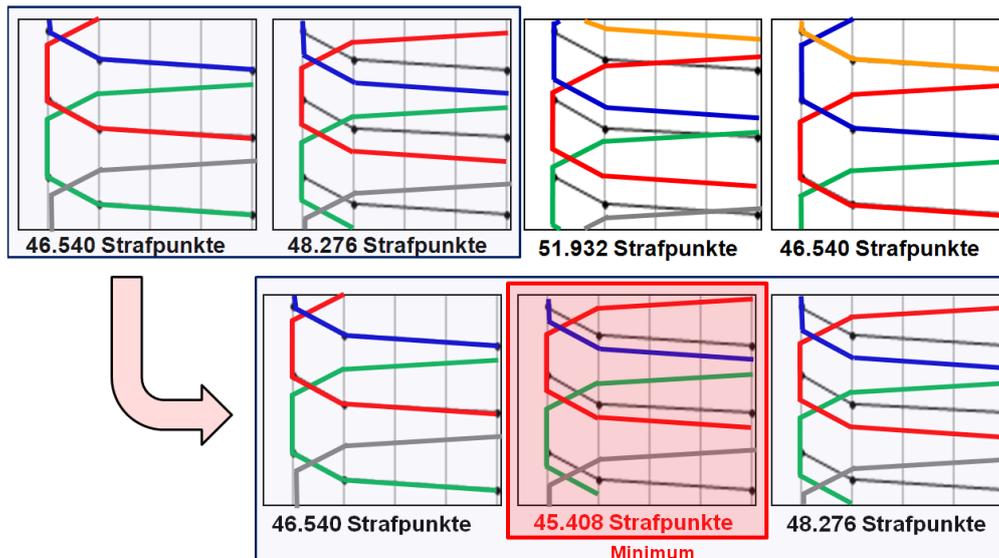


Abb. 15 Exemplarisches Beispiel für die Ermittlung des globalen Minimums der Strafpunktesumme

Die Vergabe über die Höhe der Strafpunkte der Anschlussarten ist ein wesentlicher Einflussfaktor für die Optimierung nach Strafpunkten. Haller (2011) bewertet den Anschlussart Geduld mit 7 Punkten, Schröder/ Schüle (2008) vergeben hingegen 10 Punkte. Auch die Änderung von Punkteverhältnissen zwischen den verschiedenen Anschlussarten kann unterschiedliche globale Minima der Strafpunktesumme ergeben. Je nach der Strafpunktesumme wird sich eine unterschiedliche zeitliche Gestaltung des Fahrplanes einstellen. Zusätzlich steuern die verwendeten oberen und unteren Grenzen der Anschlussarten für jede Strafpunktesumme das Ergebnis des Optimierungsverfahrens. Wird ein Komfortanschluss beispielsweise zwischen zwei und vier Minuten definiert, erfolgt durch die Strafpunkte eine gleiche Bewertung von Anschlüssen mit zwei Minuten und mit vier Minuten. Die Optimierung mit der Zielfunktion der Strafpunktesummenminimierung kann zudem eine Verschlechterung der mittleren Wartezeit in einem betrachteten Netz bewirken. Das passiert dann, wenn sich in der Ausgangslösung viele Anschlüsse des Typs Risiko, die im Zuge der Optimierung zu Anschlussarten der Kategorie Komfort werden und somit deutlich weniger Strafpunkte bei Zunahme der Wartezeiten erhalten, befinden.

3.3 Potentiale in der Fahrplanoptimierung

Es zeigt sich, dass in der Literatur einige Ansätze vorhanden sind und diese auch in der Praxis angewandt wurden. Aspekte wie, nachfrageabhängig, verkehrsbetreiber- und verkehrssystemübergreifend fließen verfahrensabhängig in die Fahrplanoptimierung ein. Andere Kriterien sind dabei, eine Kombination mit der Umlaufplanung oder das Vorhandensein eines Taktfahrplans sowie einer Periodizität als Grundvoraussetzung. Je nach Aufgabenstellung können Methoden zur Erreichung unterschiedlicher Ziele verwendet werden. Besonders viele Ansätze stammen aus dem Eisenbahnwesen, bei denen alle auftretenden betrieblichen Restriktionen berücksichtigt werden. Bei Verwendung eines Ist-Fahrplanes als Startlösung kann von einem betrieblich funktionierendem System jedoch ausgegangen werden. Es ist keine Methode bekannt, die

die Verbindungswahl von Fahrgästen dynamisch in der Fahrplangestaltung berücksichtigt. Bei statischen Optimierungsverfahren werden Routenverlagerungseffekte durch einen neuen Fahrplan nicht berücksichtigt. Fahrplanoptimierungen in einem Liniennetz können zeitliche Verbesserungen auf Alternativrouten zwischen Quelle-Ziel-Beziehungen bewirken. Es ist sogar möglich, dass die Alternativrouten die zeitkürzesten Verbindungen darstellen. Weitere Anforderungen sind das Zusammenzufassen von Linien zu Linienbündel, eine zeitliche Fixierung von Linien, die Vergabe von Mindestwartezeiten an Haltestellen und flexible Wendezeiten. Potential ergibt sich daraus, dass kein Ansatz, der alle genannten Komponenten berücksichtigt und somit für eine netzweite Fahrplanoptimierung mit dem Ziel minimaler Wartezeiten herangezogen werden kann, bekannt ist. Zur Lösungsfindung vieler bekannten Verfahren sind Idealisierungen erforderlich, um das mathematische System zu vereinfachen und lösen zu können. Je mehr Verknüpfungspunkte sich in einem betrachteten Netz befinden, desto größer ist die Anzahl der möglichen Ausführungen eines Fahrplans. Es bedarf daher automatisierter mathematischer Lösungsverfahren, um den Kunden einen optimalen Fahrplan anbieten zu können. Die Berücksichtigung der Verknüpfung zwischen Stadt- und Regionalverkehr in einem Fahrplan, wie sie in einem Verkehrsverbund auftritt, erschwert aufgrund auftretender Unregelmäßigkeiten im Fahrplan die Lösungssuche zusätzlich. Eine nachfrageorientierte Fahrplanoptimierung hat die Kenntnis von allen Eintritts-, Austritts-, sowie Umsteigepunkten von Fahrgästen des ÖV- Systems als Voraussetzung. Diese Anforderung kann mittels eines umgelegten Verkehrsmodells, das einerseits flächendeckende Angebotsdaten und andererseits die Nachfrage zwischen Verkehrszellen berücksichtigt, erfüllt werden. Übergangsgehzeiten zwischen Haltepunkten kommt ein hoher Stellenwert zu, da sie das Erreichen von Anschlussverbindungen steuern. Besonders bei zeitlich knappen Verbindungen kann die Übergangsgehzeit für ein Erreichen entscheidend sein. Ziel in der Methodenfindung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines realitätsnahen und transparenten Verfahrens, das keine Anpassungen verwendet und somit Akzeptanz bei Verkehrsplanern und Verkehrsbetreibern erzielen soll.

4 Angebotseigenschaften und Nachfragewirkung

In diesem Kapitel erfolgt eine Analyse der Einflüsse Angebot und Nachfrage auf einen Fahrplan. Netz- und zeitbezogene Eigenschaften werden beschrieben. Die theoretisch mögliche Anzahl an Ausführungen der Fahrplangestaltung hängt von der Anzahl der Umsteigemöglichkeiten, der Größe des Taktintervalls und der Nachfrage ab. Abschließend ist eine Sensitivitätsanalyse eines Fahrplanes bei unterschiedlicher Nachfrage angeführt.

4.1 Anzahl Umsteigemöglichkeiten

Eine Umsteigerrelation ist definiert als der Übergang vom Ausstiegsort einer Linie bis zum Einstiegsort einer anderen Linie. Die Rückrichtung einer Umsteigemöglichkeit ist dabei eine eigene Umsteigerrelation. Aufgrund der Umlaufbildung ist zwar eine Abhängigkeit gegeben, jedoch ist für eine nachfrageabhängige Fahrplangestaltung eine getrennte Betrachtung notwendig. Bei der Ermittlung der Anzahl der Umsteigerrelationen wird zwischen End- und Durchgangshaltestellen für Linien unterschieden.



Abb. 16 Anfahrtsmöglichkeiten von Linien an einer Haltestelle

Endhaltestelle für Linien

Die Anzahl der Umsteigerrelationen einer Endhaltestelle errechnet sich folgendermaßen:

$$n_U = n_{L1} * (n_{L1} - 1) \quad (21)$$

n_U Anzahl Umsteigerrelationen an einer Haltestelle [-]

n_{L1} Anzahl Linien an einer Endhaltestelle [-]

Durchgangshaltestelle für Linien

Die Anzahl der Umsteigerelationen an Durchgangshaltestellen wird mit folgender Formel berechnet:

$$n_U = 4 * n_{L2} * (n_{L2} - 1) \quad (22)$$

n_{L2} Anzahl Linien an einer Durchgangshaltestelle [-]

Folgende Darstellung zeigt die Zunahme der Umsteigerelationen an Haltestellen in Abhängigkeit von der Linienanzahl. Beispielsweise treten bei einer Durchgangshaltestelle für zehn Linien 360 Umsteigerelationen und bei einer Endhaltestelle für zehn Linien nur 100 Umsteigerelationen auf.

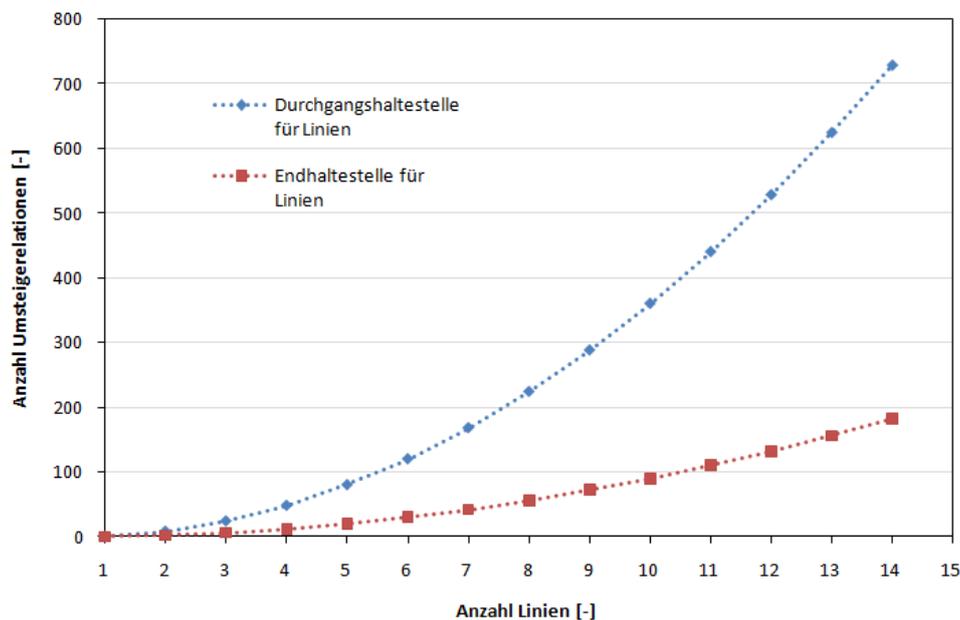


Abb. 17 Anzahl der Umsteigerelationen für End- oder Durchgangshaltestelle für Linien

Gemischte Haltestelle für Linien

Bei einer gemischten Haltestelle für Linien ergeben sich Umsteigerelationen von durchgängigen zu endenden Linien an einer Haltestelle und umgekehrt. Diese werden wie folgt berechnet:

$$n_U = 2 * n_{L1} * n_{L2} \quad (23)$$

Die Gesamtanzahl an möglichen Umsteigerelationen errechnet sich somit aus folgender Formel:

$$n_U = (n_{L1} + 2 * n_{L2})^2 - n_{L1} - 4 * n_{L2} \quad (24)$$

Diese Kombination ist der am häufigsten auftretende Fall und findet sich an zentralen Umsteigeknoten. Betrachtet man alle Haltestellen mit deren Umsteigemöglichkeiten in einem

räumlich definierten Gesamtnetz, inklusive der Linien aller Verkehrssysteme und aller Verkehrsbetreiber, so ergibt sich eine große Anzahl an theoretisch möglichen Umsteigebeziehungen. Beispielsweise beträgt die errechnete Umsteigeanzahl einer einzigen Haltestelle mit fünf durchfahrenden und drei endenden Linien 146. Je größer die Anzahl der Umsteigerelationen in einem Netz ist, desto größer ist auch die Anzahl der theoretisch möglichen Fahrplanausprägungen.

4.2 Verschiebung Abfahrtszeit

Abfahrtszeiten von getakteten Linien können so lange um jeweils eine Minute verschoben werden, bis das um eine Minute reduzierte Taktintervall der Linie T_{L_i} erreicht wird. Im Fall, dass eine Verschiebung die Größe des Taktes annimmt, tritt keine Veränderung der Gesamtwartezeit auf. Das zeitliche Verschieben s_i der Abfahrten einer Linie hat daher folgende Unter- und Obergrenze:

$$0 \leq s_i < T_L$$

s_i zeitliche Verschiebung der Abfahrtszeit [min]

T_L Taktintervall der Linie i [min]

Durch Verschieben von Abfahrtszeiten entsteht eine große Anzahl an theoretisch möglichen Ausprägungen eines Fahrplans, die von der Anzahl der verschiebbaren Linien und vom jeweiligen Takt abhängen. Ist ein Verschieben aller Linien möglich, so treten gleiche Fahrplansituationen auf, die sich von anderen Lösungen nur durch einen gleichen zeitlichen Versatz aller Linien unterscheiden. Sind nicht alle Linien verschiebbar so tritt bei gleichem zeitlichem Versatz der verschiebbaren Linien eine unterschiedliche Gesamtwartezeit auf. Unter einer Fahrplansituation \mathbf{FP}_i ist eine einzige zeitliche Ausprägung eines Fahrplanes zu verstehen, der sich von der Fahrplansituation \mathbf{FP}_{i+1} dadurch unterscheidet, dass die Abfahrtszeit einer Linie um eine Minute verschoben wird. Die Menge aller möglichen Fahrplansituationen ist das Produkt der Taktintervalle verschiebbarer Linien.

$$n_{\mathbf{FP}} = \prod_{L \in n_L} T_L \quad (25)$$

$n_{\mathbf{FP}}$ Anzahl möglicher Fahrplansituationen [-]

n_L Menge der Linien mit verschiebbaren Abfahrtszeiten [-]

Bei einer Anzahl von 10 verschiebbaren Linien mit einem Taktintervall von 10 Minuten und mindestens einer nicht verschiebbaren Linien ergeben sich daraus 10 Milliarden mögliche Lösungen. Je homogener die Taktintervalle in einem betrachteten Netz sind, desto mehr optimale Lösungen mit minimaler Gesamtwartezeit treten auf. Weisen alle betrachteten Linien den gleichen Takt auf, wird die größtmögliche Anzahl an optimalen Fahrplanausprägungen erreicht. Bei unregelmäßigen Takten liegt im ungünstigsten Fall nur mehr eine Fahrplansituation mit der minimalen Gesamtwartezeit vor.

4.3 Verkehrsnachfrage

Aus der Menge aller Fahrplansituationen ist für eine definierte Verkehrsnachfrage die optimale Lösung für den Fahrplan zu ermitteln. In den weiterführenden Betrachtungen gibt eine Nachfragesituation die Quelle-Ziel-Beziehungen von Fahrgästen an und unterscheidet sich von jeder anderen Nachfragesituation dadurch, dass mindestens eine Quelle-Ziel-Beziehung eine geänderte Fahrtenanzahl aufweist. Prinzipiell gibt es für jede Nachfragesituation mindestens eine Lösung, bei der die Gesamtwarezeit das globale Minimum darstellt. Die Anzahl der optimalen Lösungen kann dabei jedoch variieren. An folgendem Beispiel wird der Einfluss der Verkehrsnachfrage für einen Fahrplan mit minimaler Gesamtwarezeit demonstriert. Ausgegangen wird von drei Linien, wobei es zwei Verknüpfungsknoten der Linien gibt. Zum besseren Verständnis wird hier die Umlaufplanung vernachlässigt, und die Linien werden nur in jeweils eine Richtung betrachtet. Zwei Linien verfügen über ein 10-minütiges Taktintervall und eine Linie über ein 15-minütiges Taktintervall. Die Gehzeit zwischen den Haltepunkten der Linie A und der Linie B beträgt 3 Minuten und zwischen der Linie A und Linie C 1 Minute. Die Fahrzeit zwischen den beiden Haltestellen beträgt 10 Minuten. Es ergeben sich somit vier Umsteigerelationen, wie aus folgender Abbildung ersichtlich wird:

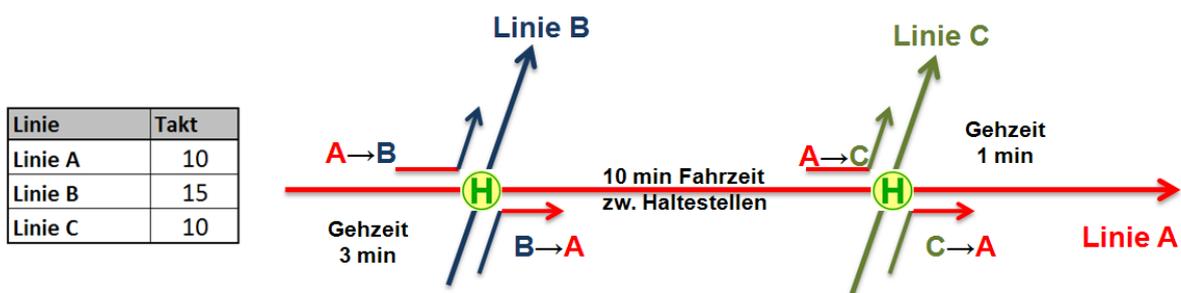


Abb. 18 Demonstrationsbeispiel für den Einfluss der Verkehrsnachfrage auf den Fahrplan

Die Anzahl möglicher Fahrplansituationen n_{FP} ist 1500. Die Abfahrtszeiten entsprechen den Ankunftszeiten an derselben Haltestelle. Für jede Fahrplansituation wird die Gesamtwarezeit an beiden Haltestellen errechnet und die Größe der minimalen Gesamtwarezeit kann bestimmt werden. Zusätzlich wird die Anzahl der Lösungen mit der minimalen Gesamtwarezeit ermittelt. Im Ausgangsfall ist die Nachfrage gleichmäßig verteilt und beträgt auf allen Umsteigerelationen 100 Fahrgäste. Die minimale Summe der Gesamtwarezeit aller Fahrplansituationen tritt 423 Mal auf und beträgt 1.200 Minuten. Bei Variation der Nachfrage der Relation A nach C von 0 auf 200 in 50er Schritten zeigt sich, dass das Vorkommen der Anzahl der Lösungen variiert und dass mit steigender Nachfrage die Gesamtwarezeit bis zu einer Belastung von 100 steigt. Ab einer Nachfrage von 101 Fahrgästen bleibt die Gesamtwarezeit (1.200 min) und deren Vorkommen (47-mal) konstant. In folgender Grafik sind exemplarisch die Gesamtwarezeiten für alle Fahrplansituationen erkennbar, wobei auf der Relation von A nach C keine Nachfrage vorliegt. Alle weiteren Darstellungen für die fünf Nachfrageszenarien finden sich im Anhang A1.

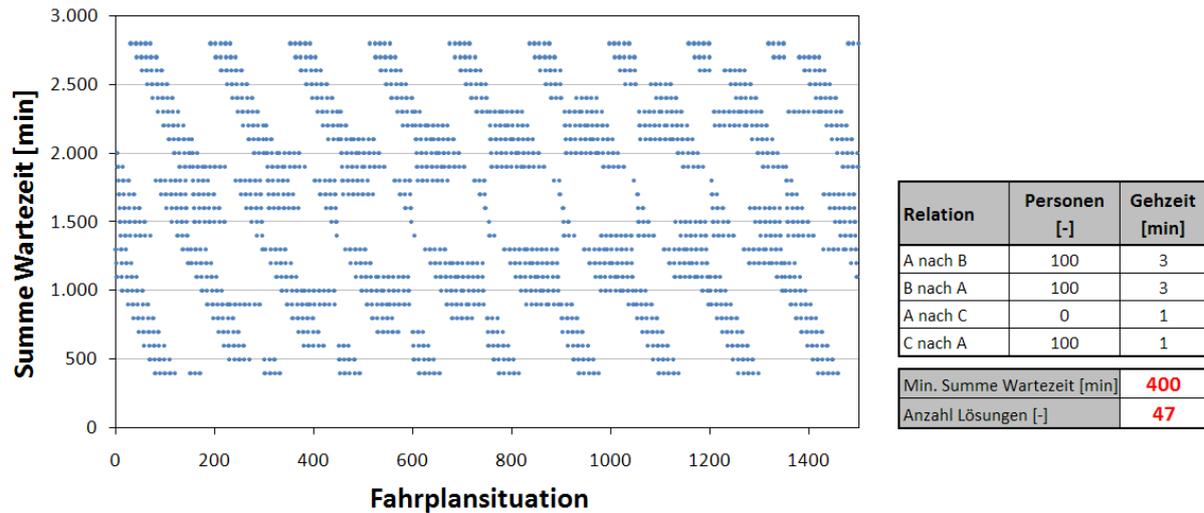


Abb. 19 Beispiel für die Variation der Nachfrage von A nach C

Bei einer konstanten Gesamtnachfrage von 400 Fahrgästen und bei Variationen der Aufteilungen auf die einzelnen Relationen variiert die Gesamtwartezeit stark und eine unterschiedliche Anzahl an optimalen Lösungen ist vorhanden. Aus sämtlichen errechneten Lösungen aus der Variation der Parameter Nachfrage, Taktintervall und Übergangsgezeit resultieren folgende Erkenntnisse:

- Je gleichmäßiger die Nachfrageverteilung der Umsteigerrelationen einer Haltestelle ist, desto größer wird die Gesamtwartezeit (Anhang A2).
- Bei vollständiger gleichmäßiger Belastung der Umsteigerrelationen einer Haltestelle erreichen die Gesamtwartezeit und die Anzahl der minimalen Lösungen ihren größtmöglichen Wert.
- Die Verteilung der Nachfrage auf die Haltestellen hat keinen Einfluss auf die Anzahl der Lösungen mit minimaler Wartezeit (Anhang A3).
- Je weniger Relationen einer Haltestelle eine Nachfrage haben, desto kleiner wird die Gesamtwartezeit.
- Die Übergangsgezeit hat Einfluss auf die minimale Gesamtwartezeit und auf deren Häufigkeit, jedoch lassen sich keine Tendenzen daraus ableiten (Anhang A4).
- Je kleiner die Taktintervalle sind, desto kleiner ist auch die Gesamtwartezeit (Anhang A5).

Die Wirkungen sind in folgender Grafik nochmals dargestellt:

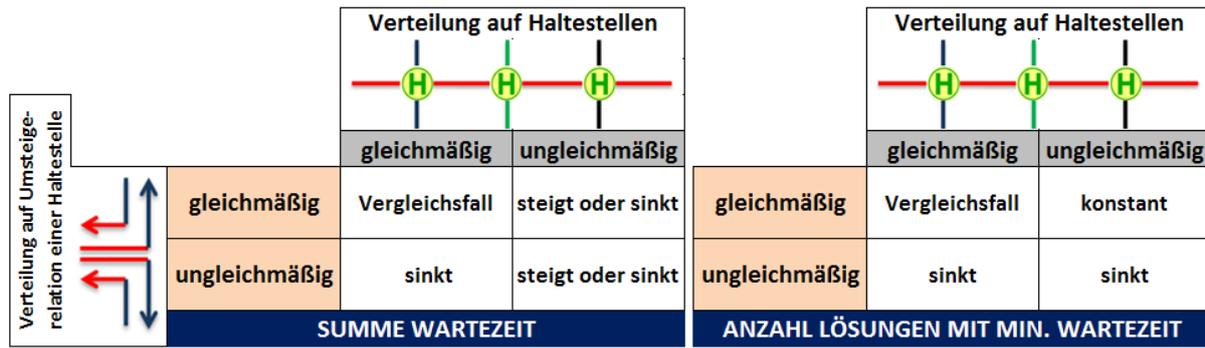


Abb. 20 Wirkungen der Nachfragevariation auf die Gesamtwartezeit und deren Vorkommen

Folgend wird eine Sensitivitätsanalyse eines Fahrplans vorgenommen. Bei Änderung der Nachfrage können die besten Lösungen zu guten Lösungen oder gute Lösungen zu schlechten oder umgekehrt werden. Am obigen Beispiel erfolgt bei gleichbleibenden Taktintervallen und Gehzeiten eine Variation der Nachfrageaufteilung. Dabei werden anfangs alle vier Umsteigerrelationen nicht belastet bis am Ende jede Relation eine Nachfrage von 200 hat. Die Steigerung erfolgt dabei in 20er Schritten, wodurch sich 14.641 Nachfragesituationen ergeben. Für jede Fahrplansituationen wird für jede Nachfragesituationen die Gesamtwartezeit berechnet und der Mittelwert daraus gebildet. Es ergeben sich nur sechs mögliche Ausprägungen der Mittelwerte der Gesamtwartezeit (1.200, 1.700, 2.200, 2.700, 3.200 und 3.700 min). Jedoch kann von einer für alle Nachfragesituationen gültigen guten Lösung nicht auf die Qualität für eine einzige Nachfragesituation rückgeschlossen werden. Um weitere Rückschlüsse über die Qualität der einzelnen Lösungen zu erhalten, erhält die Gesamtwartezeit jeder Fahrplansituation einen Rang für jede Nachfragesituation. Jene Fahrplansituation mit der minimalen Wartezeit nimmt den Rang eins ein. In weiterer Folge wird für jede Fahrplansituation der gemittelte Rang aller Nachfragesituation errechnet. Der Mittelwert der besten Lösung aller 14.641 Nachfragevariationen nimmt den Rang 228 an. Fahrplansituationen mit dem kleinsten Mittelwert des Ranges treten acht Mal auf. In folgender Grafik sind die Mittelwerte der Ränge für jede Fahrplansituation dargestellt.

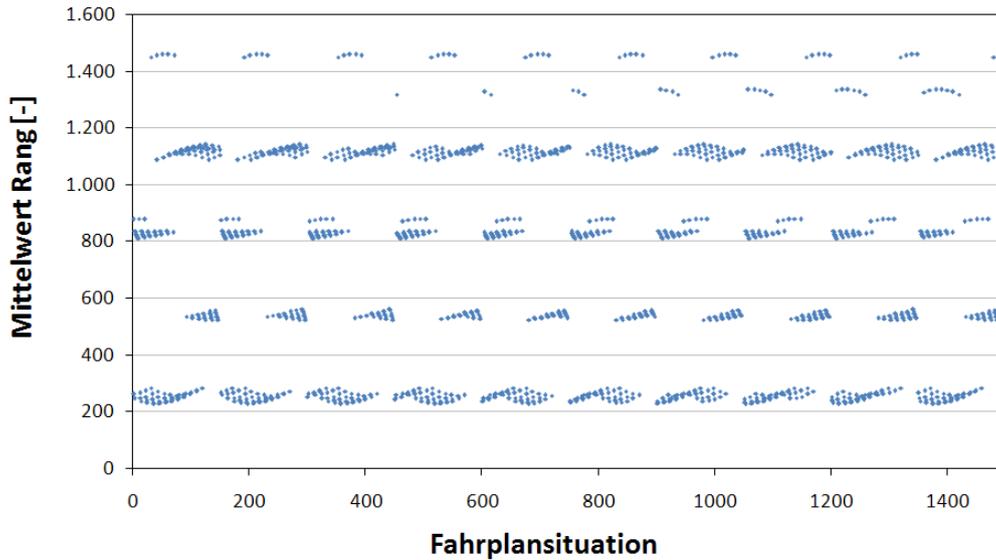


Abb. 21 Mittelwert des Ranges von Gesamtwartezeiten aller Nachfragesituationen für jede Fahrplansituation

In folgender Abbildung ist das Rangverhalten der im Mittel besten Lösung erkennbar. Bei 726 Nachfragesituationen beträgt die Gesamtwartezeit null. Der schlechteste Rang ist 631 und tritt bei zweimal ein. Die Gesamtwartezeit beträgt dabei 880 Minuten. Die Gesamtwartezeit ist mit 2.400 Minuten am größten, wenn alle vier Relationen eine Nachfrage von 200 aufweisen.

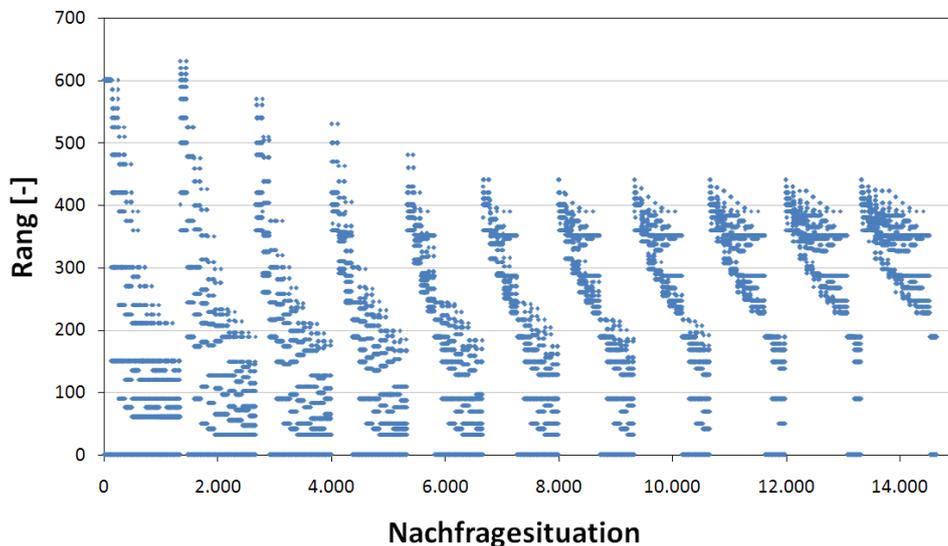


Abb. 22 Rangverhalten der besten Lösung bei allen Nachfragesituationen

Die Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage steht auch immer in Kombination mit der betrachteten Zeitspanne. Der Betrachtungszeitraum innerhalb einer Verkehrszeit kann Fahrplansituationen auf- oder abwerten. Die optimale Lösung für eine einzelne Stunde muss nicht der optimalen Lösung einer gesamten Verkehrszeit entsprechen. Bei zu langen Betrachtungszeiträumen kann es zu

Kompensierungen und bei zu kurzen Betrachtungszeiträumen zu Konzentrationen von einzelnen Verkehrsströmen durch die sich ändernde Verkehrsnachfrage kommen. Ziel des in weiterer Folge beschriebenen Optimierungsverfahrens ist es, einen Fahrplan für ein gesamtes Netz zu finden, bei dem die mittlere Wartezeit für einen Fahrgast minimal ist und die Anzahl der Fahrzeuge konstant bleibt und im Idealfall sogar reduziert wird.

5 Nachfrageabhängiger Ansatz zur Fahrplanoptimierung

Im Lösungsansatz wird die Gliederung des angewendeten Verfahrens dargestellt. In den Unterpunkten zwei und drei werden die Voraussetzungen und die notwendigen Parametereinstellungen beschrieben. Danach findet sich die mathematische Formulierung des nachfrageabhängigen Optimierungsansatzes, der die einzelnen Verfahrensschritte wiedergibt. Dabei sind die Fahrzeuersparnis, die Berechnung von Kenngrößen, die zwei Optimierungsmöglichkeiten der Abfahrtszeiten und der Abbruch des Verfahrens angeführt.

5.1 Lösungsansatz

Zur Lösung der Fahrplangestaltung kommt ein iteratives Optimierungsverfahren zur Anwendung. Das kontinuierliche Verbesserungsverfahren minimiert die Gesamtwarezeit aller Fahrgäste in einem betrachteten Verkehrsnetz. Mit dieser Vorgangsweise kann das Optimierungsproblem gelöst werden. Dazu ist ein bestehender Fahrplan, der in weiterer Folge in mehreren Optimierungsschritten immer nur verbessert und niemals verschlechtert wird, notwendig. Es erfolgt bei jedem durchgeführten Optimierungsschritt eine Näherung zum globalen Minimum. Dabei können alle Linien eines Netzes, unabhängig davon ob sie mit oder ohne Takt verkehren, berücksichtigt werden. Auch Taktsprünge können im betrachteten Zeitraum auftreten. Damit ist es auch möglich, eine Optimierung für die Nachfrage von einem ganzen Tag mit mehreren Verkehrszeiten vorzunehmen. Das Verkehrssystem einer Linie spielt nur insofern eine Rolle, dass bei der Definition der Mindestwarezeiten für einen Umsteigevorgang unterschiedliche Größen erforderlich sein können. Änderungen von Fahrzeitprofilen, die im Laufe eines Tages beispielsweise aufgrund erhöhter Nachfrage variieren können, werden im Zuge der Optimierungsiterationen berücksichtigt. Ein periodischer Verlauf der Abfahrtszeiten ist nicht erforderlich, da Einschubfahrten genauso wie die in die Remise einfahrenden oder die ausfahrenden Fahrzeuge inkludiert sind.

Wie in 4.2.3 gezeigt, steigt die Anzahl der Lösungen mit minimaler Gesamtwarezeit, je gleichmäßiger die Aufteilung der Nachfrage der Umsteigerrelationen ist. Die Wahrscheinlichkeit, die optimale Lösung zu finden, steigt dadurch deutlich an. Wird die Verkehrsnachfrage in der Fahrplangestaltung nicht berücksichtigt, stellt sich die Findung nach der optimalen Lösung als weniger komplexes System dar. Änderungen in der Verbindungswahl von Fahrgästen werden durch kontinuierliche Umlegungsberechnungen nach jeder durchgeführten Optimierungsiteration mit zeitlichen Verschiebungen berücksichtigt. Dadurch ist eine mit der Routenwahl gekoppelte Fahrplangestaltung möglich. Vorteile ergeben sich insofern, dass eine Konzentration der Nachfrage im Zuge der Optimierung erfolgt. Einerseits können einige Linien dadurch besser ausgelastet werden und

andererseits wird eine Einsparung an Fahrzeugen durch größere Taktintervalle aufgrund von kleineren Auslastungen an anderen Linien möglich.

Die Methode ermöglicht auch eine nachträgliche Veränderung eines Parameters (Übergangsgezeit, Nachfrage, minimale Wartezeit etc.) an einer Linie. Der Optimierungsaufwand bei Änderungen an wenigen Linien ist klein, da nur wenige Iterationen erforderlich sind. Dies kann notwendig werden, wenn Verspätung häufig auftreten und es somit erforderlich wird, die minimalen Wartezeiten zu erhöhen. Eine Anpassung kann sich aus der Verlegung einer Haltestelle aufgrund einer Baustelle und der sich dadurch geänderten Übergangsgezeit ergeben. Auch im Falle, dass bei einer Linie der Takt geändert wird, ist die Findung einer neuen optimalen Lösung mit keinem großen Aufwand verbunden. Ist die Nachfrage an einer Umsteigerrelation im Regelfall klein und steigt diese aufgrund einer Veranstaltung, kann eine Anpassung einzelner Linien erforderlich werden. Ergeben sich aufgrund einer ÖV- Priorisierung bei wenigen Linien kürzere Fahrzeiten, kann das Optimum der Linien mit den geänderten Fahrzeitprofilen ebenso sofort bestimmt werden. Das iterative Verfahren kann mit einem entsprechendem Rechenaufwand bis zum Erreichen eines definierten Kriteriums oder bis es keine Änderungen der Gesamtwartezeit gibt, und somit das globale Minimum in einem betrachteten Gebiet erreicht ist, angewendet werden.

Der Algorithmus zur Lösung des Optimierungsproblems wird in der Software Microsoft Excel unter Ausführung eines Microsoft Visual Basic-Skripts umgesetzt. Dabei erfolgt eine Kopplung mit der Verkehrsplanungssoftware VISUM.

Folgendes Flussdiagramm stellt den Verfahrensablauf zur Fahrplanoptimierung schematisch dar. Dabei erfolgt eine dreiteilige Gliederung in die Grundvoraussetzungen, Eingabeparameter und Methode des Optimierungsverfahrens.

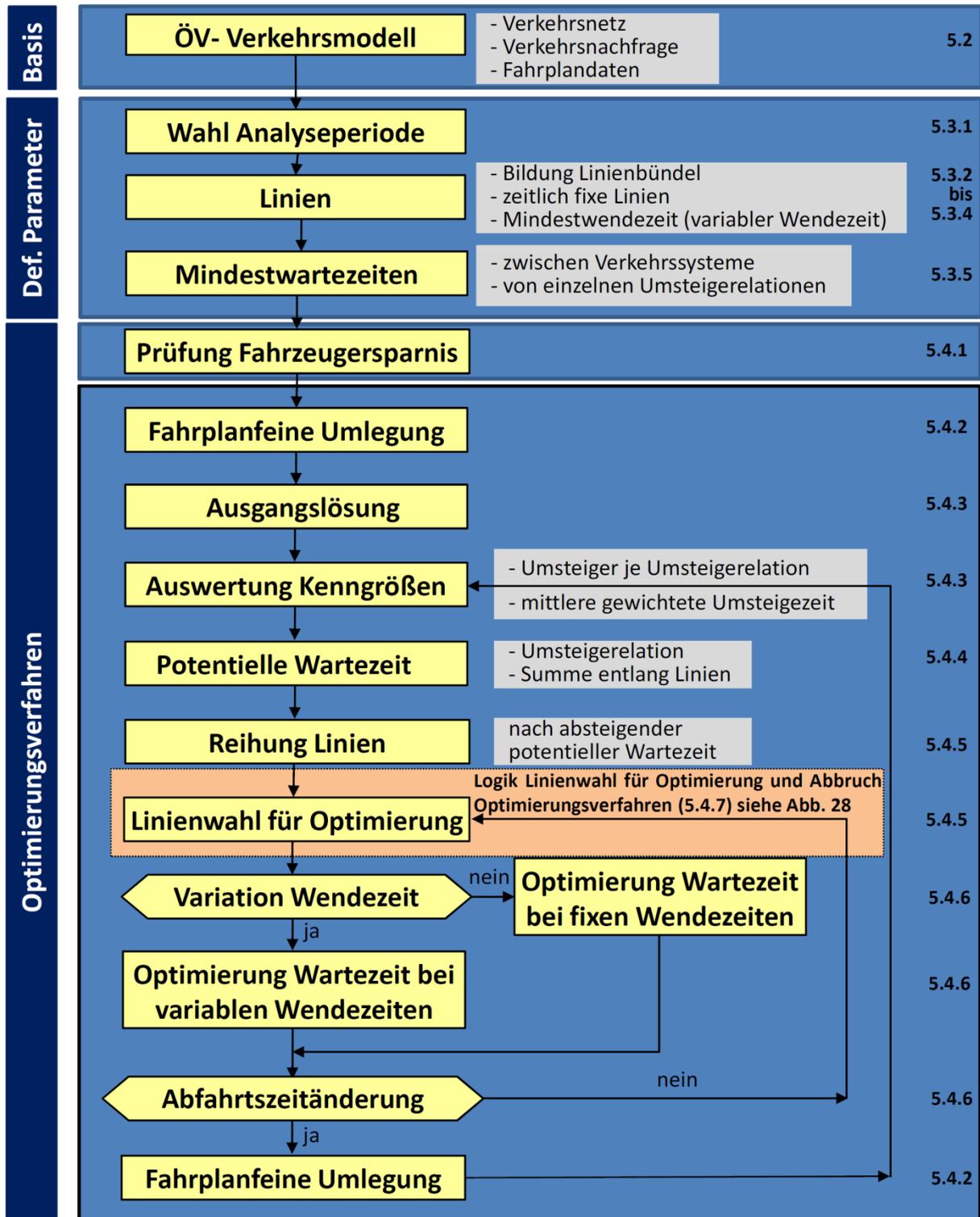


Abb. 23 Methodik der nachfrageabhängigen Fahrplanoptimierung

5.2 Grundvoraussetzungen

Das Optimierungsverfahren benötigt die Informationen eines Fahrplanes als Grundvoraussetzung. Um realitätsnahe Vergleiche vornehmen und die Auswirkungen des optimierten Fahrplanes feststellen zu können, ist die Verwendung des Ist-Fahrplanes sinnvoll. Dabei spielt es keine Rolle, welche Güte dieser Fahrplan aufweist. Liebchen und Nökel (2006) kombinieren ihre Methode der Taktversatzoptimierung mit einem möglichen Linientausch. Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren setzt eine abgeschlossene Linienplanung voraus. Wie in Kapitel 2.2.2 jedoch beschrieben, sind Methoden zur Linienoptimierung, bei denen eine Minimierung der Fahrzeiten oder eine Minimierung der Umsteigehäufigkeit vorgenommen werden, bekannt. Bei Durchführung einer Linienoptimierung und einer anschließenden Fahrplanoptimierung kann ein attraktives ÖV- System mit kurzen Reisezeiten, einer geringen Anzahl an notwendigen Umsteigevorgängen, minimalen Wartezeiten und optimalen Anschlussverbindungen von Verkehrsbetreibern angeboten werden. Dazu bedarf es einer unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit in der Fahrplangestaltung.

Verkehrsmodell

Ein Verkehrsmodell besteht aus einem Verkehrsnetz, einem Fahrplan und einer Nachfragematrix. Ein Netz besteht aus Knoten und Strecken, die jeweils einen Anfangs- und Endknoten benötigen, und gibt die Lage von Strecken, deren Verknüpfungen und die zulässigen Verkehrssysteme auf Strecken an. Der Fahrplan berücksichtigt Linienverläufe, Fahrzeitprofile und Abfahrtszeiten an den Starthaltestellen. Nachfragematrizen geben Fahrtenmengen zwischen Quelle-Ziel-Beziehungen an können für alle Verkehrssysteme mittels Strukturdaten wie Einwohnerzahl oder Anzahl Arbeitsplätze auf Basis aktivitätsbezogener Wegekettenverteilungen berechnet werden. Mit einem kalibrierten stundenfeinen Verkehrsnachfragemodell eines typischen Werktages kann eine realistische Nachbildung von Wirkungen auf die Fahrgastnachfrage berücksichtigt werden. Verlagerungseffekte des Ziels, des Verkehrsmittels und der Verbindung können besser auf Basis von Einzelstunden als von Tageswerten abgebildet werden. Folgende weiterführende Betrachtungen werden unabhängig vom Verkehrsbetreiber einer Linie geführt. Es erfolgt eine betreiberübergreifende Betrachtung aller Fahrpläne. Das einer Linie zugehörige Verkehrssystem spielt für das Optimierungsverfahren keine Rolle, jedoch für die Definition der Mindestwartezeiten von Umsteigerelationen.

5.3 Beschreibung Steuerungsparameter

Die in weiterer Folge beschriebenen Parameter können manuell definiert werden. Alle angeführten Komponenten haben mit unterschiedlicher Intensität einen Einfluss auf das Ergebnis der Optimierung. Die Bestimmung der Analyseperiode (AP), der Mindestwartezeit und der Mindestwendezeit wirken sich auf die Qualität der Lösung eines Fahrplanes aus.

5.3.1 Analyseperiode

Eng im Zusammenhang mit der AP steht die Verkehrsnachfrage, die die Qualität der Lösungen stark beeinflusst. Die Kenntnis der stündlichen Nachfrage, jedoch zumindest jener der vorhandenen Verkehrszeiten, ermöglicht einen nachfrageabhängigen Fahrplan. Eine für eine bestimmte Nachfrage optimal berechnete Lösung kann bei geänderter Verkehrsnachfrage durchaus zu einer weniger günstigen Lösung führen. Bei Betrachtung einer einzelnen Stunde kann sich eine andere optimale Lösung einstellen als bei Berücksichtigung eines mehrstündigen Zeitintervalls. Aufgrund von Schwankungen der Verkehrsnachfrage zwischen Quell- und Zielbezirken innerhalb eines Tages kann eine Umsteigerrelation in einer Stunde eine starke Nachfrage haben, jedoch in der Folgestunde nur eine geringe Belastung aufweisen.

Nachdem Methoden zur Findung der optimalen Dauer und Einteilung von Verkehrszeiten aus Sicht der Nachfrage nicht bekannt sind, besteht bei diesem entwickelten Verfahren die Möglichkeit, die AP individuell nach den definierten Verkehrszeiten oder aber auch stunden- oder stundengruppenfein zu wählen. Somit können die Auswirkungen bei Verkürzungen oder Verlängerungen einer bestehenden Verkehrszeit miteinander verglichen werden. Eine Ermittlung eines Verfahrens, welches die optimale Anzahl und die optimale Dauer der Verkehrszeiten basierend auf der Verkehrsnachfrage bestimmt, wäre sinnvoll, ist jedoch nicht Schwerpunkt dieser Arbeit. Nachdem alle Abfahrtszeiten der Servicefahrten von einer Linie innerhalb einer AP um die gleiche Minutenanzahl verschoben werden, stellen Taktsprünge von Linien innerhalb einer AP kein Problem dar. Eine getrennte Betrachtung vor und nach einem Taktsprung führt für jedes Zeitintervall zur optimalen Fahrplangestaltung, dass nicht dem Optimum der AP mit Taktsprüngen entsprechen muss.

5.3.2 Linienbündelung

Ein Verkehrsnetz einer Stadt im ÖV setzt sich aus mehreren Linien, die von unterschiedlichen Verkehrsbetreibern angeboten werden, zusammen. Die Menge aller Linien in einem betrachteten Gebiet wird aus allen Einzellinien L gebildet. Jede Linie besteht aus Linienrouten, die den örtlichen Verlauf eines Linienweges für eine Richtung beschreiben. Für den Regelbetrieb innerhalb einer Verkehrszeit eines Verkehrstages gibt es eine Linienroute für die Hinrichtung L_H und eine für die Rückrichtung L_R . Für jede Änderung des Fahrzeitprofils oder des Kursverlaufes ist eine eigene Linienroute erforderlich. Jede Linienroute besteht wiederum aus Linienroutenverläufen für die Hinrichtung L_{V_H} und für die Rückrichtung L_{V_R} , die die Folge der Routenpunkte einer Linienroute umfassen. Aufgrund von Linienabhängigkeiten und einem möglichst attraktiven Taktangebot von Linien, deren Teile von Linienrouten den gleichen Verlauf aufweisen, wird es erforderlich Linien zusammenzufassen. Diese Linien werden als gebündelte Linien bezeichnet. Zwei Linien werden zu einem Linienbündel zusammengefasst, wenn eine größere Schnittmenge der Linienroutenverläufe der Linien vorhanden ist. Eine exakte Definition über die gemeinsame erforderliche Länge des Linienroutenverlaufs ist situationsabhängig. Die Kriterien für die Bildung eines Linienbündels liegen in der Entscheidung des Verkehrsplaners. Allgemein kann jedoch festgehalten werden, dass eine Linie A mit der Linie B zu einem Linienbündel wird, falls folgende Bedingung erfüllt ist:

$$L_{H_A} \cap L_{H_B} = \{Lv_{H_A} | Lv_{H_A} \in L_{H_A} \wedge Lv_{H_A} \in L_{H_B}\} \vee L_{R_A} \cap L_{R_B} = \{Lv_{R_A} | Lv_{R_A} \in L_{R_A} \wedge Lv_{R_A} \in L_{R_B}\} \quad (26)$$

L_{H_A}, L_{R_A} Linienroute für die Hinrichtung bzw. Rückrichtung der Linie A [-]

Lv_{H_A}, Lv_{R_A} Linienroutenverlauf für die Hinrichtung bzw. Rückrichtung der Linie A [-]

In folgender Darstellung sind schematische Linienverläufe von möglichen Linienbündeln angeführt.

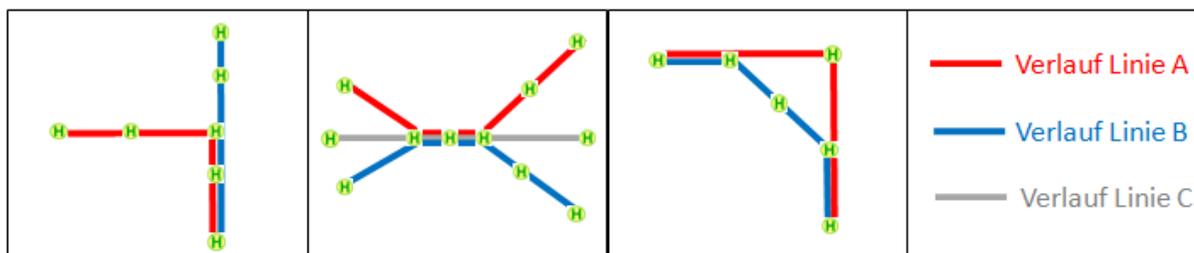


Abb. 24 Beispiele für Linienbündel

Ein gleicher Grundtakt aller gebündelten Linien ist sinnvoll, da dadurch in den Bereichen gemeinsamer Linienroutenverläufe eine Halbierung des Taktes und somit eine Verbesserung des Angebots erfolgt. In weiterer Folge wird nur mehr die Bezeichnung Linie verwendet, unabhängig davon ob es sich um eine Linie oder um Linienbündel handelt.

5.3.3 Linienfixierung

Häufig kann es erforderlich sein, dass Abfahrtszeiten von bestehenden Linien nicht verändert werden sollen. Der Fahrplan dieser Linien wird fixiert. Umsteigezeiten zwischen fixierten und allen anderen Linien werden bei jeder zeitlichen Verschiebung einer Abfahrtszeit neu berechnet. Mögliche Gründe für eine Fixierung von Linien können sein:

- Berücksichtigung übergeordneter Linien (z.B. Fernverkehr),
- Vorgeschriebene Ankunfts- oder Abfahrtszeiten bei größeren Takten (z.B. Schulbeginn),
- Fahrzeugverfügbarkeit (z.B. bei Linienänderung eines Fahrzeuges) oder
- Infrastrukturelle oder betriebliche Gründe spurgebundener Fahrzeuge

Linien, die zeitlich nicht verändert werden, können vor der ersten Optimierungsiteration ausgewählt werden.

5.3.4 Mindestwendezeit

Wendezeiten sind häufig an Start- und Endhaltestellen gleich groß. Sie sind einerseits aus betrieblichen Gründen (z.B. Pausenzeit für Lenker oder Fahrerwechsel) erforderlich und andererseits dienen sie als Pufferzeiten, um etwaige Verspätungen einholen zu können. Bei einer möglichen Variation der Wendezeit bleibt die Summe der beiden Wendezeiten konstant. Bei Reduktion der Wendezeit an einer Endhaltestelle, erfolgt eine Erhöhung um denselben Betrag an der anderen

Endhaltestelle. Durch die Variation der Wendezeiten können sich teils große Potentiale ergeben. Linien, bei denen die Wendezeiten an Start- und Endhaltestellen variieren dürfen, können vor der Optimierung angegeben werden. Dabei ist die Angabe von Mindestwendezeiten, die auch null sein können, für jede Linie mit variabler Wendezeit erforderlich. Sie hängen vom Verkehrssystem, der Fahrdauer, der Linienführung (radial oder tangential), der Lage der Endhaltestelle (innerstädtisch oder dezentral) und vom betrachteten Zeitfenster ab.

5.3.5 Mindestwartezeiten

Mindestwartezeiten können entscheidend sein, ob eine Anschlussverbindung erreicht werden kann oder nicht. Bei der Definition der Mindestwartezeiten ist eine Abstimmung mit den Übergangsgehzeiten erforderlich. Betriebliche Vorgaben können dabei berücksichtigt werden. Um dem Fahrgast ein bequemes und stressfreies Umsteigen zu ermöglichen, erfolgt die Definition von Mindestwartezeiten zwischen Verkehrssystemen (z.B. von Bus auf Zug zwei Minuten). Somit erhält jede Umsteigerelation eine Mindestwartezeit. Optional kann diese auch für einzelne Umsteigerelationen abgeändert werden. Mindestwartezeiten sind bei kleinen Taktintervallen auch klein zu halten und können auch in Abhängigkeit der Übergangsgehzeit null sein. Bei Umsteigevorgängen zwischen Linien mit größeren Taktintervallen hat die Definition der Mindestwartezeiten eine große Bedeutung, um leichte Verspätungen abzufangen und größere Wartezeiten auf das Folgefahrzeug für den Fahrgast zu vermeiden. Eine Vorgabe von Mindestwartezeiten für Umsteigerelationen kann auch zu einer Verschlechterung der Wartezeit führen. Das ist dann der Fall, wenn viele Umsteigerelationen im Bestandfahrplan keine Wartezeiten aufweisen. Jedoch sind Mindestwartezeiten ein Qualitätsmaß um Anschlüsse ohne betriebliche Anschlusssicherung mit einer hohen Wahrscheinlichkeit erreichen zu können.

5.3.6 Übergangsgehzeiten

Eng im Zusammenhang mit den Mindestwartezeiten stehen die Übergangsgehzeiten, die die erforderliche Zeit zum Zurücklegen der Distanz zwischen zwei Haltepunkten zweier unterschiedlicher Linien wiedergeben. Die Übergangsgehzeiten sind in Fahrplanauskunftssystemen enthalten und können in ein Verkehrsmodell übernommen und bei Bedarf adaptiert werden. Übergangsgehzeiten berücksichtigen dabei meist kleine Verspätungen und gehen von niedrigen Gehgeschwindigkeiten aus. Bei pünktlichen Ankünften und schnellem Schritttempo von Fahrgästen können große Diskrepanzen zwischen tatsächlicher und berücksichtigter Übergangsgehzeit entstehen und somit größere Wartezeiten für Fahrgäste, die als unangenehm empfunden werden können, entstehen.

Fahrgastwechselzeiten hängen stark von der Fahrzeugauslastung und der Stärke des Fahrgaststromes ab. Je größer die Auslastung oder je stärker der Fahrgaststrom, desto größer ist auch die Fahrgastwechselzeit, die wiederum die notwendige Übergangsgehzeit verlängert. Zur Abfederung dieses Effektes wären dynamische Übergangsgehzeiten denkbar. Eine Fahrplanoptimierung für die

Spitzenstunde könnte höhere Übergangsgehzeiten berücksichtigen als jene einer Durchschnittsstunde.

5.4 Mathematische Formulierung Fahrplanoptimierung

Aus den angeführten Komponenten zeigt sich, dass die Findung einer optimalen Lösung in der Fahrplangestaltung prinzipiell eine komplexe Aufgabe darstellt. Unter Berücksichtigung der Zeitkomponenten wird die Fahrplangestaltung zusätzlich noch zu einem dynamischen Problem. Aufgrund der großen vorhandenen Lösungsmenge ist die Findung einer exakten Lösung rechentechnisch zeitintensiv. Nachdem die optimale Lösung jeweils von der Verkehrsnachfrage und von dem betrachteten Zeitraum abhängig ist, entsteht eine größere Menge an optimalen Lösungen. Je periodischer die Eingangsgrößen (z.B. Takt) sind, desto größer ist die Menge der Lösungen mit minimaler Wartezeit und desto schneller und leichter kann daher die optimale Lösung gefunden werden. Treten unregelmäßige Parameter auf, gibt es zwar Lösungen, die nahe am Optimum liegen, jedoch tritt schnell der Fall ein, dass es nur ein globales Minimum gibt. Bei dem unter 4.2.3 demonstrierten Beispiel liegt nur mehr eine Lösung mit der minimalen Summe der Wartezeit vor, wenn Unregelmäßigkeiten durch den Takt der Linie B von 7,5 Minuten und durch eine Nachfrage von A nach C von 150 Fahrgästen vorliegen.

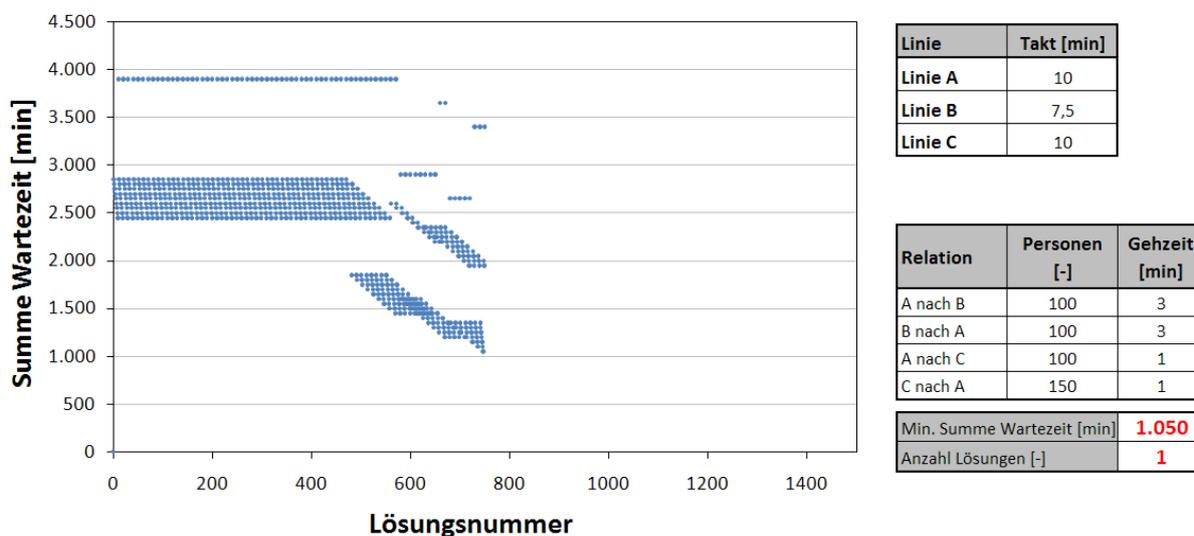


Abb. 25 Anzahl Lösungen mit globalem Minimum der Wartezeit bei Unregelmäßigkeiten der Takte und der Nachfrage

Die Findung einer idealen Lösung erfolgt auf Basis eines iterativen Optimierungsverfahrens. Zur Findung der Lösung wird ein Algorithmus entwickelt, der unter Berücksichtigung der beschriebenen Komponenten das Wartezeitenminimum aller Fahrten ermittelt.

5.4.1 Fahrzeuersparnis

Eine Optimierung der notwendigen Fahrzeuganzahl erfolgt auf Basis der Umlaufplanung. Nachdem die Optimierung mit einem Verkehrsmodell gekoppelt ist, werden Fahrplandaten daraus ausgelesen und für die Berechnung der Fahrzeuersparnis herangezogen. Die Umlaufzeit für eine Linie ergibt sich mit folgender mathematischen Formulierung:

$$t_L^U = t_{L_H}^F + t_{L_R}^F + t_{L_H}^{We} + t_{L_R}^{We} \quad (27)$$

t_L^U	Umlaufzeit einer Linie [min]
$t_{L_H}^F, t_{L_R}^F$	Fahrzeit einer Linie in Hinrichtung H bzw. Rückrichtung R [min]
$t_{L_H}^{We}, t_{L_R}^{We}$	Wendezeit einer Linie nach der Fahrt in Hinrichtung H bzw. in Rückrichtung R [min]

Die Wendezeit einer Linie nach der Fahrt in Hinrichtung errechnet sich dabei folgendermaßen (in Rückrichtung dazu analog):

$$t_{L_H}^{We} = t_{L_{R1}}^{Ab} - t_{L_{H1}}^{An} + T_L * n_{L_H}^{Fz} \quad (28)$$

$t_{L_{R1}}^{Ab}, t_{L_{H1}}^{An}$	Abfahrtszeit bzw. Ankunftszeit der 1. Servicefahrt von Linienrouten in Hin- bzw. in Rückrichtung in einer AP [hh:mm]
T_L	Taktintervall einer Linie in einer AP [min]
$n_{L_H}^{Fz}$	Anzahl der Fahrzeuge auf dem Linienverlauf in Hinrichtung, die sich zum Zeitpunkt der Abfahrt der 1. Servicefahrt in Hinrichtung befinden [-]

Das angeführte Taktintervall ergibt sich aus der Differenz zwischen der zweiten und der ersten Abfahrtszeit eines betrachteten Zeitintervalls.

$$T_L = t_{L_{H2}}^{Ab} - t_{L_{H1}}^{Ab} \quad (29)$$

$t_{L_{H1}}^{Ab}, t_{L_{H2}}^{Ab}$	1. bzw. 2. Abfahrtszeit von Servicefahrten einer Linienroute in eine Richtung in einer AP [min]
------------------------------------	---

Die Anzahl der Fahrzeuge auf dem Linienverlauf zum Zeitpunkt der Abfahrtszeit der 1. Servicefahrt in Hinrichtung in einer AP kann wie folgt bestimmt werden:

$$n_{L_H}^{Fz} = \left\lceil \frac{t_{L_H}^F}{T_L} \right\rceil \quad (30)$$

Die Anzahl der erforderlichen Fahrzeuge einer Linie hängt dabei primär vom Taktintervall und sekundär von der Umlaufzeit. Die Fahrzeiten ergeben sich aus betrieblichen und fahrzeugtechnischen

Rahmenbedingungen und ergeben in Summe mit den Mindestwendezeiten die theoretisch minimale Umlaufzeit für ein Fahrzeug. Wird aus der theoretisch minimal notwendigen Umlaufzeit die Anzahl der erforderlichen Fahrzeuge berechnet, so ergibt sich beim Aufrunden des Verhältnisses zwischen Umlaufzeit und Taktintervall immer die minimal erforderliche Anzahl von Fahrzeugen.

$$n_{Fz} = \left\lceil \frac{t_L^{U_{th}}}{T_L} \right\rceil \quad (31)$$

$t_L^{U_{th}}$ theoretisch minimal erforderliche Umlaufzeit einer Linie [min]

n_{Fz} Anzahl erforderlicher Fahrzeuge [-]

Mit der ermittelten Anzahl an Fahrzeugen lässt sich die tatsächliche Umlaufzeit aus folgender Formel bestimmen:

$$t_L^U = n_{Fz} * T_L \quad (32)$$

Folgende Darstellung zeigt die notwendige Fahrzeuganzahl in Abhängigkeit des Verhältnisses Taktintervall zu Umlaufzeit.

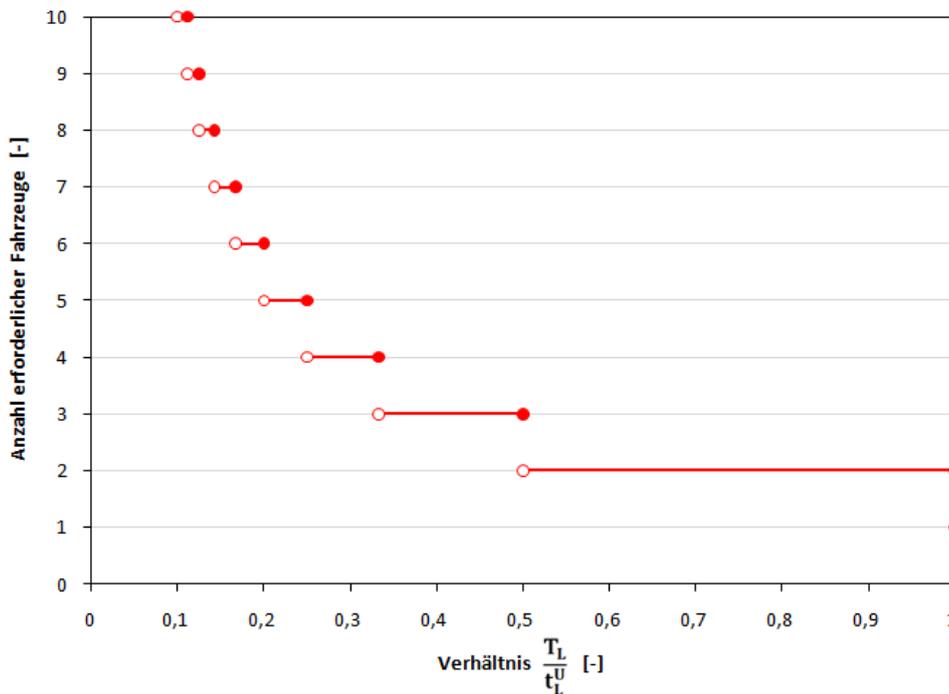


Abb. 26 Ermittlung erforderliche Anzahl von Fahrzeugen

Fahrzeugersparnisse für einen Umlauf sind nur dann möglich, wenn die Summe der Fahrzeiten und der minimalen Wendezeiten beider Richtungen einer Linie kleiner ist als die Summe der auftretenden Wendezeiten aller Fahrzeuge dieser Linie.

$$(t_{LH}^{We} + t_{LR}^{We}) * n_{FZ}^{vorh} > t_{LH}^F + t_{LR}^F + t_{LH}^{We_{min}} + t_{LR}^{We_{min}} \quad (33)$$

$t_{LH}^{We_{min}}, t_{LR}^{We_{min}}$ Minimale Wendezeit nach der Fahrt in Hinrichtung H bzw. in Rückrichtung R [min]

n_{FZ}^{vorh} Anzahl vorhandener Fahrzeuge [-]

In der Praxis sind mittlerweile viele Umlaufplanungen so ausgelegt, dass häufig keine Fahrzeugersparnis mehr möglich ist. Trotzdem kann es vereinzelt auftreten, dass Fahrzeuge auf einer Linie nicht effizient verwendet werden. Die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Fahrzeugersparnis ergibt sich zusätzlich für die Vergleichsrechnung (siehe 6.3) aus der Taktversatzoptimierung von Liebchen und Nökel (2002).

5.4.2 Fahrplanfeine Umlegung

In einem Verkehrsmodell kann eine fahrplanfeine Umlegung durchgeführt werden. Mit den Nachfragedaten von Quelle-Ziel-Beziehungen und dem vorhandenen Angebot von Linien werden mittels einer Umlegungsberechnung Verkehrsbelastungen für ein Netz errechnet. Als Ergebnis liegen linienbezogene Querschnitts- und Fahrzeugbelastungen sowie alle Einsteiger, Aussteiger, Durchfahrer und Umsteiger an Haltestellen vor. Eine fahrplanfeine Umlegung, die einen genauen Fahrplan (Abfahrts- und Ankunftszeit an Haltestellen) benötigt, ermittelt für die definierte AP Wege zwischen Quell- und Zielorten und geht davon aus, dass Fahrgäste über die Fahrplaninformationen verfügen und den Zugangszeitpunkt entsprechend der Abfahrtszeit des erstmöglichen Fahrzeuges wählen. Bei der Wegesuche werden sämtliche Alternativrouten im Vergleich zur schnellsten Verbindung berücksichtigt, wodurch Fahrgäste unterschiedliche Routen zwischen einer Quelle-Ziel-Beziehung wählen. Die Verbindungssuche zwischen Quell- und Zielorten erfolgt mittels eines Branch-and-Bound-Verfahrens, bei dem für jeden Quellbezirk ein Suchbaum mit geeigneten Teilverbindungen generiert wird. Nachdem dabei mehrere gute Verbindungen für eine Quelle-Ziel-Relation generiert werden, wird eine realitätsnahe Verteilung der Nachfrage möglich. Durch einen Vergleich und einer Bewertung aller gefundenen Verbindungen stehen für eine Quelle-Ziel-Beziehung nur mehr günstige Verbindungen zur Auswahl, die nicht zu stark von der besten Verbindung abweicht. Das Identifizieren von ungünstigen Verbindungen erfolgt auf Basis von Ausschlusskriterien, wie Suchwiderstand oder Reisezeit der Verbindung. Mittels Widerständen können die Eigenschaften einer Verbindung gesteuert werden, wobei prinzipiell Bestrafungen und Bevorzugungen möglich sind. Bei den Widerständen können die empfundene Reisezeit (ERZ), der Fahrpreis und die zeitliche Nutzbarkeit herangezogen werden. Die ERZ hängt im Wesentlichen von den Komponenten Fahrzeit im Fahrzeug, Übergangsgezeit, Wartezeit und der Umsteigeanzahl einer Verbindung ab. Beispielsweise kann ein erforderlicher Umstieg mit fünf Minuten bestraft werden

oder die auftretende Wartezeit mit einem definierbaren Faktor multipliziert werden. Je kleiner der Widerstand einer Verbindung ist, umso attraktiver ist diese und desto größer ist auch die Verkehrsnachfrage. Es können zusätzlich weitere Einflüsse (z.B. Startwartezeit oder Anzahl Betreiberwechsel) in die ERZ berücksichtigt werden, jedoch ist die Relevanz der Berücksichtigung dieser Faktoren eher von geringer Bedeutung. Je nach Gewichtung der einzelnen Faktoren kann die Verbindungswahl zwischen einem Quell- und Zielort variieren. (Vgl. PTV AG, 2011)

Die Auswirkungen und Einflüsse von Komponenten wie Variation der Widerstandsparameter und Parameter zur Aufteilung der Fahrten auf Verbindungen werden im Kapitel 6.2 beschrieben und anhand eines Beispiels analysiert.

5.4.3 Ausgangslösung und erweiterte Auswertungen

Das für die Optimierung benötigten Ergebnisse einer fahrplanfeinen Umlegung für eine AP sind die Umsteigemengen und die auftretenden Umsteigezeiten zwischen den einzelnen Servicefahrten an Haltestellen mit Umsteigemöglichkeit. Diese Belastungen von Umsteigerelationen beschreiben die Ausgangslösung, wobei die Umsteigezeit einer Umsteigerelation die Differenz zwischen Ankunftszeit des ersten Fahrzeuges und Abfahrtszeit des Anschlussfahrzeuges ist.

$$t_{Ur}^{U_t} = t_{L_j}^{Abz} - t_{L_k}^{Anz} \quad (34)$$

$t_{Ur}^{U_t}$	Umsteigezeit zwischen zwei Servicefahrten einer Umsteigerelation zu einem Zeitpunkt t [min]
$t_{L_j}^{Abz}$	Abfahrtszeit einer Servicefahrt der Linie j an der Haltestelle Z [hh:mm]
$t_{L_k}^{Anz}$	Ankunftszeit einer Servicefahrt der Linie k an der Haltestelle Z [hh:mm]

Potentiale an Umsteigerelationen sind daraus erkennbar. Eine netzweite Aussage bei einer Verbesserung an einer einzigen Umsteigerelation einer Haltestelle kann bei größeren Netzen nicht getroffen werden. Die Kenngrößen mittlere Umsteigezeit und Anzahl der Umsteiger für jede Umsteigerelation werden im betrachteten Netz für jede Stunde ermittelt. Eine Umsteigerelation beschreibt eine Umsteigeverbindung an einer Haltestelle von einer zu einer anderen Linie. Eine Umsteigeverbindung wird dann berücksichtigt, wenn die Ankunftszeit des ersten Fahrzeuges vor dem Ende einer vollen Stunde liegt. Die Anzahl der Umsteiger einer Umsteigerelation errechnet sich aus der Summe aller Fahrgäste, die diese Relation innerhalb einer Stunde benützen.

$$F_{Ur}^H = \sum_{t \in H} F_{Ur}^t \quad (35)$$

F_{Ur}^H	Anzahl aller Umsteiger einer Umsteigerrelation in einer Stunde [-]
F_{Ur}^t	Anzahl Umsteiger zwischen zwei Servicefahrten einer Umsteigerrelation zum Zeitpunkt t [-]
H	Menge aller Umsteigeverbindungen einer Umsteigerrelation in einer Stunde [-]

Die Kennzahl mittlere Umsteigezeit einer Umsteigerrelation für eine Stunde wird mit der Anzahl der Umsteiger einer Umsteigeverbindung entsprechend gewichtet und errechnet sich wie folgt:

$$t_{Ur}^{H_{\text{mittel}}} = \frac{\sum_{t \in H} (t_{Ur}^t * F_{Ur}^t)}{F_{Ur}^H} \quad (36)$$

$t_{Ur}^{H_{\text{mittel}}}$	Mittlere Umsteigezeit einer Umsteigerrelation in einer Stunde [min]
------------------------------	---

Weisen die beiden Linien, deren richtungsbezogene Linienrouten die Umsteigerrelation beschreiben, innerhalb einer Stunde den gleichen Takt auf, so sind die Umsteigezeiten aller Umsteigeverbindungen konstant. Derselbe Effekt tritt ein, wenn der größere Takt einer Linie ein ganzzahliges Vielfaches der anderen Linie beträgt. Werden die errechneten Stundenwerte zeitentsprechend aneinandergereiht so kann der Tagesverlauf dieser beiden Kennzahlen in Form einer Ganglinie, wie aus folgender Abbildung hervorgeht, dargestellt werden. Zusätzlich ist die benötigte Übergangszeit zwischen zwei Haltepunkten dargestellt. Nachdem die Umlegungsberechnung immer nur tatsächlich erreichbare Verbindungen berücksichtigt, nimmt im Idealfall (Anschluss mit keiner Wartezeit) der Kennwert mittlere Umsteigezeit dieselbe Dauer wie die Übergangszeit ein.

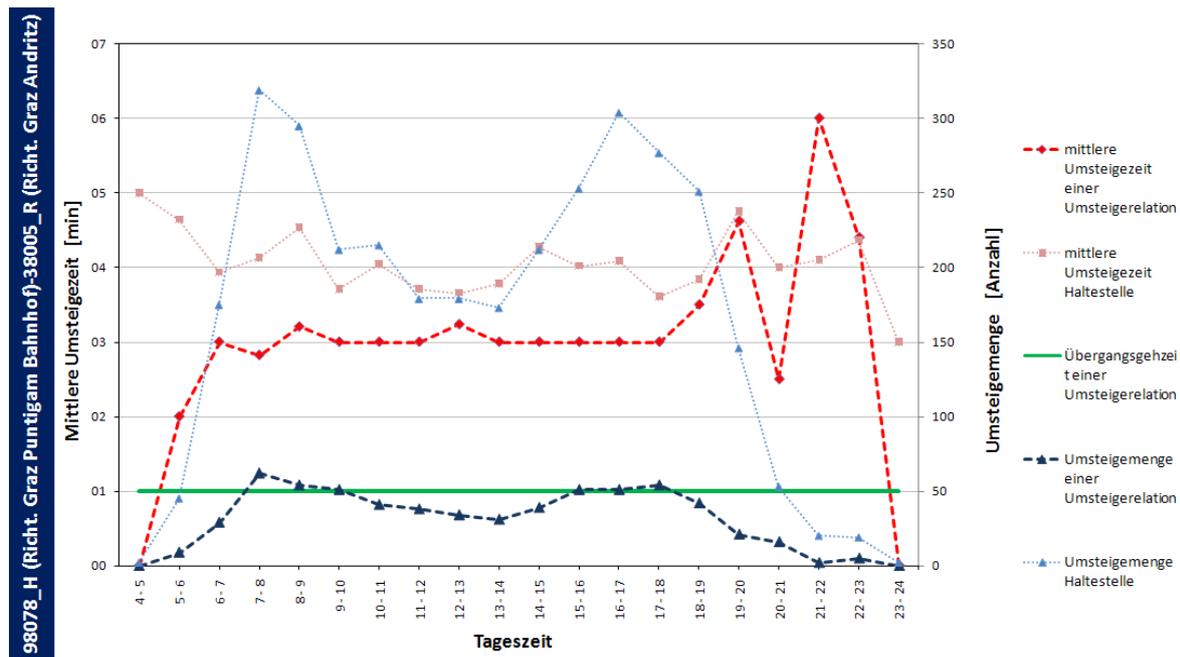


Abb. 27 Beispiel für den Verlauf der Kenngrößen Anzahl Umsteiger und mittlere Umsteigezeit einer Umsteigerelation und der Umsteigesituation der Haltestelle

Nachdem auch die mittlere mit der Gesamtnachfrage gewichteten Umsteigezeit und die Anzahl der Umsteiger aller Umsteigerelationen einer Haltestelle dargestellt werden, ist eine Aussage über die Qualität einer Umsteigerelation im Bezug auf die Gesamtumsteigesituation an einer Haltestelle möglich. Des Weiteren stellen die Tagesganglinien der mittleren Umsteigezeit und die Anzahl der Umsteiger eine gute Vergleichsmöglichkeit zwischen der Veränderung einer Umsteigerelation vor und nach der Optimierung dar. Entsprechend der gewählten Zeitspanne werden auf Basis der Stundenwerte die mittlere Umsteigezeit und die Umsteigemengen für die definierte AP jeder Umsteigerelation im betrachteten Netz ermittelt.

5.4.4 Potentielle Wartezeit von Umsteigerelation und von Linien

Zur Analyse des Potentials von Umsteigerelationen wird die potentielle Wartezeit eingeführt. Darunter ist die Summe der Wartezeiten aller Fahrgäste an einer Umsteigerelation, abzüglich der Übergangsgezeit und der definierten Mindestwartezeiten zu verstehen. Nimmt die potentielle Wartezeit einer Umsteigerelation bei vorhandener Nachfrage den Wert null an, so tritt keine Wartezeit für Fahrgäste auf. Die potentielle Wartezeit gibt prinzipiell das mögliche zeitliche Einsparungspotential einer Umsteigerelation an. Eine Umsteigerelation wird nicht nur durch die Umsteigezeit einer Verbindung bewertet, sondern die Wartezeit wird mit der Nachfrage multipliziert. Dadurch ist die Grundlage für einen nachfrageabhängigen Fahrplan gegeben, bei dem jede Wartezeitminute eines Fahrgastes gleichwertig berücksichtigt wird. Beispielsweise könnte eine Verkürzung der Wartezeit von drei Minuten für zehn Fahrgäste einer Verbindung x ein Einsparungspotential von 30 Wartezeitminuten bringen. Eine Verkürzung von einer Minute für 50 Fahrgäste einer Verbindung y ermöglicht jedoch eine Einsparung von 50 Wartezeitminuten. Bei

Gesamtbetrachtung der beiden Verbindungen kann trotz einer fünfminütigen Verschlechterung der Verbindung x und bei gleichzeitiger Verbesserung der Verbindung y um nur einer Minute eine gleich gute Verbindungsqualität erzielt werden. Mit den Kenngrößen mittlere Umsteigezeit und Umsteigemenge der definierten Analyseperiode kann die potentielle Wartezeit einer Umsteigerelation aus folgender Formel errechnet werden:

$$t_{Ur}^{Wpot} = (t_{Ur}^{APmittel} - t_{Ur}^{\ddot{U}} - t_{Ur}^{Wmin}) * F_{Ur}^{AP} \quad (37)$$

t_{Ur}^{Wpot}	Potentielle Wartezeit einer Umsteigerelation in einer AP [min]
$t_{Ur}^{APmittel}$	mittlere Umsteigezeit einer Umsteigerelation in einer AP [min]
$t_{Ur}^{\ddot{U}}$	Übergangsgezeit einer Umsteigerelation [min]
t_{Ur}^{Wmin}	Mindestwartezeit einer Umsteigerelation [min]
F_{Ur}^{AP}	Anzahl aller umsteigenden Fahrgäste einer Umsteigerelation in einer AP [-]

Die mittlere Umsteigezeit einer Umsteigerelation in einer AP ist aus der mit der Nachfrage gewichteten stündlichen mittleren Umsteigezeit bestimmbar.

$$t_{Ur}^{APmittel} = \frac{\sum_{H \in AP} (t_{Ur}^{Hmittel} * F_{Ur}^H)}{F_{Ur}^{AP}} \quad (38)$$

$t_{Ur}^{Hmittel}$	Mittlere Umsteigezeit einer Umsteigerelation einer Stunde H in einer AP [min]
F_{Ur}^H	Anzahl aller Umsteiger einer Umsteigerelation einer Stunde H in einer AP [-]

Je kleiner die Summe der potentiellen Wartezeit einer Umsteigerelation ist, umso kleiner ist die mittlere Wartezeit für einen Fahrgast. Ein niedriger Wert der potentiellen Wartezeit einer Umsteigerelation kann folgendes bedeuten:

- Eine Anschlussverbindung mit großer Nachfrage ist zeitlich gut abgestimmt. Somit treten nur kurze Wartezeiten auf.
- Eine Umsteigerelation hat nur eine geringe Nachfrage. Mittlere bis größere Wartezeiten verlieren dadurch an Bedeutung.

In einem nächsten Schritt werden alle potentiellen Wartezeiten von Umsteigerelationen entlang einer Linie oder eines Linienbündels aufsummiert. Dabei ist es egal, ob es sich um eine Zu- oder Abbringerlinie handelt. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird nur mehr der Begriff Linie verwendet, obwohl es sich dabei auch um ein Linienbündel handeln kann. Die potentielle Wartezeit entlang einer Linie errechnet sich aus folgender Formel.

$$t_L^{W_{pot}} = \sum_{Ur \in L} t_{Ur}^{W_{pot}} \quad (39)$$

$t_L^{W_{pot}}$ Potentielle Wartezeit einer Linie (eines Linienbündels) in einer AP [min]

Eine auftretende Wartezeit einer Umsteigerelation wird somit der Zubringerlinie und der Anschlusslinie zugeordnet. Die Summe der potentiellen Wartezeiten innerhalb eines Netzes entspricht dem Doppelten der tatsächlichen Wartezeit aller Fahrgäste. Mit dieser Vorgehensweise erfolgt einerseits eine linienbezogene Berücksichtigung der Umsteigenachfrage und andererseits kann über die Qualität der Umsteigesituation entlang einer Linie eine Aussage abgeleitet werden. Jene Linie mit der größten potentiellen Wartezeit ist somit bekannt. Linien mit größeren potentiellen Wartezeiten werden aufgrund des größeren Verbesserungspotentials zuerst für die Optimierung herangezogen. Je näher sich ein Fahrplan dem Optimum, der minimalen Wartezeit in einem Netz, nähert, umso kleiner wird das Verbesserungspotential.

5.4.5 Reihung der Linien und Linienwahl zur Optimierung

Die Reihung der Linien erfolgt absteigend nach der potentiellen Wartezeit einer Linie. Somit erhält jede Linie einen Rang R . Es werden nur Linien oder Linienbündel berücksichtigt, bei denen Fahrplanänderungen möglich sind. Ein vollständiger Optimierungsdurchlauf i liegt dann vor, wenn sich eine Änderung im Fahrplan ergibt und für diese eine Umlegungsberechnung erfolgt. In jedem Optimierungsdurchlauf wird eine neue Reihung der Linien vorgenommen. Die Linienwahl gibt an, welche Linie auf Basis der Linienreihung zur Fahrplanoptimierung herangezogen wird. Im ersten Optimierungsdurchlauf $i = 1$ wird zuerst die Linie mit dem Rang $R = 1$ betrachtet. Im Falle, dass diese Linie kein Optimierungspotential aufweist, werden so lange Linien mit dem Rang $R = R + 1$ untersucht, bis eine Linie mit einem Verbesserungspotential gefunden wird. Nachdem die neuen Abfahrtszeiten bestimmt sind wird der erste Optimierungsdurchlauf mit einer Umlegungsberechnung beendet. Nachdem Umlegungen nur gerechnet werden, wenn sich Änderungen im Fahrplan ergeben, ist der erforderliche Rechenaufwand minimal. Beim zweiten Optimierungsdurchlauf wird wieder die Linie mit dem Rang $R = 1$ als erstes herangezogen. Zusätzlich erfolgt eine Abfrage, ob einerseits eine Optimierung j dieser Linie im Optimierungsdurchlauf $i = i - 1$ oder noch früher bereits durchgeführt wurde und ob sich andererseits die potentielle Wartezeit dieser Linie im Vergleich zur Optimierung $j = j - 1$ verändert hat. Wenn eine Optimierung im vorangegangenen Optimierungsdurchlauf vorgenommen wurde, dann ist die Linie mit dem Rang $R = R + 1$ zu wählen. Liegt eine Optimierung einer Linie dem Optimierungsdurchlauf $i = i - 2$ oder noch weiter zurück, erfolgt ein Abgleich der potentiellen Wartezeit der Linie des aktuellen Optimierungsdurchlaufes mit jener der Optimierung $j = j - 1$ dieser Linie. Sind die potentiellen Wartezeiten ident, bedeutet dies, dass der zuletzt durchgeführte Optimierungsdurchlauf keine Auswirkungen auf die aktuell betrachtete Linie hat und die Linie mit dem nächsten Rang $R = R + 1$ zu betrachten ist. Diese Abfrage bringt eine Ersparnis an Rechenaufwand, da keine weiteren Optimierungsberechnungen notwendig sind. Bei Nichtübereinstimmung der potentiellen Wartezeit oder keiner bereits durchgeführten Optimierung,

erfolgt die Abfrage über die Erlaubnis der Variation der Wendezeit, um anschließend die entsprechende Optimierung zu tätigen. Erreicht die zu optimierende Linie den Rang, der der Anzahl der zeitlich verschiebbaren Linien entspricht, bedeutet dies, dass alle Linien optimiert sind. Das Optimierungsverfahren wird beendet und der Fahrplan mit dem lokalen Minimum der gesamten Wartezeit liegt vor. Im folgenden Flussdiagramm ist die Logik für die Linienwahl dargestellt.

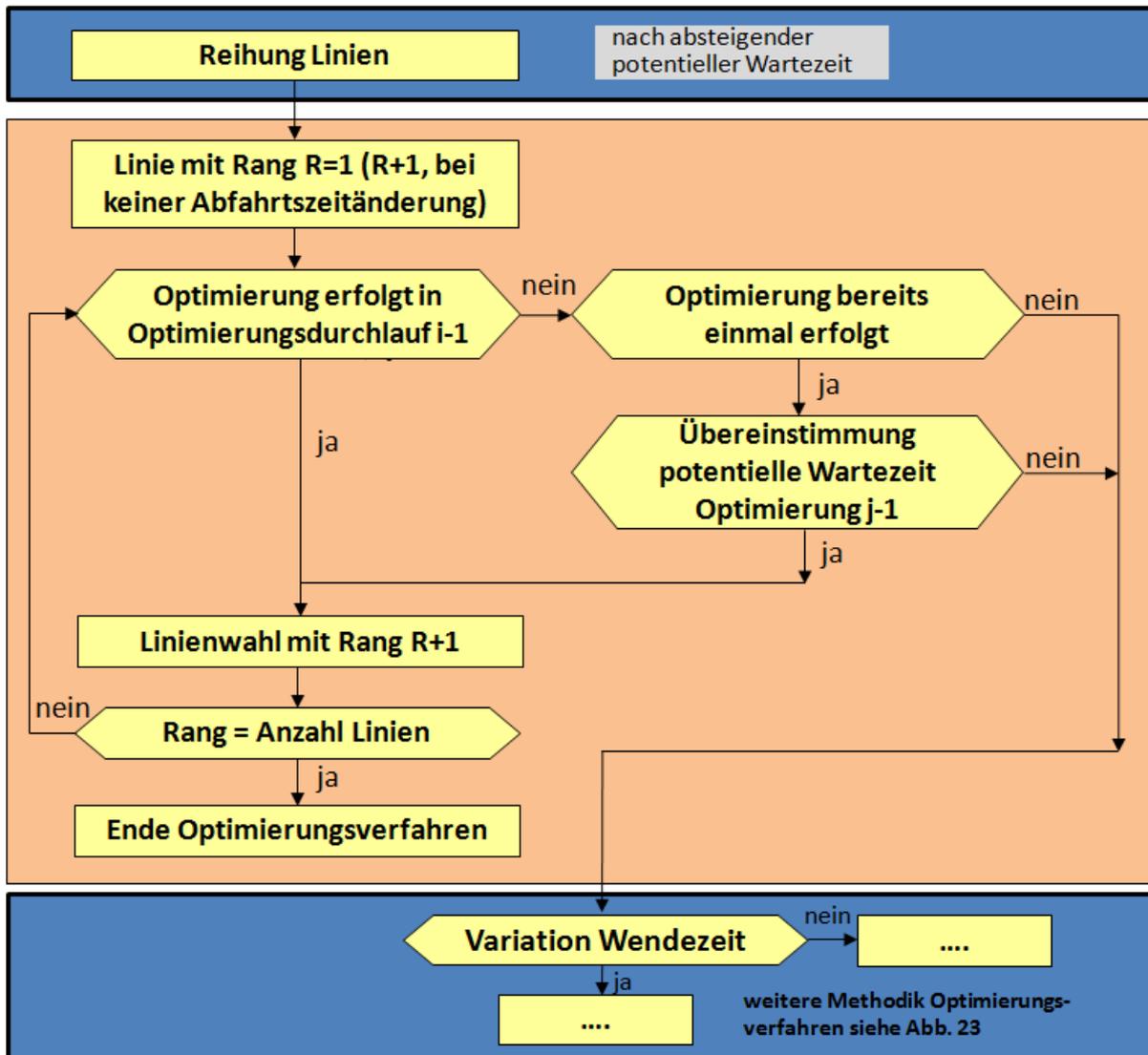


Abb. 28 Logik der Linienwahl für Optimierung

5.4.6 Optimierung Abfahrtszeiten einer Linie

Eine Optimierung der Abfahrtszeiten erfolgt immer nur an einer Linie. Dabei treten niemals Verschlechterungen der potentiellen Wartezeiten auftreten. Durch jede Optimierungssiteration erfolgt eine Verbesserung des Gesamtfahrplanes. Im ungünstigsten Falle erfolgt keine zeitliche Verschiebung der Abfahrtszeiten der Linie, wenn das Wartezeitenminimum bereits vorhanden ist. Im Zuge der Optimierung einer Linie werden alle Abfahrtszeiten von Servicefahrten innerhalb der

gewählten AP um jeweils eine Minute so lange verschoben bis der gesamte aufsummierte Zeitversatz dem Taktintervall der Linie entspricht. Bei einer zeitlichen Verschiebung im Ausmaß des Taktes tritt die Ausgangslösung wieder ein, da alle Servicefahrten um denselben Zeitabstand verschoben werden. Für jede zeitliche Verschiebung erfolgt die Ermittlung der potentiellen Wartezeit der Linie. Bei Anschlussverbindungen, die ein Fahrgast aufgrund der späteren Ankunftszeit des ersten Fahrzeuges nicht mehr erreichen kann, wird die Wartezeit bis zur Abfahrt des nächstmöglich erreichbaren Anschlussfahrzeuges ermittelt. Ist für ein Anschlussfahrzeug die Wahl einer späteren Verbindung möglich, wird die kleinstmögliche Wartezeit errechnet. Aus der Menge aller Verschiebungen wird die Lösung mit der minimalen potentiellen Wartezeit der Linie für die weiterführenden Iterationen herangezogen. Durch die Änderungen der potentiellen Wartezeit kann eine Linie mehrmals die Optimierung durchlaufen. Für die weiterführende Optimierung ist es von Bedeutung, ob die Wendezeiten zwischen den zwei Endhaltestellen einer Linie variieren dürfen. Im Falle variabler Wendezeiten ergibt sich durch ungleichmäßiges Verschieben der Abfahrtszeiten der beiden Richtungen zusätzliches Einsparungspotential an Wartezeit.

Verschiebung Abfahrtszeit einer Linie mit fixen Wendezeiten

Durch Verschieben der Abfahrtszeit der Linie mit der größten potentiellen Wartezeit ist die Basis mit der größten Wirkung bekannt. Im Falle fixer Wendezeiten ergibt sich aufgrund der gleich großen Aufenthaltsdauern an den beiden Endhaltestellen folgender Zusammenhang:

$$t_{LH}^{We} = t_{LR}^{We} = 0,5 * t_L^{We_{ges}} \quad (40)$$

$t_L^{We_{ges}}$ Gesamte Wendezeit eines Umlaufes einer Linie [min]

t_{LH}^{We}, t_{LR}^{We} Wendezeit einer Linie nach der Fahrt in Hinrichtung H bzw. in Rückrichtung R [min]

Die aktuelle Abfahrtszeit einer Linienroute errechnet sich durch Addition der zeitlichen Verschiebung einer Linie und der Abfahrtszeit der Startlösung. Unter der Startlösung ist jene Abfahrtszeit zu verstehen, die für den aktuellen Optimierungsschritt herangezogen wird. Dies kann der Zeitpunkt aus der Ausgangslösung oder aus einem bereits durchgeführten Optimierungsschritt sein.

$$t_{LH}^{Ab} = t_{LH}^{Ab_0} + S_i \quad (41)$$

t_{LH}^{Ab}, t_{LR}^{Ab} aktuelle Abfahrtszeit einer Linienroute in Hinrichtung H bzw. in Rückrichtung R [hh:mm]

$t_{LH}^{Ab_0}, t_{LR}^{Ab_0}$ Abfahrtszeit einer Linienroute in Hinrichtung H bzw. in Rückrichtung R der Startlösung [hh:mm]

S_i aktuelle zeitliche Verschiebung einer Linie [min]

Die aktuelle Abfahrtszeit einer Linienroute in Rückrichtung wird analog zur Hinrichtung gebildet, wobei die Verschiebungen beider Richtungen ident sind. Die Größe des möglichen Verschieberegions von Abfahrtszeiten entspricht dem Taktintervall.

$$S_{LH} = S_{LR} = T_L$$

T_L Taktintervall einer Linie in einer AP [min]

S_{LH}, S_{LR} Größe Verschiebungsbereich der Abfahrtszeiten der Servicefahrten einer Linie in Hinrichtung H bzw. in Rückrichtung R [min]

Zur Veranschaulichung ist der mögliche Verschiebungsbereich einer Linie in einem grafischen Bildfahrplan dargestellt.

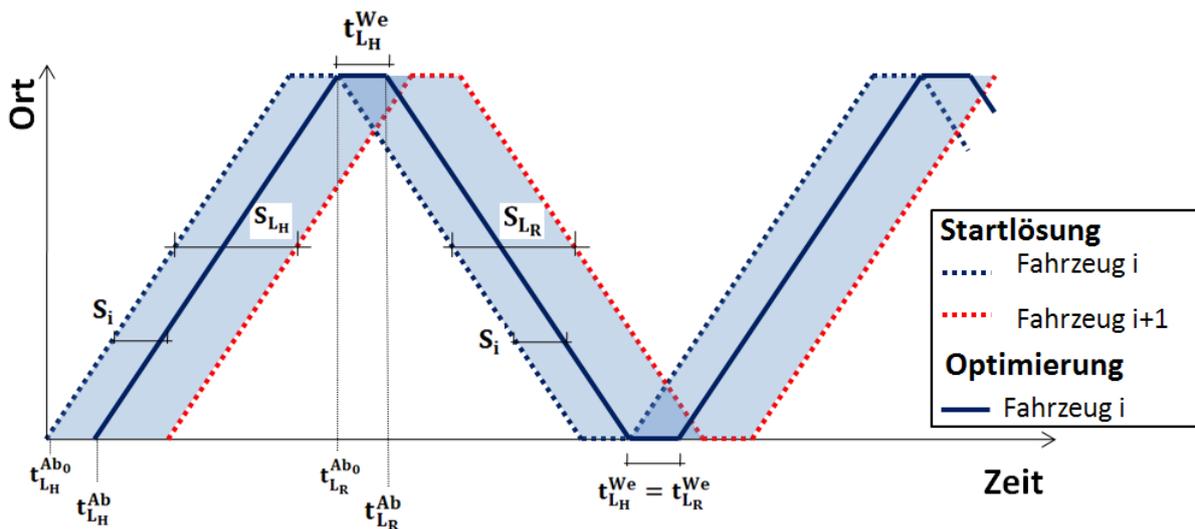


Abb. 29 Bildfahrplan mit Verschiebungsbereich der Abfahrtszeiten bei fixen Wendezeiten

Der zeitliche Versatz ist für Linienrouten beider Richtungen ident und ist somit der einfachere Optimierungsfall.

Optimierung einer Linie mit fixen Wendezeiten

Durch zeitliche Verschiebungen von Abfahrtszeiten einer Linie im Zuge einer Optimierungsiteration treten Änderungen der Umsteigezeiten entlang dieser Linie auf. Abfahrtszeiten einer Linie werden bis zu jenen des Folgefahrzeuges derselben Linie jeweils um eine Minute verschoben. Für die erforderliche Minimierung der Wartezeiten für Fahrgäste entlang der Linie ergibt sich folgende Zielfunktion:

$$\min_{S_i \in T_L} t_{L,S_i}^{W_{pot}} \quad (42)$$

$t_{L,S_i}^{W_{pot}}$ Potentielle Wartezeit einer Linie bei einer zeitlichen Verschiebung S_i der Abfahrtszeiten der Servicefahrten [min]

Dabei sind folgende Nebenbedingungen zu erfüllen:

$$\begin{aligned} 0 &\leq S_i \leq T_L \\ S_i &\in \mathbf{N}_0 \end{aligned}$$

Es wird jene Lösung ermittelt, die unter Berücksichtigung aller Zu- und Abbringer für diese Linie das globale Minimum an potentieller Wartezeit darstellt. Durch Verschieben der Abfahrtszeiten der Linienrouten kann die Differenz zwischen Umsteigezeit, Übergangsgezeit und Mindestwartezeit für einen Fahrgast null werden. Dies ist der Optimalfall für eine Umsteigerelation, da keine Wartezeiten für Fahrgäste auftreten. Wenn der Fahrgast auf die Verbindung des Folgefahrzeuges wieder warten muss, steigt die potentielle Wartezeit wieder sprunghaft an. Eine Anschlussverbindung kann nicht mehr erreicht werden, wenn die Umsteigezeit zwischen zwei Servicefahrten einer Umsteigerelation mit der Übergangsgezeit und mit der Mindestwartezeit vermindert kleiner als null wird:

$$t_{Ur}^{U_t} - t_{Ur}^{\ddot{U}} - t_{Ur}^{W_{min}} - S_i < 0 \quad (43)$$

$t_{Ur}^{U_t}$ Umsteigezeit zwischen zwei Servicefahrten einer Umsteigerelation zu einem Zeitpunkt t [min]

$t_{Ur}^{\ddot{U}}$ Übergangsgezeit einer Umsteigerelation [min]

$t_{Ur}^{W_{min}}$ Mindestwartezeit einer Umsteigerelation [min]

Die Umsteigezeit ist dabei die Differenz aus Abfahrts- und Ankunftszeit.

$$t_{Ur}^{U_t} = t_{L_j}^{Abz} - t_{L_k}^{Anz} \quad (44)$$

$t_{L_j}^{Abz}$ Abfahrtszeit einer Servicefahrt der Linie j an der Haltestelle Z [hh:mm]

$t_{L_k}^{Anz}$ Ankunftszeit einer Servicefahrt der Linie k an der Haltestelle Z [hh:mm]

Für den Fall, dass die verschobene Linie k die Zubringerlinie einer Anschlussverbindung ist und ein größeres Taktintervall als jenes der Abbringerlinie j aufweist ($T_{L_k} > T_{L_j}$), erfolgt eine spätere Ankunftszeit der Fahrzeuge an der Umsteigehaltestelle. Wird ein Erreichen der Anschlussverbindung der Linie j dadurch nicht mehr möglich, wird die nächstmögliche erreichbare Verbindung der Linie j berücksichtigt. Die neue Umsteigezeit dieser Umsteigerelation errechnet sich dabei aus folgender Formel:

$$t_{Ur}^{Ut} = t_{L_j}^{Abz} + n_j * T_{L_j} - t_{L_k}^{Anz} - S_i \quad (45)$$

- T_{L_j}, T_{L_k} Taktintervall der Linie j bzw. der Linie k [min]
 n_j Anzahl der versäumten Fahrzeuge der Linie j bei Verschiebung der Abfahrtszeit der Linie k [-]

Die Anzahl der versäumten Fahrzeuge der Linie j lässt sich wie folgt berechnen:

$$n_j = \left\lceil \frac{t_{L_k}^{Anz} + S_i + t_{Ur}^{\ddot{U}} + t_{Ur}^{W_{min}} - t_{L_j}^{Abz}}{T_{L_j}} \right\rceil \quad (46)$$

Im Fall, dass der Takt der Zubringerlinie k kleiner als jener der Abbringerlinie j ($T_{L_k} < T_{L_j}$) ist, erfolgt die Berechnung der Umsteigezeit wie bei der unten angeführten zeitlichen Verschiebung der Abbringerlinie j, jedoch wird dabei n_k aufgerundet und t_{Ur}^{Ut} mit dem Faktor -1 multipliziert. Bei einer Umsteigerelation mit keiner Umsteigezeit und einem Takt der Zubringerlinie von 10 Minuten und einem der Abbringerlinie von 60 Minuten entsteht bei einer Verschiebung der Zubringerlinie um eine Minute eine Umsteigezeit von 59 Minuten. Bei Benützung der vorangegangenen Verbindung der Zubringerlinie ergibt sich jedoch eine Umsteigezeit von nur 9 Minuten. Somit werden realitätsnahe Anpassungen von Fahrgästen in ihrer Verbindungswahl berücksichtigt.

Im Fall, dass mit einem späteren Fahrzeug der Zubringerlinie k das Anschlussfahrzeug noch erreicht werden kann, errechnet sich die Umsteigezeit aus folgender Formel:

$$t_{Ur}^{Ut} = t_{L_j}^{Abz} + S_i - t_{L_k}^{Anz} - n_k * T_{L_k} \quad (47)$$

- T_{L_k} Taktintervall der Linie k [min]
 n_k Anzahl der später möglichen Fahrzeuge der Linie k mit dem ein Anschlussfahrzeug bei Verschiebung der Abfahrtszeit der Linie j erreicht werden kann [-]

Die Anzahl der später möglichen Fahrzeuge der Linie k ist wie folgt bestimmbar:

$$n_k = \left\lceil \frac{t_{L_j}^{Abz} + S_i - t_{L_k}^{Anz} - t_{Ur}^{\ddot{U}} - t_{Ur}^{W_{min}}}{T_{L_k}} \right\rceil \quad (48)$$

Mit den neuen Umsteigezeiten werden die Kenngrößen mittlere Umsteigezeit, potentielle Wartezeit einer Umsteigerelation und einer Linie berechnet und der Abfahrtszeitpunkt mit der kleinsten potentiellen Wartezeit bestimmt. Mit dem gefunden Minimum eines Fahrplanes einer Linie erfolgt

eine fahrplanfeine Umlegungsrechnung, um Änderungen in der Verbindungswahl berücksichtigen zu können. Mit den Ergebnissen der Umlegungsrechnung folgt die Optimierung der bestgereihten Linie mit obiger Vorgangsweise.

Verschiebung Abfahrtszeit einer Linie mit variablen Wendezeiten

Im Falle variabler Wendezeiten können die Aufenthaltszeiten der Fahrzeuge an den Endhaltestellen unterschiedliche zeitliche Größen einnehmen. Die Größe der Wendezeit nach der Fahrt in Hinrichtung unterliegt daher folgender unterer und oberer Grenze:

$$t_L^{We_{min}} \leq t_{LH}^{We} \leq t_L^{We_{ges}} - t_L^{We_{min}}$$

$t_L^{We_{min}}$ Minimale Wendezeit nach einer Fahrt in Hinrichtung H oder in Rückrichtung R [min]

Die zeitlichen Schranken für die Rückrichtung sind gleich jener der Hinrichtung. Die Wendezeit einer Linie nach der Fahrt in Rückrichtung ergibt sich aus der Differenz zwischen der gesamten Wendezeit und der Wendezeit nach der Fahrt in Hinrichtung.

$$t_{LR}^{We} = t_L^{We_{ges}} - t_{LH}^{We} \tag{49}$$

Nachdem eine zeitliche Verschiebung (S_i) in Rückrichtung aus der variierenden Wendezeit hinzukommt, erfolgt eine separate Betrachtung für jede Richtung.

$$S_{i,H} = S_i \tag{50}$$

$$S_{i,R} = S_i + S_{i,W} \tag{51}$$

$S_{i,H}, S_{i,R}$ aktuelle zeitliche Verschiebung in Hinrichtung H bzw. in Rückrichtung R einer Linie [min]

$S_{i,W}$ zeitliche Verschiebung aus Variation der Wendezeiten einer Linie [min]

Die zusätzliche zeitliche Verschiebung aus der Variation der Wendezeit einer Linie errechnet sich aus der Differenz der Wendezeit in Hinrichtung H der aktuellen Lösung und jener der Startlösung.

$$S_{i,W} = t_{LH}^{We} - t_{LH}^{We_0} \tag{52}$$

$t_{LH}^{We_0}$ Wendezeit einer Linie nach der Fahrt in Hinrichtung H der Startlösung [min]

Die aktuelle Abfahrtszeit und die Größe des möglichen Verschieberegions von Linienrouten in Hinrichtung sind gleich wie im Falle fixer Wendezeiten.

$$\mathbf{t}_{L,H}^{Ab} = \mathbf{t}_{L,H}^{Ab_0} + \mathbf{S}_{i,H} \quad (53)$$

$$\mathbf{S}_{L,H} = \mathbf{T}_L$$

Für jede Verschiebung von einer Minute in Hinrichtung ergeben sich aufgrund der unterschiedlich großen Wendezeiten mehrere Ausprägungen für die möglichen Abfahrten in Rückrichtung. Die Abfahrtszeit in Rückrichtung hängt noch zusätzlich von der Wendezeit in Hinrichtung und der Wendezeit der Startlösung ab.

$$\mathbf{t}_{L,R}^{Ab} = \mathbf{t}_{L,R}^{Ab_0} + \mathbf{S}_{i,R} \quad (54)$$

Der frühestmögliche Abfahrtszeitpunkt in Rückrichtung tritt ein, wenn die zeitliche Verschiebung einer Linie null wird ($\mathbf{S}_{i,H} = \mathbf{0}$) und die Wendezeit nach der Fahrt in Hinrichtung den definierten Minimalwert ($\mathbf{t}_{L,H}^{We} = \mathbf{t}_L^{We_{min}}$) einnimmt. Der späteste mögliche Abfahrtszeitpunkt tritt ein, wenn die Verschiebung der Abfahrtszeiten einer Linie die Größe des Taktintervalls hat ($\mathbf{S}_{i,H} = \mathbf{T}_L$), und die Wendezeit nach der Fahrt in Hinrichtung den maximal möglichen Wert ($\mathbf{t}_{L,H}^{We} = \mathbf{t}_L^{We_{ges}} - \mathbf{t}_L^{We_{min}}$) einnimmt. Bei der Berechnung der Größe der zeitlichen Verschiebung wird dabei unterschieden, ob der aktuelle Abfahrtszeitpunkt vor oder nach jenem der Startlösung liegt. Bei früherer Abfahrt ($\mathbf{t}_{L,R}^{Ab} < \mathbf{t}_{L,R}^{Ab_0}$) beträgt die maximale Verschiebung folgendermaßen:

$$\mathbf{S}_{L,R}^f = \mathbf{t}_{L,H}^{We_0} - \mathbf{t}_L^{We_{min}} \quad (55)$$

$\mathbf{S}_{L,R}^f$ Verschieberegion der Abfahrtszeiten der Servicefahrten einer Linie in Rückrichtung R, wenn der Abfahrtszeitpunkt vor jenem der Startlösung ist [min]

Bei späterer Abfahrt als bei der Startlösung ($\mathbf{t}_{L,R}^{Ab} > \mathbf{t}_{L,R}^{Ab_0}$) ist die maximale Verschiebung folgendermaßen:

$$\mathbf{S}_{L,R}^s = \mathbf{T}_L - \mathbf{t}_{L,H}^{We_0} + \mathbf{t}_L^{We_{ges}} - \mathbf{t}_L^{We_{min}} \quad (56)$$

$\mathbf{S}_{L,R}^s$ Verschieberegion der Abfahrtszeiten der Servicefahrten einer Linie in Rückrichtung R, wenn der Abfahrtszeitpunkt nach jenem der Startlösung ist [min]

Die gesamte Größe des Verschieberegions von Abfahrtszeiten der Servicefahrten in Rückrichtung errechnet sich aus der Summe der Verschieberegions vor und nach dem Abfahrtszeitpunkt der Startlösung.

$$\mathbf{S}_{L,R} = \mathbf{S}_{L,R}^f + \mathbf{S}_{L,R}^s = \mathbf{T}_L + \mathbf{t}_L^{We_{ges}} - 2 * \mathbf{t}_L^{We_{min}} \quad (57)$$

Bei variablen Wendezeiten ist der Verschiebepbereich für die Hinrichtung einer Linie gleich groß wie bei fixen Wendezeiten. Jedoch ist der Verschiebepbereich für die Rückrichtung deutlich größer.

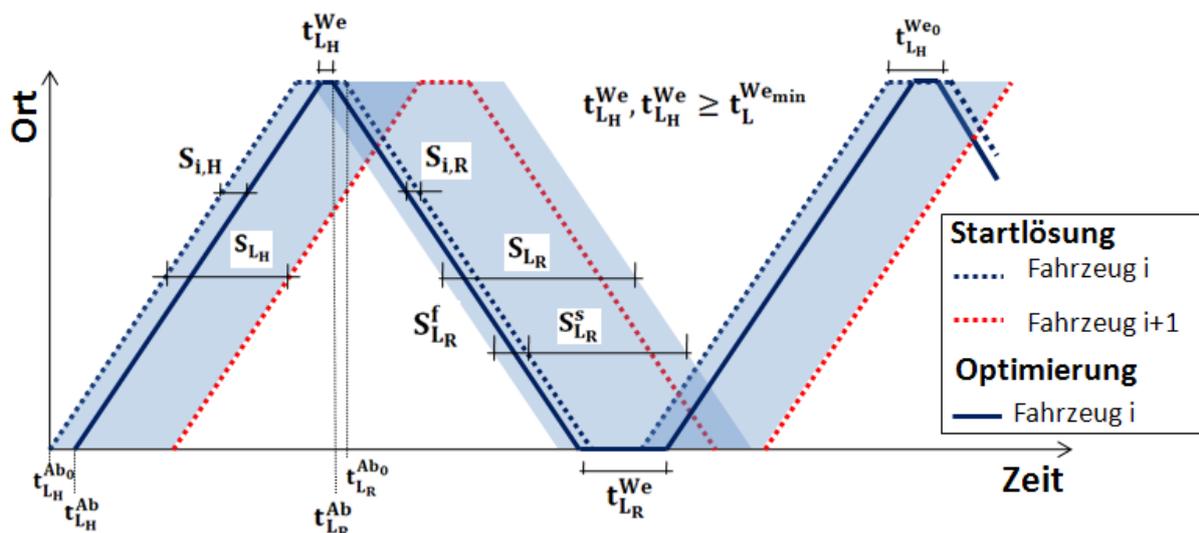


Abb. 30 Bildfahrplan mit Verschiebepbereich der Abfahrtszeiten bei variablen Wendezeiten

Ist eine minimale Wendezeit an einer Endhaltestelle von null möglich, so tritt an der anderen Endhaltestelle die größtmögliche Wendezeit auf.

Optimierung einer Linie mit variablen Wendezeiten

Auch im Falle variabler Wendezeiten werden die potentiellen Wartezeiten von Linien auf mögliche Verbesserungen für Umsteiger untersucht. Der Unterschied zur Optimierung mit fixen Wendezeiten liegt darin, dass es mehr Möglichkeiten in der Ausprägung eines Linienfahrplans durch die variablen Wendezeiten gibt. Eine Teilung der Optimierung in Hin- und Rückrichtung wird erforderlich, wobei die Optimierung der Hinrichtung analog mit fixen Wendezeiten ist. Für die Optimierung der Rückrichtung erfolgt eine zusätzliche Variation der Abfahrtszeiten in Abhängigkeit der aktuellen Verschiebung in Hinrichtung. Für die Minimierung der Wartezeiten für Fahrgäste entlang der Linie leitet sich folgende Zielfunktion ab:

$$\min_{S_i \in T_L} \left(t_{L,S_i,H}^{W_{pot}} + t_{L,S_i,R}^{W_{pot}} \right) \quad (58)$$

$t_{L,S_i,H}^{W_{pot}}, t_{L,S_i,R}^{W_{pot}}$

Potentielle Wartezeit der Hinrichtung H bzw. Rückrichtung R einer Linie bei einer zeitlichen Verschiebung S_i der Abfahrtszeiten aller Servicefahrten [min]

Dabei sind folgende Nebenbedingungen zu erfüllen:

$$\begin{aligned}
 0 &\leq S_{i,H} \leq T_L \\
 S_{i,H} &\in \mathbf{N}_0 \\
 S_{i,R} &= S_{i,H} + S_{i,W} \\
 t_L^{We_{\min}} - t_{LH}^{We_0} &\leq S_{i,W} \leq T_L - t_{LH}^{We_0} + t_L^{We_{\text{ges}}} - t_L^{We_{\min}} \\
 S_{i,R} &\in \mathbf{Z}
 \end{aligned}$$

Wird die Wartezeit einer Umsteigerrelation durch Verschieben von Abfahrtszeiten einer Linie kleiner als null, können spätere Ab- oder Zubringer einer Umsteigerrelation von Fahrgästen wahrgenommen werden. Die mathematische Beschreibung dazu ist wie bei der Optimierung bei fixen Wendezeiten. Erfolgt eine Veränderung am Fahrplan einer Linie, so wird eine Umlegung berechnet, um Änderungen in der Nachfrage und der Routenwahl mit dem neu gefundenen Fahrplan in weiterer Folge berücksichtigen zu können.

5.4.7 Abbruch des Verfahrens

Der Abbruch des Verfahrens und somit die optimale Lösung der Fahrplangestaltung ist dann erreicht, wenn die Summe der potentiellen Wartezeit das globale Minimum erreicht. Das ist dann der Fall, wenn für jede Linie die minimale potentielle Wartezeit gefunden ist und keine einzige Verschiebung von Abfahrtszeiten eine Verbesserung bringen würde. Mehrere Optimierungsiterationen einer Linie erfolgen, wenn durch Verschiebungen der Abfahrtszeiten anderer kreuzender oder treffender Linien sich wieder Potentiale der Linie ergeben. Somit ist es möglich, dass eine Linie fünf Mal und eine andere nur einmal die Optimierung nach der potentiellen Wartezeit durchläuft. Neben der Lösung des globalen Minimums, besteht auch die Möglichkeit, das Verfahren nach folgenden anderen Kriterien abubrechen:

- definierte Anzahl an Optimierungsdurchläufen oder
- mindestens ein Optimierungsdurchlauf pro Linie.

6 Modellbeispiel und Vergleichsrechnung

Im Zuge der Entwicklung des Microsoft Visual Basic-Skripts wird ein Modellbeispiel entworfen um das entwickelte Verfahren zu demonstrieren. Zum Verständnis der Wirkung von Modelleinflüssen werden bei diesem Laborbeispiel einige Parameter analysiert. Dabei werden die Widerstände in der Verbindungssuche (Empfundene Reisezeit durch die Parameter Übergangsgeschwindigkeit, Wartezeit und Umsteigehäufigkeit) und vier Ansätze der Aufteilung der Nachfrage (Kirchhoff, Lohse, Logit und BoxCox) variiert und deren Auswirkungen quantifiziert. Abschließend erfolgt eine Vergleichsrechnung mit der PESP Methode von Liebchen.

6.1 Modellbeispiel

Ein Modellbeispiel, das sämtliche Steuerungsparameter und Konstellationen von Umstiegen und Linienführungen berücksichtigt, wird für die Entwicklung des Optimierungstools erstellt. Dabei wird versucht realitätsnahe Situationen, Abhängigkeiten und Einwirkungen abzubilden.

6.1.1 Beschreibung

Netz

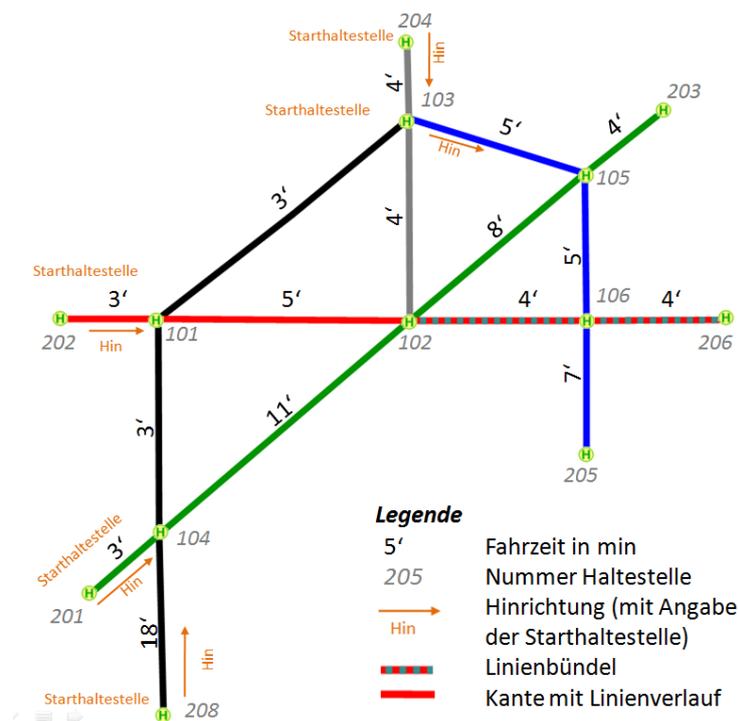


Abb. 31 Darstellung des Laborbeispiels

Das Modellbeispiel besteht aus fünf Linien, die in obiger Grafik farblich unterschiedlich dargestellt sind, und 13 Haltestellen, wovon an sechs Haltestellen ein Umstieg auf andere Linien möglich ist. Die Linienverläufe, Fahrzeiten und Starthaltestellen in Hinrichtung sind in obiger Grafik angeführt. Die Linien haben unterschiedliche Takte und die Fahrzeiten in eine Richtung liegen zwischen 16 und 24 Minuten. Die Übergangsgehzeiten zwischen Haltepunkten liegen im Bereich von 1 bis 3 Minuten. Nachdem die Linien rot und grau zur Hälfte denselben Linienverlauf haben, werden sie zu einem Linienbündel zusammengefasst.

Analyseperiode und Nachfrage

Als AP werden für das Beispiel zwei gewählt. Die Nachfrage von jeder Haltestelle zu jeder anderen Haltestelle wird mit 100 Fahrten in der Stunde eins und 200 Fahrten in der Stunde zwei gewählt.

Fahrplan

Folgende Tabelle stellt den Fahrplan der Ausgangslösung mit unterschiedlichen Taktintervallen, den Fahrzeiten, den fixen Wende- und Abfahrtszeiten der jeweils ersten Servicefahrt in Hin- und Rückrichtung dar. Die Wendezeiten liegen im Bereich von 3 bis 6 Minuten. Die Wahl der Abfahrtszeiten erfolgt dabei zufällig. Nur die Linien rot und grau sind aufgrund der Linienbündelung untereinander abgestimmt. Dadurch kann im gemeinsam befahrenen Bereich ein verbessertes Angebot durch eine Halbierung des Taktes sichergestellt werden. Eine Verschiebung der Abfahrtszeiten der Linie grün ist an diesem Beispiel nicht möglich.

Ausgangslösung	Line	Takt	Fahrzeit	Wendezeit	1. Abfahrt H	1. Abfahrt R	Potentielle Wartezeit
	schwarz	30	24	6	06:04	06:04	40.002
	rot	10	16	4	05:55	05:55	53.145
	grau	10	16	4	05:50	05:50	
	blau	10	17	3	05:50	05:50	28.292
	grün	7	26	4	05:41	05:41	fix

Tab. 2 Fahrplan der Ausgangslösung

Für die Ausgangslösung wird für jede Linie die potentielle Wartezeit berechnet. Das Linienbündel rot/grau weist die größte potentielle Wartezeit auf. Die Fahrzeuganzahl ergibt sich aus der Umlaufplanung mit zwei erforderlichen Fahrzeugen bei der Linie schwarz, je vier Fahrzeugen an den Linien rot, grau sowie blau und acht an der Linie grün. Somit ist ein Gesamtbedarf von 22 Fahrzeugen gegeben.

6.1.2 Optimierung

Für die Linien schwarz, blau und das Linienbündel rot/grau wird für die Wendezeiten ein Mindestwert definiert, siehe Tabelle 4. In der ersten Optimierungsiteration werden die Abfahrtszeiten des Linienbündels rot/grau verschoben. Der optimierte Fahrplan bringt eine Verbesserung der potentiellen Wartezeit des Linienbündels rot/grau von rund 19%. Bei der Linie blau tritt dadurch eine Verbesserung von rund 12 % und bei der Linie schwarz von rund 1 % ein. Für die zweite Optimierungsiteration der Linie schwarz erfolgt eine genauere Betrachtung. Der schwarze Balken stellt in folgender Abbildung die potentielle Wartezeit der Startlösung dar. Die grünen Balken ergeben sich aus der Verschiebung der Abfahrtszeiten bei fixen Wendezeiten. Nachdem die Linie schwarz ein Taktintervall von 30 Minuten hat, ergeben sich dafür ebenso viele Ausprägungen der potentiellen Wartezeit. Bei einer Verschiebung von 20 Minuten tritt dabei das Minimum der potentiellen Wartezeit mit einer Verbesserung von 8,3 % auf. Bei neun weiteren Verschiebungen treten bessere Lösungen auf. Erfolgt eine Definition der Mindestwendezeit von zwei Minuten, ergibt sich ein Verschiebungsbereich von acht Minuten für die Abfahrtszeit in Rückrichtung. Durch die Variation der Wendezeit an der Endhaltestelle in Hinrichtung steigt die Anzahl der theoretisch möglichen Lösungen auf 270 an. Davon weisen 109 Ausprägungen eine kleinere potentielle Wartezeit als die Startlösung auf. Das Minimum liegt bei 21.589 Minuten, hat eine Verschiebung von 11 Minuten und zusätzlich eine um drei Minuten spätere Abfahrtszeit der Rückrichtung. Ohne Berücksichtigung der Netzauswirkungen erfolgt eine Verbesserung der Wartezeit entlang der Linie schwarz von 54%.

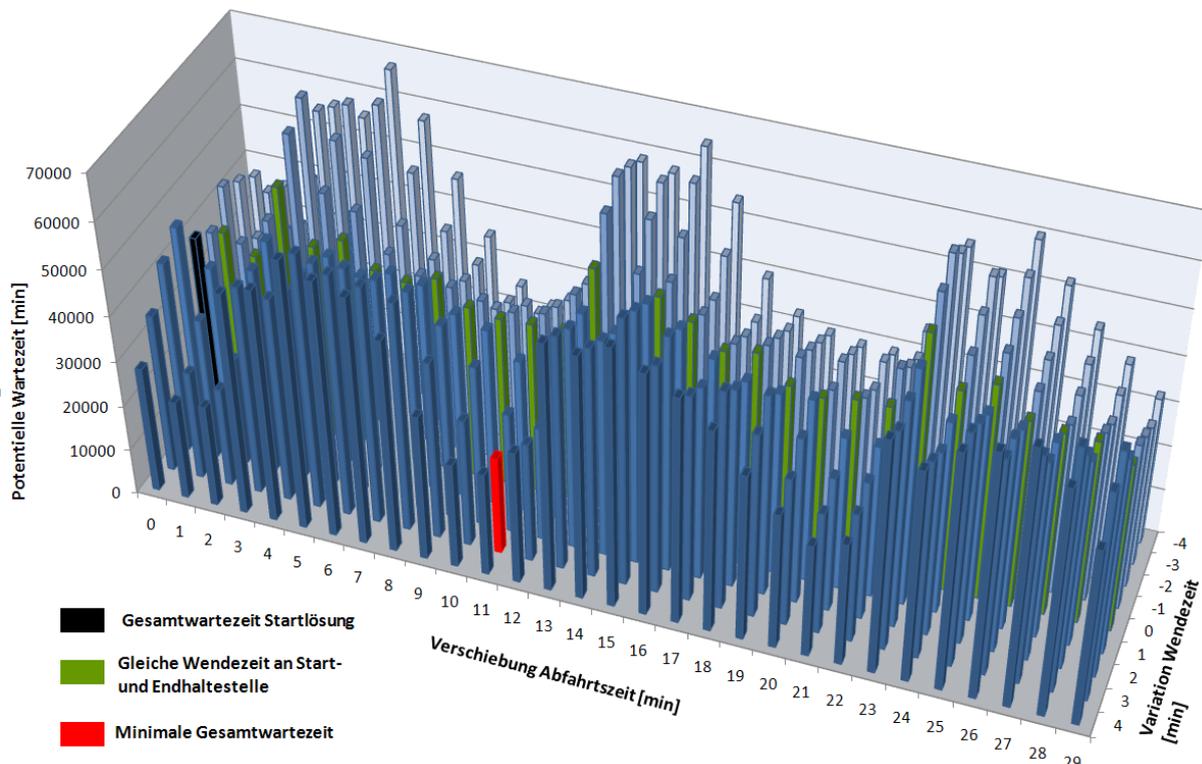


Abb. 32 Optimierung der Abfahrtszeit nach der potentiellen Wartezeit der Linie schwarz

Nach der Optimierungsiteration der Linie schwarz wird der neu errechnete Fahrplan ins Verkehrsmodell übernommen und eine neue Umlegung berechnet, um Änderungen in der Verbindungswahl zu berücksichtigen. Als nächstes erfolgt eine Optimierung der Abfahrtszeiten der Linie blau. Nach drei Optimierungsiterationen ist das lokale Minimum erreicht. Die Gesamtdauer der Fahrplanoptimierung inklusiver aller Umlegungsberechnungen für dieses Beispiel beträgt mit einem Intel(R) Core(TM) @ 3.1 GHz Prozessor (Betriebssystem: Microsoft Windows 7 mit 64-Bit-Betriebssystem) 26 Sekunden.

6.1.3 Ergebnisse

Es treten an allen drei Linien (Linienbündel) Veränderungen am Fahrplan auf. Die Wendezeiten sind an der Start- und der Endhaltestelle in Hinrichtung bei allen drei Linien unterschiedlich, wobei die definierte Minimale nach der Optimierung nicht auftritt. Folgende Tabelle zeigt den Unterschied des Fahrplanes vor und nach der Optimierung.

Ausgangslösung	Line	Takt	Fahrzeit	Wendezeit	1. Abfahrt Hin+Rück	Potentielle Wartezeit	Wendezeit			1. Abfahrt Hin	1. Abfahrt Rück	Potentielle Wartezeit
							min	Start	Ende			
Optimierung	schwarz	30	24	6	06:04	40.002	2	3	9	06:15	06:18	18.982
	rot	10	16	4	05:55	53.145	1	6	2	05:57	05:55	32.779
	grau	10	16	4	05:50		1	6	2	05:52	05:50	
	blau	10	17	3	05:50	28.292	1	2	4	05:50	05:51	14.312,5
	grün	7,5	26	4	05:41	fix	4	4	4	05:41	05:41	fix

Tab. 3 Fahrplan vor und nach der Optimierung

Die Summe der potentiellen Wartezeit von dem Linienbündel rot/grau, von der Linie schwarz und der Linie blau verbessert sich von 121.439 Minuten auf 66.073 Minuten. Mit dem optimierten Fahrplan erfolgt eine Gegenüberstellung von einigen Kenngrößen mit der Ausgangslösung.

	Ausgangsl.	Opt.	Differenz
Beförderungszeit [h]	14.147	13.263	-6%
Fahrzeit im Fz[h]	11.509	11.252	-2%
Wartezeit gesamt [h]	1.240	706	-43%
Gehzeit gesamt [h]	1.397	1.305	-7%
Umsteigehäufigkeit [-]	25.704	27.102	5%
Linienbeförderungen	72.504	73.902	2%
Direktfahrten	22.418	22.043	-2%
Fahrten mit 1 Umstieg	23.059	22.412	-3%
Fahrten mit 2 Umstiegen	1.322	2.345	77%

Tab. 4 Kenngrößenvergleich vor und nach der Optimierung

Durch die Optimierung stellt sich eine Verbesserung der Wartezeit von 43 % ein. Durch die geänderte Verbindungswahl wird die Fahrzeit im Fahrzeug um 2 % reduziert und die gesamte Übergangsgeschwindigkeit nimmt um 92 Minuten ab. Die Verbesserung der Beförderungszeit beläuft sich auf 6 %.

6.1.4 Vergleich mit fixen Wendezeiten

Für das obige Beispiel erfolgt ein Vergleich der Ergebnisse mit fixen Wendezeiten. Eine Änderung ergibt sich nur an einer Linie im Fahrplan. Die Linie schwarz startet um 16 Minuten später als in der Ausgangslösung. Alle anderen Linien haben nach der Optimierung die gleichen Abfahrtszeiten. Die Wartezeit verbessert sich um knapp 23 % und die Beförderungszeit um über 3 %. Ein genauer Fahrplan- und Kennzahlenvergleich des optimierten und nichtoptimierten Fahrplans ist im Anhang C2 zu finden.

6.1.5 Abänderung Takt

Bei einer Änderung des Taktes der Linie grün von 7,5 auf 10 Minuten und bei variablen Wendezeiten sind nur mehr sechs Fahrzeuge auf dieser Linie erforderlich. Durch diese Einsparung von zwei Fahrzeugen sind insgesamt 20 Fahrzeuge erforderlich, um das gesamte Angebot für zwei Stunden abzudecken. Mit der Optimierung kann eine Verbesserung der Wartezeit um rund 20 % bei beinahe gleicher Umsteigeanzahl erreicht werden. Genaue Ergebnistabellen finden sich im Anhang C3. Die gesamte Wartezeit und die Beförderungszeit erreichen bei einem Takt von 10 Minuten der Linie grün nach der Optimierung ähnliche Werte wie die nicht optimierte Variante mit einem 7,5 Minutentakt der Linie grün. Daraus resultiert, dass durch eine nachfrageorientierte Fahrplanoptimierung nicht nur Verbesserungen für Fahrgäste auftreten, sondern dass auch Einsparungspotential für Betreiber möglich ist. Durch größere Taktintervalle ergeben sich Fahrzeugeinsparungen aus der Umlaufplanung bei einer gleichen mittleren Beförderungszeit für Fahrgäste.

6.2 Parameter Verkehrsmodell

Zur Demonstration der verschiedenen Einflüsse und Wirkungen von Parametern in der Modellrechnung erfolgt eine Variation einiger Komponenten anhand des Laborbeispiels. Dazu werden die Auswirkungen auf die Ergebnisse der Umlegungsrechnung und deren Abhängigkeiten analysiert. Es wird auf den Widerstand einer Verbindung und auf die Aufteilung der Nachfrage bei Variation einzelner Gewichtungsfaktoren von Parametern eingegangen.

6.2.1 Verbindungssuche mittels Branch-and-Bound

Bei der Verbindungssuche mittels Branch-and-Bound wird für jeden Quellbezirk ein Suchbaum mit geeigneten Teilverbindungen in Zielbezirken generiert. Es können dabei mehrere gute Verbindungen einer Quelle-Ziel-Relation gefunden werden, auf die die Verkehrsnachfrage verteilt wird. Zur Bewertung aller Verbindungen wird ein Suchwiderstand, der sich aus der Reisezeit, der Anzahl der Umsteigevorgänge und den Gewichtungsfaktoren zusammensetzt, herangezogen.

$$\text{SuchWID} = t^R * c_R + n^{Uv} * c_{Uv} \quad (59)$$

SuchWID	Suchwiderstand einer Verbindung [min]
t^R	Reisezeit [min]
n^{Uv}	Anzahl Umsteigevorgänge [-]
c_R, c_{Uv}	Gewichtungsfaktoren der einzelnen Parameter [-]

Durch einen Vergleich von Verbindungen zu einem Ziel- oder Zwischenknoten werden nur mehr günstige Verbindungen, die nicht zu stark von der besten Verbindung abweichen, weiterverfolgt. Ein Identifizieren von ungünstigen Verbindungen erfolgt auf Basis von zu großen Suchwiderständen, zu großen Reisezeiten oder zu vielen Umstiegen im Vergleich zu den Verbindungen mit den Minimalwerten dieser Komponenten. (Vgl. PTV AG, 2011)

6.2.2 Widerstand von Verbindungen

Der Widerstand einer Verbindung setzt sich aus den Komponenten empfundene Reisezeit (ERZ) und der zeitlichen Nutzbarkeit, die mit definierbaren Koeffizienten multipliziert werden, zusammen.

$$\text{WID} = \text{ERZ} * c_{\text{ERZ}} + \Delta T_f * c_{Tf} + \Delta T_s * c_{Ts} \quad (60)$$

WID	Widerstand einer Verbindung [min]
ERZ	Empfundene Reisezeit [min]
$\Delta T_f, \Delta T_s$	Verfrühungs- bzw. Verspätungsempfindlichkeit [min]
$c_{\text{ERZ}}, c_{Tf}, c_{Ts}$	Gewichtungsfaktoren der einzelnen Parameter [-]

Es besteht auch die Möglichkeit, den Fahrpreis für den Widerstand einer Verbindung zu berücksichtigen. Jedoch gibt es keinen Zusammenhang zwischen dem Fahrpreis und dem Fahrplan. Daher wird der Fahrpreis bei den weiterführenden Untersuchungen nicht herangezogen.

Zeitliche Nutzbarkeit

Die zeitliche Nutzbarkeit berücksichtigt die zeitliche Lage im Vergleich zur Wunschabfahrtszeit und hat Einfluss auf die Attraktivität einer Verbindung. Sie ist für das Zeitintervall, in dem eine Verbindung fährt, am größten. Je kleiner die Zeitspanne zwischen tatsächlicher und gewünschter Abfahrtszeit ist, desto größer ist der Nutzen und desto kleiner der Widerstand einer Route. Die Verfrühungsempfindlichkeit errechnet sich im Falle, dass die $t^{Ab} < t^{Wu}$ ist, wie folgt:

$$\Delta T_f = t^{Wu} - t^{Ab} \quad (61)$$

t^{Wu}	Wunschabfahrtszeit einer Servicefahrt [hh:mm]
t^{Ab}	Abfahrtszeit einer Servicefahrt [hh:mm]

Sie ist in allen anderen Fällen gleich null. Die Verspätungsempfindlichkeit ergibt sich, falls die Bedingung $t^{Ab} > t^{Wu}$ eintritt, aus folgender Formulierung:

$$\Delta T_s = t^{Ab} - t^{Wu} \quad (62)$$

Die Verspätungsempfindlichkeit ist in allen anderen Fällen ebenso null. Beispielsweise beträgt die Verspätungsempfindlichkeit für ein Zeitintervall von 05:00 Uhr bis 06:00 Uhr 30 Minuten, falls eine Verbindung erst um 06:30 Uhr abfährt. Dies hat keinen Einfluss auf Linien mit kleinen Takten. Bei großen Taktintervallen und bei Einzelverbindungen spielt jedoch die Verfrühungs- und die Verspätungsempfindlichkeit eine bedeutendere Rolle.

Empfundene Reisezeit

Mittels der ERZ werden Verbindungen bei der Verbindungswahl bewertet. Im Wesentlichen setzt sich die ERZ einer Verbindung aus folgenden Elementen und Faktoren zusammen:

$$ERZ = t^{Fz} * c_{Fz} + t^W * c_W + t^Ü * c_Ü + n^{Uv} * c_{Uv} \quad (63)$$

ERZ	Empfundene Reisezeit [min]
t^{Fz}	Fahrzeit im Fahrzeug [min]
t^W	Umsteigewartezeit [min]
$t^Ü$	Übergangsgezeit [min]
n^{Uv}	Anzahl der Umstiege [-]
$c_{Fz}, c_W, c_Ü, c_{Uv}$	Gewichtungsfaktoren der einzelnen Parameter [-]

Die empfundene Reisezeit hat den stärksten Einfluss auf den Widerstand von Verbindungen. Durch Variation der Gewichtungsfaktoren von den Parametern Übergangsgezeit, Wartezeit und Umsteigeanzahl können Änderungen in der Verbindungswahl und somit bei den Belastungszahlen von Haltestellen (Ein-, Aus- und Umsteiger) sowie Linien (Personenkilometer, Personenstunden und Anzahl Linienbeförderungen) und bei den ÖV-Kenngrößen auftreten. Nachstehend erfolgt eine Untersuchung über den Einfluss der Gewichtungsfaktoren Übergangsgezeit, Umsteigewartezeit und Anzahl Umsteigevorgänge. Eine Variation des Gewichtungsfaktors der Fahrzeit im Fahrzeug wird nicht analysiert. (Vgl. PTV AG, 2011)

Bei der Gewichtung von Reisezeitkomponenten werden im TCQSM Mittelwerte und ein dazugehöriger Streubereich der Faktoren angeführt. Die Fahrzeit im Fahrzeug wird mit dem Faktor eins versehen. Die Gehzeit wird im Mittel mit dem Faktor 2,2 (Streubereich von 0,8 bis 4,4) und die Wartezeit mit dem Faktor 2,1 (Streubereich von 0,8 bis 8,1) angeführt. Wird nur die Umsteigezeit betrachtet, so liegt der durchschnittliche Faktor bei 2,5 (Streubereich von 1,1 bis 4,4). (Vgl. Transportation Research Board, 2004)

Die empfundene Reisezeit einer Verbindung kann auch durch die tatsächliche Beförderungszeit und einer Zeitstrafe für jeden Umstieg bewertet werden. Diese liegt im städtischen Verkehr bei drei Minuten und im Regional, Fernverkehr bei zehn Minuten pro Umstieg. (Vgl. Friedrich und Gerlach, 2002)

Für die im Folgenden angeführte Untersuchung werden folgende Ausprägungen mit allen Kombinationsmöglichkeiten betrachtet:

- Gewichtungsfaktor Umsteigewartezeit: 1; 2; 3
- Gewichtungsfaktor Übergangsgelzeit: 0,5; 1; 2; 3;
- Gewichtungsfaktor Anzahl Umsteigevorgänge: 0; 1; 2; 3; 4

Je nach Gewichtungsfaktoren ergeben sich Unterschiede in der ERZ einer Verbindung. Einzelne Routen von Quelle-Ziel-Beziehungen werden je nach Faktoren ab- oder aufgewertet. Dadurch kann sich im Modell eine unterschiedliche Verbindungswahl von Fahrgästen zwischen einer Quelle-Ziel-Beziehung aufgrund eines geringeren Widerstandes einstellen. Für die 60 möglichen Kombinationen der Gewichtungsfaktoren erfolgt eine Wegeanalyse. Dazu werden Belastungen aller mit Nachfrage belegten Wege für jede Konstellation berechnet. Anschließend werden für jeden Weg der Mittelwert aller 60 Belastungen und die daraus resultierende relative mittlere Abweichung bestimmt und in folgender Abbildung einander gegenübergestellt.

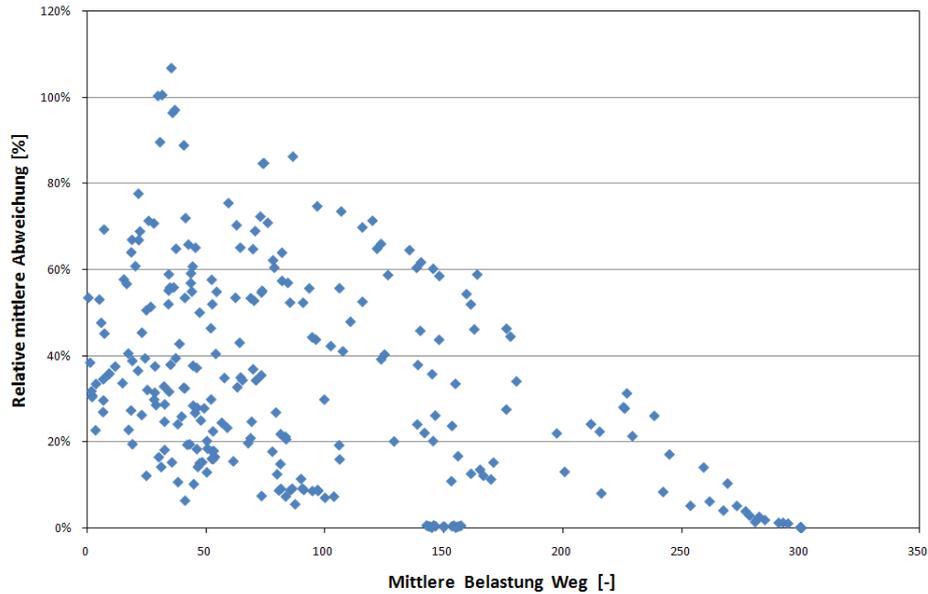


Abb. 33 Abweichungen von Wegebelastungen bei Variation der Gewichtungsfaktoren der ERZ

Tendenziell nimmt die mittlere relative Abweichung mit Zunahme der mittleren Belastung eines Weges ab. Bei einem Großteil der Belastungen (71 %) ist die mittlere relative Abweichung kleiner als 40 %. Größere Abweichungen über 60 % treten nur bei kleinen Belastungen in 13 % der Fälle auf. Die Variation der Gewichtungsfaktoren hat Auswirkungen auf die Belastungen an Haltestellen. Dabei werden die Ein- und Umsteiger untersucht. An Haltestellen ohne Umsteigemöglichkeit (Nummer 201 bis Nummer 208) bleibt die Nachfrage immer konstant.

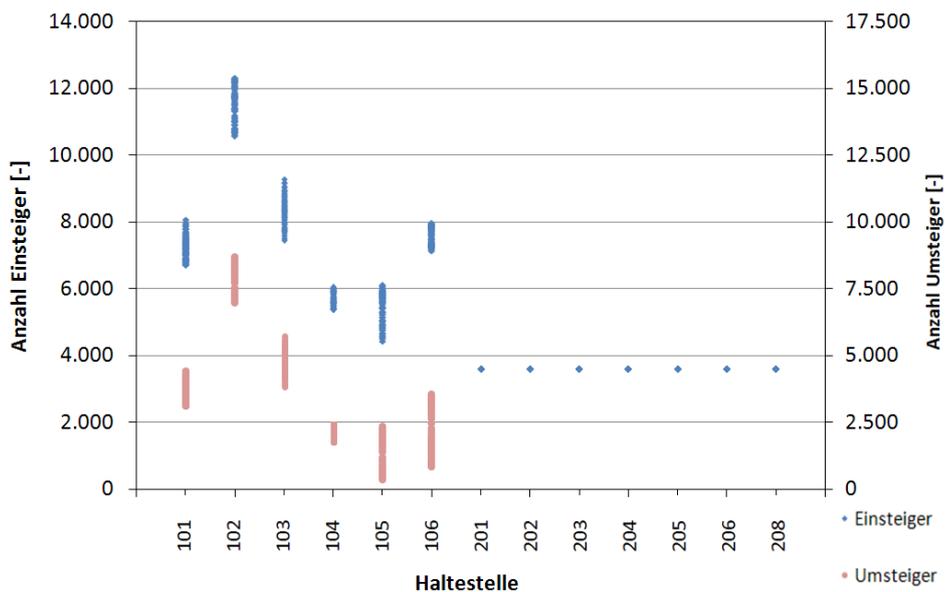


Abb. 34 Veränderung der Ein- und Umsteiger an Haltestellen bei Variation der Gewichtungsfaktoren der ERZ

An den Haltestellen der Nummern 101 bis 106 treten Schwankungen unterschiedlichen Ausmaßes bei den Ein- und Umsteigern auf. Die Einsteiger variieren an den Haltestellen 104 und 106 kaum und bei den restlichen vier Haltestellen beträgt die Spannweite rund 2.000. Nur bei kleinen Nachfragezahlen kann es daher zu großen relativen Abweichungen kommen. Bezüglich der Umsteiger tritt eine kleine Variation an der Haltestelle 104 auf. An den Haltestellen 105 und 106 ist die Spannweite knapp über 2.000 und aufgrund der kleinen Anzahl der Einsteiger kann eine weiterführende nachfrageorientierte Fahrplanoptimierung zu Unterschieden der Abfahrtszeiten führen. Durch die Änderungen der Ein- und Umsteiger treten ebenso Auswirkungen auf die Personenstunden und die Linienbeförderungsfälle auf. Die Variation dieser Kenngrößen bei unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren der ERZ ist in folgender Grafik dargestellt.

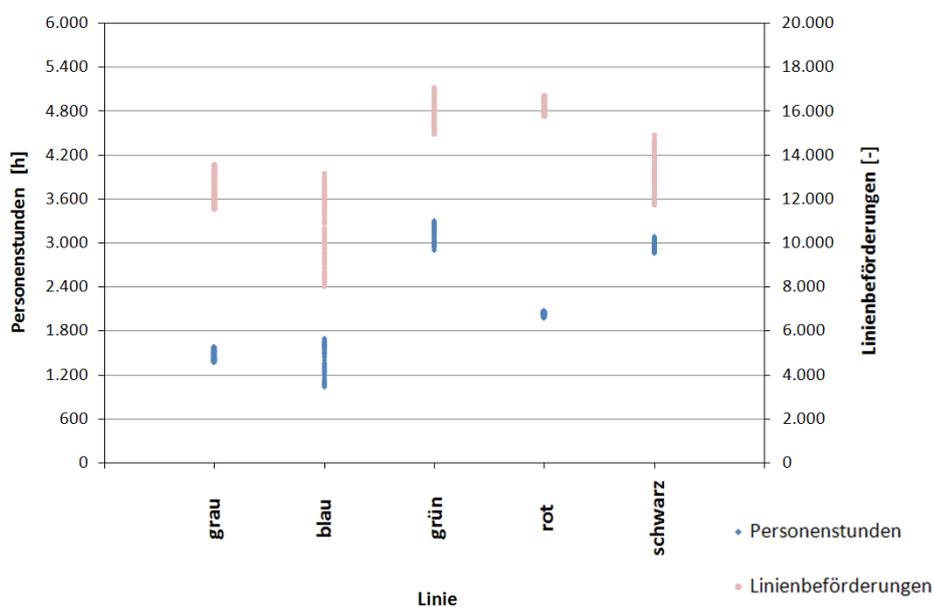


Abb. 35 Veränderung der Personenkilometer und der Linienbeförderungsfälle bei Variation der Gewichtungsfaktoren der ERZ

Besonders an den Linien blau und schwarz weist die Anzahl der Linienbeförderungsfälle durch die geänderte Verbindungswahl von Fahrgästen eine große Spannweite auf. Die Personenstunden variieren - außer bei der Linie blau - nur in einem kleinen Bereich. Für die Kennzahlen mittlere Beförderungszeit, mittlere Fahrzeit im Fahrzeug, mittlere Wartezeit, mittlere Übergangszeit, Umsteigehäufigkeit, Linienbeförderungsfälle, Direktfahrten, Fahrten mit 1 Umstieg und Fahrten mit 2 Umstiegen werden die statistischen Größen Minimum, 1. Quartil, Mittelwert, Median, 3. Quartil und Maximum errechnet.

	min	1.Quartil	Median	Mittelwert	3.Quartil	max
mittlere Beförderungszeit [s]	1.077	1.086	1.095	1.103	1.118	1.149
mittlere Fahrzeit im Fz [s]	815	832	848	845	859	867
mittlere Wartezeit [s]	64	74	84	82	91	102
mittlere Übergangsgezeit [s]	122	137	163	176	212	256
Umsteigehäufigkeit [-]	18.018	20.212	22.687	22.132	24.089	25.453
Linienbeförderungen [-]	64.818	67.012	69.487	68.932	70.889	72.253
Direktfahrten [-]	23.256	24.007	25.105	25.705	27.328	29.158
Fahrten mit 1 Umstieg [-]	17.267	18.785	20.529	20.058	21.376	21.674
Fahrten mit 2 Umstiegen [-]	375	696	1.046	1.037	1.323	1.910

Tab. 5 Statistische Kenngrößen des ÖV bei Variation der Gewichtungsfaktoren der ERZ

Anhand der Tabelle kann erkannt werden, dass sich die mittlere Beförderungszeit, die mittlere Fahrzeit im Fahrzeug und die Linienbeförderungen nur in einem geringen Ausmaß ändern. Mittlere Auswirkungen der Variation der Gewichtungsfaktoren der ERZ ergeben sich bei der mittleren Wartezeit, bei der Umsteigehäufigkeit, bei den Direktfahrten und bei den Fahrten mit einem Umstieg. Größere relative Abweichungen beim 1. und 3. Quartil liegen bei der mittleren Übergangsgezeit und bei Fahrten mit 2 Umstiegen vor. Wie in diesem Unterkapitel nachgewiesen, hat die Wahl der Gewichtungsfaktoren einen Einfluss auf das Ergebnis der Umlegungsrechnung. Mit den unterschiedlichen Faktoren können einerseits unterschiedliche Gehgeschwindigkeiten und andererseits verschiedene von Fahrgästen subjektiv wahrgenommene Zeitempfinden hinsichtlich der Umsteigevorgänge berücksichtigt werden. Wird jedoch von einer Normalverteilung der Gehgeschwindigkeiten und der Zeitwahrnehmungen von Fahrgästen ausgegangen, ist die Verwendung von Mittelwerten der Gewichtungsfaktoren zulässig. Es kann sich in der Modellrechnung für einzelne Fahrgäste im Vergleich zum realen Verhalten ein Unterschied in der Routenwahl ergeben, jedoch kann mit gemittelten Gewichtungsfaktoren ein repräsentatives Verhalten von Fahrgästen in der Verbindungssuche berücksichtigt werden. Die Gewichtungsfaktoren der Default-Einstellungen sind je zwei für die Umsteigewartezeit und der Übergangsgezeit wobei zusätzlich jeder Umstieg mit zwei Minuten bestraft wird. Mittels dieser Faktoren kann ein realitätsnahes Verhalten in der Verbindungswahl von Fahrgästen berücksichtigt werden. Diese Werte werden für alle durchgeführten Modellrechnungen verwendet.

6.2.3 Aufteilungsmodell Verbindungswahl

Ein Aufteilungsmodell bestimmt die Nachfragemengen in Abhängigkeit vom jeweiligen Widerstand aller möglichen Verbindungen einer Quelle-Ziel-Beziehung. Die Aufteilung der Fahrten basiert auf dem Nutzen einer Route im betrachteten Zeitintervall. Aus dem Nutzen wird der prozentuale Anteil an der Nachfrage errechnet.

$$P_i = \frac{U_i}{\sum_{i=1}^n U_i} \quad (64)$$

P_i	Relativer Anteil der Nachfrage einer Verbindung i zwischen einer Quelle- Ziel-Beziehung [min]
U_i	Nutzen einer Verbindung i zwischen einer Quelle-Ziel-Beziehung [min]
n	Anzahl Verbindungen zwischen einer Quelle-Ziel-Beziehung [-]

Für das Aufteilungsmodell sind vier Modelle (Kirchhoff, Logit, Lohse und BoxCox) bekannt. Im Folgenden sind die Formeln der Nachfrageaufteilung in Form von Nutzerfunktionen einer Verbindung zwischen einer Quelle-Ziel-Beziehung angeführt.

Kirchhoff

$$U_i = R_i^{-\beta} \quad (65)$$

U_i	Nutzen einer Verbindung i zwischen einer Quelle-Ziel-Beziehung [min]
R_i	Widerstand einer Verbindung i zwischen einer Quelle-Ziel-Beziehung [min]
β	Parameter der Widerstandsempfindlichkeit [-]

Lohse

$$U_i = e^{-\left(\beta \cdot \left(\frac{R_i}{R_{\min}} - 1\right)\right)^2} \quad (66)$$

R_{\min}	minimaler Widerstand aller Verbindungen einer Quelle-Ziel-Beziehung [min]
------------	---

Logit

$$U_i = e^{-\beta \cdot R_i} \quad (67)$$

Box-Cox

$$U_i = e^{-\beta \cdot \frac{R_i^\tau - 1}{\tau}} \quad (68)$$

τ	Parameter der Widerstandsempfindlichkeit [-]
--------	--

Dabei gilt die Bedingung $\tau > 0$. Für den Fall $\tau = 0$ ergibt aus dem Box-Cox-Modell die Kirchhoff-Aufteilung und für den Fall $\tau = 1$ ergibt sich die Logit-Aufteilung. (Vgl. PTV AG, 2011)

Für die weiteren Analysen erfolgt ein Vergleich von ausgewählten Kenngrößen des ÖV. Dabei werden folgende Ausprägungen der vier Aufteilungsmodelle der Nachfrage berücksichtigt:

- Aufteilungsmodell Logit
Variationen des Parameters β : 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4
- Aufteilungsmodell Lohse
Variationen des Parameters β : 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7
- Aufteilungsmodell Kirchhoff
Variationen des Parameters β : 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7
- Aufteilungsmodell Box-Cox
Variationen des Parameters β : 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75
Variationen des Parameters τ : 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7

In folgender Grafik wird der Nutzen von Verbindungen in Abhängigkeit vom Widerstand für die Aufteilungsmodelle nach Kirchhoff, Lohse und Logit angezeigt. Dabei werden die obigen kleinsten und größten Ausprägungen der Parameter der Widerstandsempfindlichkeit berücksichtigt und einander gegenübergestellt. Beispielsweise ist der Verlauf der Nutzenfunktion mit Zunahme des Widerstandes für das Aufteilungsmodell nach Kirchhoff mit $\beta = 1$ und $\beta = 7$ dargestellt.

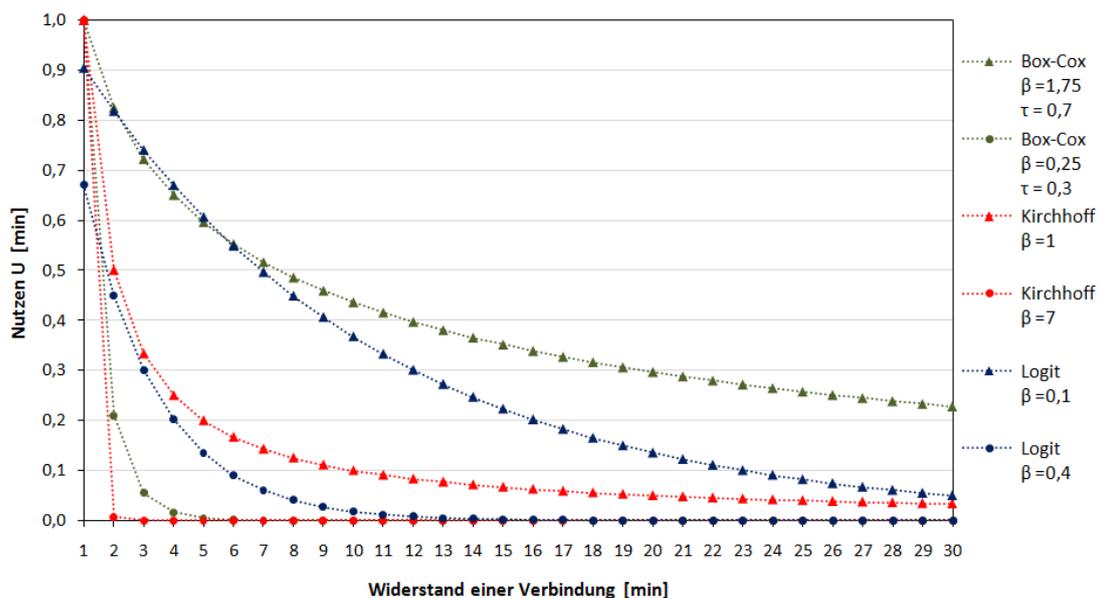


Abb. 36 Variation der Parameter β und τ der Nutzerfunktionen für die Aufteilungsmodelle nach Kirchhoff, Logit und Box-Cox

Unabhängig von der Widerstandempfindlichkeit ergibt sich, dass der Nutzen für diese drei Modelle mit steigendem Widerstand abnimmt. Bei einem größeren β und bei einem größeren τ sinkt der Nutzen von Verbindungen. Dadurch steigt auch die relative Nachfrageaufteilung auf der Route einer Quelle-Ziel-Beziehung mit dem kleinsten Widerstand an. Die Belastung auf den Alternativrouten nimmt dadurch ab. Nachdem beim Aufteilungsmodell nach Lohse der Widerstand von Verbindungen mit der Quelle-Ziel-Beziehung jener des kleinsten Widerstandes R_{\min} verglichen wird, erfolgt eine gesonderte Betrachtung. Die Wirkungen bei Variation von β sind wie bei den drei anderen Modellen. In folgender Grafik sind die Nutzenfunktionen für drei verschiedene R_{\min} dargestellt.

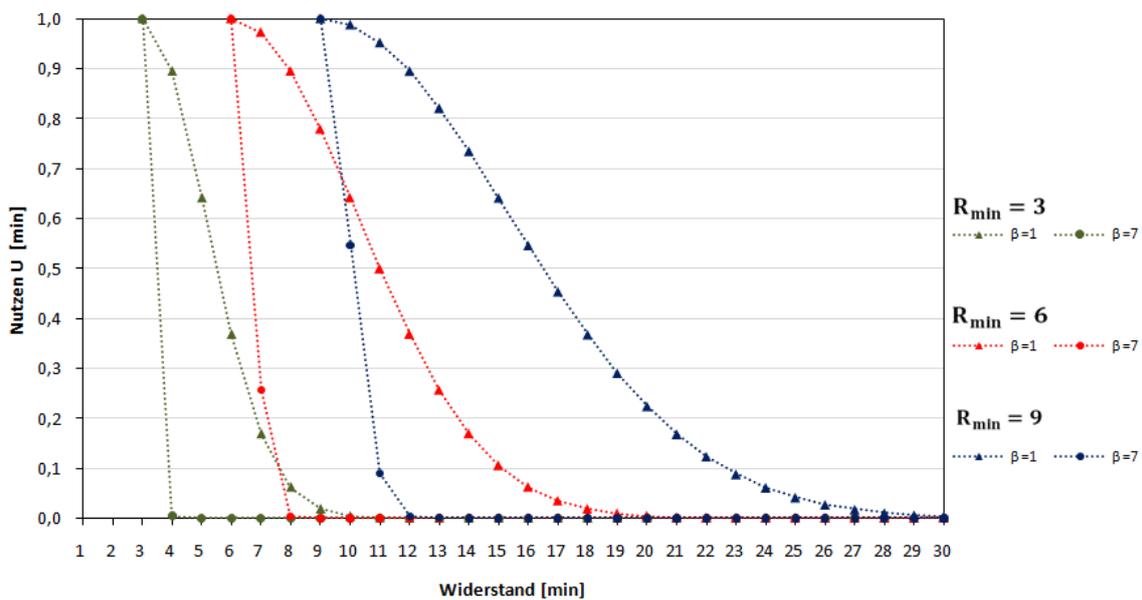


Abb. 37 Variation des Parameters β und unterschiedlichen R_{\min} für das Aufteilungsmodell nach Lohse

Nachdem immer alle Routen innerhalb des betrachteten Netzes derselben Nutzenfunktion unterworfen sind, ist der Einfluss der Faktoren β und τ nur eher gering. Für alle obig angeführten Ausprägungen erfolgen Umlegungsrechnungen, deren Ergebnisse im Anschluss miteinander verglichen werden. In folgender Darstellung sind die Auswirkungen auf Ein- und Umsteiger bei Variation der Parameter β und τ für alle vier Aufteilungsmodelle abgebildet. Die Form des Punktes gibt dabei den Typ des Aufteilungsmodells an.

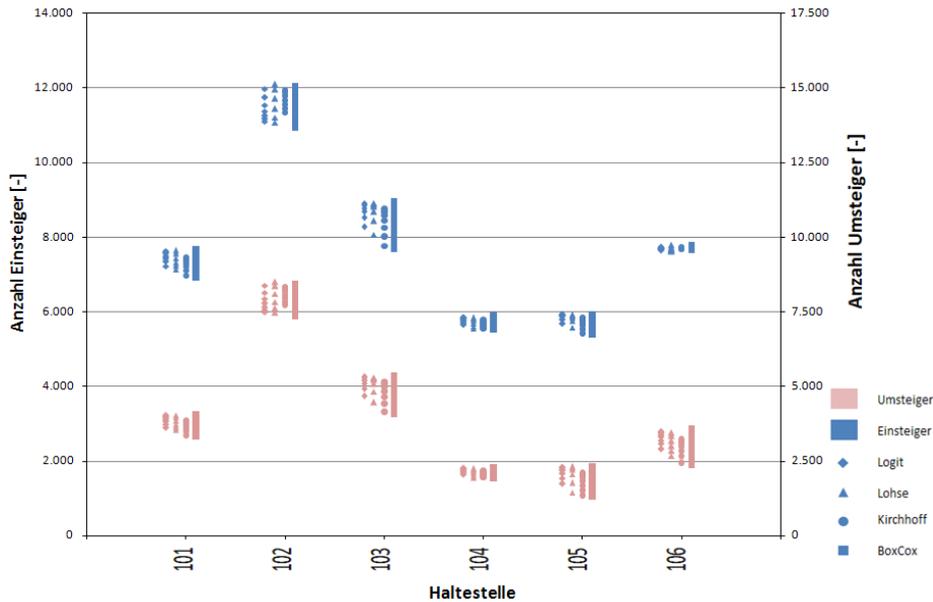


Abb. 38 Veränderung der Ein- und Umsteiger an Haltestellen bei Variation der Parameter zur Aufteilung der Nachfrage

Die Menge der Umsteiger variiert im Bereich von rund 1.000 Umsteigern, bis auf die Haltestelle mit der Nummer 104, bei der nur geringe Schwankungen auftreten. Aus der relativen Betrachtung ergeben sich dadurch größere Abweichungen an Haltestellen mit kleinerer Umsteigeanzahl (Nummer 105 und 106). Die Menge der Einsteiger ändert sich bei Variation des Parameters der Widerstandempfindlichkeit an den Haltestellen mit den Nummern 101, 102 und 103 um rund 1.000 Fahrgäste. Dabei treten unter den vier verschiedenen Aufteilungsmodellen ähnliche Spannweiten auf. Durch die Änderungen der Ein- und Umsteiger treten Auswirkungen auf die Personenstunden und Linienbeförderungen auf, die in folgender Grafik dargestellt sind:

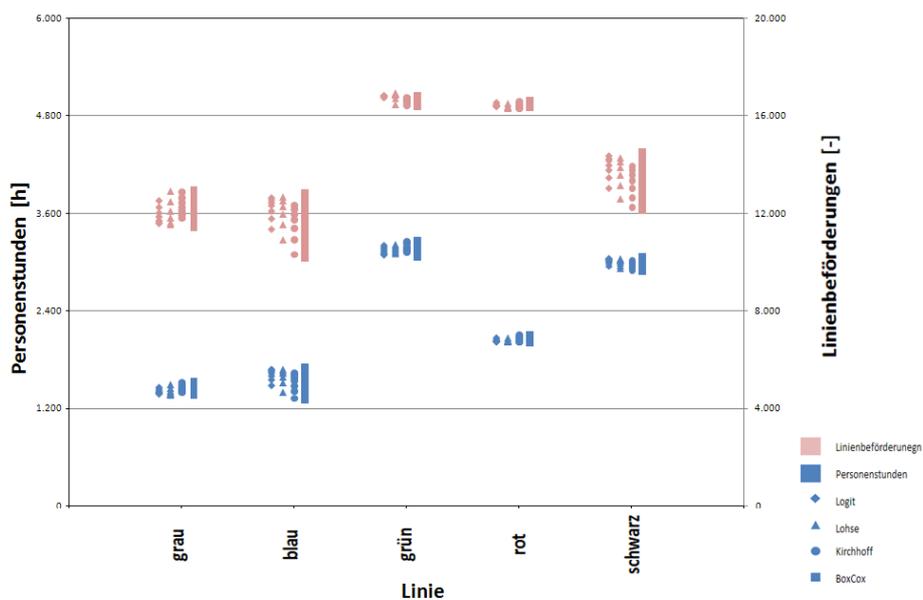


Abb. 39 Veränderung der Personenkilometer und der Linienbeförderungen bei Parametervariation der Nachfrageaufteilung

Ähnlich wie bei der Variation der Gewichtungsfaktoren der ERZ schwanken die Linienbeförderungen der Linien blau und schwarz am stärksten. Unabhängig vom Aufteilungsmodell stellen sich ähnliche Spannweiten für die vier Aufteilungsmodelle ein. Tendenziell ist die Spannweite des Aufteilungsmodells Box-Cox geringfügig größer als bei den anderen drei Modellen. Die Personenstunden variieren nur gering. Die größte Spannweite tritt dabei an der Linie blau auf. Im Anhang B befinden sich die Auswertungen der Kenngrößen (Minimum, 1. Quartil, Mittelwert, Median, 3. Quartil und Maximum) bei Variation der Parameter zur Aufteilung der Nachfrage für alle vier Aufteilungsmodelle. Es treten außer bei der Kennzahl mittlere Übergangsgezeit kleine Unterschiede zwischen den vier Aufteilungsmodellen auf. In diesem Unterkapitel kann nachgewiesen werden, dass die Wahl des Aufteilungsmodells nur kleine Unterschiede hinsichtlich Ein- und Umsteiger an Haltestellen, Anzahl an Linienbeförderungen und Reisedauer der gesamten Nachfrage bewirkt.

6.3 Vergleichsrechnung Kiel- Neumünster- Rendsburg

Die vorgestellte Methode wird mit der Taktversatzoptimierung von Liebchen und Nökel (2002) anhand eines kleinen Beispiels aus HEUREKA 02 miteinander verglichen. Das Beispielnetz umfasst die Schienenstrecken im Dreieck Kiel-Neumünster-Rendsburg. Alle Strecken werden als zweigleisig angenommen und das Angebot jeder Linie weist einen Stundentakt auf. Die Übergangsgezeit wird mit fünf Minuten und die Mindestwendezeit an den Endhaltestellen mit zehn Minuten vorgegeben. In der fiktiven Ausgangssituation verkehren je zwei Fahrzeuge pro Linie, um dem Taktfahrplan gerecht zu werden. In der Ausgangssituation beträgt die Gesamtwarezeit aller Fahrgäste 3.051 Minuten. In einer ersten Optimierung, bei der die Zielfunktion die Umsteigewartezeit minimiert, ergibt sich eine Gesamtwarezeit von 1.755 Minuten, das eine Reduktion von 42 % bedeutet. Im zweiten Optimierungsfall, wird die Zielfunktion nach der Bestimmung der minimalen Fahrzeuganzahl ermittelt. Es resultiert, dass nur mehr fünf Fahrzeuge benötigt werden und die Gesamtwarezeit 2.115 Minuten beträgt. Dem ersten Optimierungsfall steht die Ersparnis eines Fahrzeuges bei einer im Mittel um eine Minute erhöhten Wartezeit für den Fahrgast gegenüber. In folgender Grafik sind im linken Bild die Abfahrtszeiten der Ausgangssituation und im rechten jene des zweiten Optimierungsfalls dargestellt. Rot sind die Umsteigebeziehungen mit den auftretenden Umsteigemengen. (Vgl. Liebchen und Nökel, 2002)

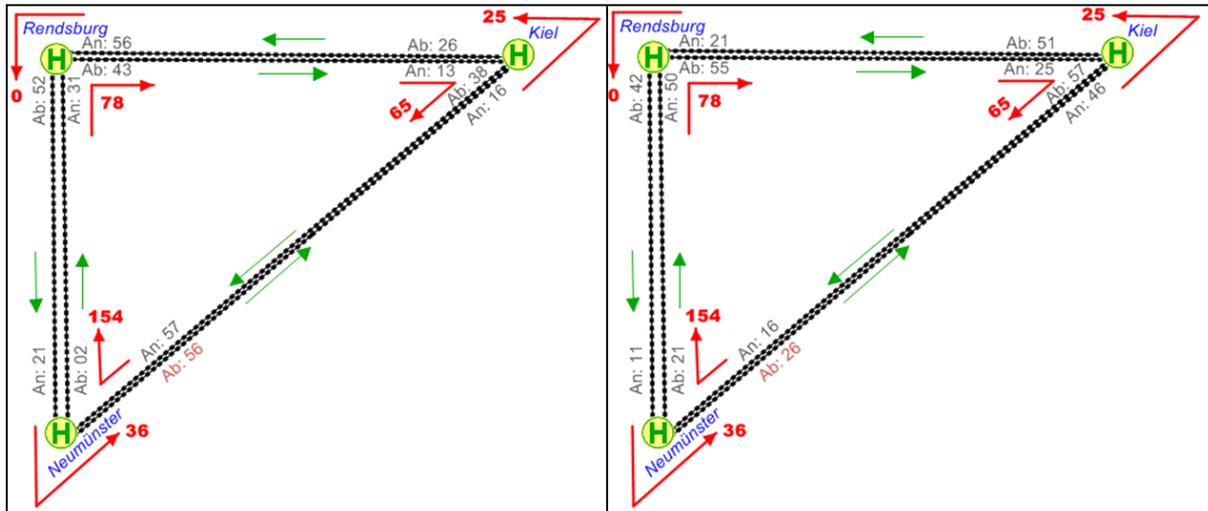


Abb. 40 Beispielnetz Kiel-Neumünster-Rendsburg: links Ausgangslösung/ rechts Fahrplan optimiert (Vgl. Liebchen und Nökel, 2002)

Mit dem Verfahren dieser Arbeit wird ebenfalls die Lösung mit dem globalen Minimum der Gesamtwartezeit nach einer Fahrzeugeinsparungsermittlung auf Basis der Umlaufplanung gefunden. Es ergibt sich die gleiche Qualität der Lösung, wie im oben dargestellten Optimierungsfall zwei, sprich eine Einsparung eines Fahrzeuges und eine Reduktion der Gesamtwartezeit von 31 % im Vergleich zur Ausgangssituation. Ein Unterschied liegt insofern vor, dass der gesamte Fahrplan zeitlich versetzt ist. Die Gesamtdauer der Fahrplanoptimierung inklusive drei Umlegungsberechnungen für das Beispiel beträgt mit einem Intel(R) Core(TM) @ 3.1 GHz Prozessor (Betriebssystem: Microsoft Windows 7 mit 64-Bit-Betriebssystem) 20 Sekunden. Am Beispielnetznetz Kiel-Neumünster-Rendsburg treten keine Änderungen in der Verbindungswahl von Fahrgästen auf.

7 Anwendung der nachfrageabhängigen Optimierung für Graz

Im folgenden Kapitel erfolgt eine Anwendung des Optimierungstools für das Grazer Stadtgebiet. Dabei werden alle Linien, die innerhalb der Stadt verkehren sowie jene mit einem landübergreifenden Angebot berücksichtigt. Kenngrößen der Ist-Situation werden berechnet und das Optimierungspotential wird aufgezeigt.

7.1 Mobilitätsverhalten im ÖPNV-Netz

Der Anteil des öffentlichen Verkehrs steigt seit 1988 kontinuierlich an und betrug im Jahre 2008 rund 20 % des Stadtverkehrs in Graz. Zusätzlich ist auch die Einwohnerzahl in Graz und in der Agglomeration von Graz in den letzten Jahren gestiegen, wodurch die Menge der von Fahrgästen getätigten Fahrten deutlich gestiegen ist. Aus diesen Gründen ist neben bereits durchgeführten Maßnahmen wie z.B. Taktverdichtungen, Linienenerweiterungen, zusätzliche Linien, Fahrzeitverkürzungen, etc. eine hohe Qualität des Fahrplanes und der Umsteigevorgänge notwendig. Eine nachfrageabhängige betreiberübergreifende Fahrplanoptimierung für die Stadt Graz bewirkt ein attraktiveres Angebot aller Verkehrsbetriebe.

Eine Betrachtung von Fahrgästen in Graz, die zumindest einen Teil des Weges zwischen ihrem Quell- und Zielort mit dem Verkehrssystem Zug zurücklegen und an einem bedeutenden Umsteigeknoten in Graz ein-, um- oder aussteigen, erfolgt anhand einer Befragung und einer aufbauenden Datenanalyse von Königshofer (2009). Dabei wurden Personen, die keine Schüler oder Studenten sind, interviewt. Es zeigt sich, dass 56 % der Bahnkunden einen Umstieg und 15 % zwei oder mehr Umstiege auf ihrem Weg durchführen. Von diesen Personen sind knapp 73 % der Fahrgäste mit den vorhandenen Anschlussverbindungen sehr oder eher zufrieden. (Vgl. Königshofer, 2009)

7.2 Verkehrsmodell

Für den Großraum Graz wurde im Zuge des Forschungsprojektes GUARD¹ ein multimodales, engmaschiges und stundenfeines Verkehrsmodell erstellt. Sowohl das Verkehrsangebot als auch die Verkehrsnachfrage werden im Modell für die Verkehrsmittel Fuß, Rad, ÖV, Pkw-Lenker und Pkw-Mitfahrer abgebildet. Angebotsdaten des ÖV der Fahrplanperiode 2011 werden aus dem Fahrplan- und Dienstplansystem DIVA² des Verkehrsverbundes Steiermark exportiert. Dazu gehören unter

¹ GUARD: Guaranteed Ride Home; Forschungsprojekt der Programmlinie IV2Splus; Fördergeber: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

² DIVA: Dialoggesteuertes Verkehrsmanagement- und Auskunftssystem der Firma mdv Mentz Datenverarbeitung GmbH

anderem Informationen wie Verkehrstage, Haltestellen, Übergangsgehzeiten, Betreiber, Linien, Fahrzeitprofilverläufe oder Servicefahrten. Die Anzahl der Verkehrszellen im Verkehrsnachfragemodell beträgt 983, wobei 290 auf das Stadtgebiet von Graz entfallen. Die Berechnung der stündlichen Nachfragematrizen erfolgt auf der Basis von Wegekettens für unterschiedliche verhaltenshomogene Personenkategorien. Durch Rückkopplungen des ÖV-Verkehrsangebotes auf die Nachfrage werden realitätsnahe Wirkungen, wie z. B. ein verändertes Ziel- oder Verkehrsmittelwahlverhalten infolge sinkender Verkehrsqualität des Kfz-Verkehrs in den Spitzenstunden, berücksichtigt. (Vgl. Marauli 2011)

7.2.1 Modelltechnische Anpassungen

Um möglichst schnell einen optimierten Fahrplan zu erhalten, werden einige Modellanpassungen getroffen. Nachdem nach jeder zeitlichen Verschiebung eine Umlegungsberechnung erfolgt, tragen die angeführten Modellanpassungen zur Beschleunigung des Optimierungsverfahrens bei.

Räumliche Abgrenzung

Es werden Linien aller Verkehrsbetreiber unabhängig vom Verkehrssystem, die in, ab oder nach Graz fahren, berücksichtigt. Dazu wird aus dem Verkehrsmodell ein Teilnetz für Graz gebildet. Nachdem auf Basis von Fahrplandaten Zeitgrößen, wie beispielsweise die gesamte zur Verfügung stehende Pufferzeit (Wendezeit) errechnet werden, bedarf es bei Linien, deren Start- oder Endhaltestelle außerhalb der Stadt liegt, einer Berücksichtigung des gesamten Linienvlaufes. Fernverkehrslinien werden im Zuge des Optimierungsverfahrens nicht verschoben, obwohl es prinzipiell möglich wäre. Der übergeordnete Fernverkehr hat nationale und internationale Abhängigkeiten, wodurch Änderungen der Fahrpläne nicht sinnvoll sind. In der Optimierung sind auch einzelne Verstärkerfahrten (Einschubfahrten), deren Umsteigerelationen in der Optimierung berücksichtigt werden, inkludiert. Ein Verschieben der Abfahrtszeit dieser Linien ist nicht zielführend, da diese bedarfsorientiert sind oder zur Abdeckung von Spitzenzeiten dienen.

Nachfragedaten

Die Verkehrsnachfrage für das Verkehrsmodell Graz ergibt Matrizen, bei denen die Nachfragedaten der Quelle-Ziel-Beziehungen mit zwei Kommastellen, wie es in vielen Modellen praktiziert wird, angeführt sind. Das ergibt sich aufgrund der Multiplikation von Strukturdaten mit Kenngrößen, wie beispielsweise der Erzeugungs- oder der Verteilungsrate. Die Summe der erzeugten Fahrten einer Verkehrszelle kann beispielsweise 14 betragen und die größte Quelle-Ziel-Beziehung hat 1,47 Fahrten. Aus der Tatsache, dass es in der Realität nur Fahrten von Personen gibt, wird der Einfluss der verwendeten Nachkommastellen einer Matrix im Folgenden untersucht. Um die Gesamtsumme der Nachfragematrix konstant zu halten, wird dazu ein Schwellwert ermittelt, ab dem Nachfragedaten zwischen Verkehrszellen aufgerundet oder abgerundet werden.

Anhand der Verkehrsnachfrage von 8 bis 9 Uhr werden für das Verkehrsmodell Graz die Auswirkungen der Variation der Kommastellen in der Nachfragematrix analysiert. Dabei werden Auswertungen der Nachfragedaten mit null, einer und zwei Kommastellen verglichen. Der Schwellwert mit null Kommastellen liegt bei 0,373. Jeder größere Wert wird aufgerundet und jeder kleinere Wert auf null abgerundet. Bei Rechnung mit einer Kommastelle liegt der Schwellwert bei 0,113. Die Umlegungsrechnung mit null Nachkommastellen benötigt um 55 % weniger Zeitaufwand als jene mit zwei Nachkommastellen. Zusätzlich reduziert sich die Anzahl der Umsteigeverbindungen um rund 22 % und jene der Wege um 81 %. Daraus resultiert eine weitere Rechenzeiterparnis im Zuge der Fahrplanoptimierung. Bei den Kennzahlen mittlere Wartezeit, mittlere Beförderungszeit, Umsteigehäufigkeit, Linienbeförderungen und Personenfahrten treten nur Abweichungen kleiner als 5 % auf. Im Anhang D1 findet sich eine Gegenüberstellung gängiger Kennzahlen der Nachfragedaten mit null, einer und zwei Kommastellen. Folgende Darstellung vergleicht die errechneten Personenkilometer je Linie für Nachfragedaten mit null Kommastellen zu jenen mit zwei Kommastellen. Dazu werden für jede Linie die relativen Abweichungen der Personenkilometer ermittelt. Je größer die Personenkilometer einer Linie sind, umso kleiner werden tendenziell die relativen Abweichungen. 72 von 108 betrachteten Linien weisen eine kleinere Abweichung als 10 % und weitere 27 Linien eine Abweichung zwischen 10 und 20 % auf.

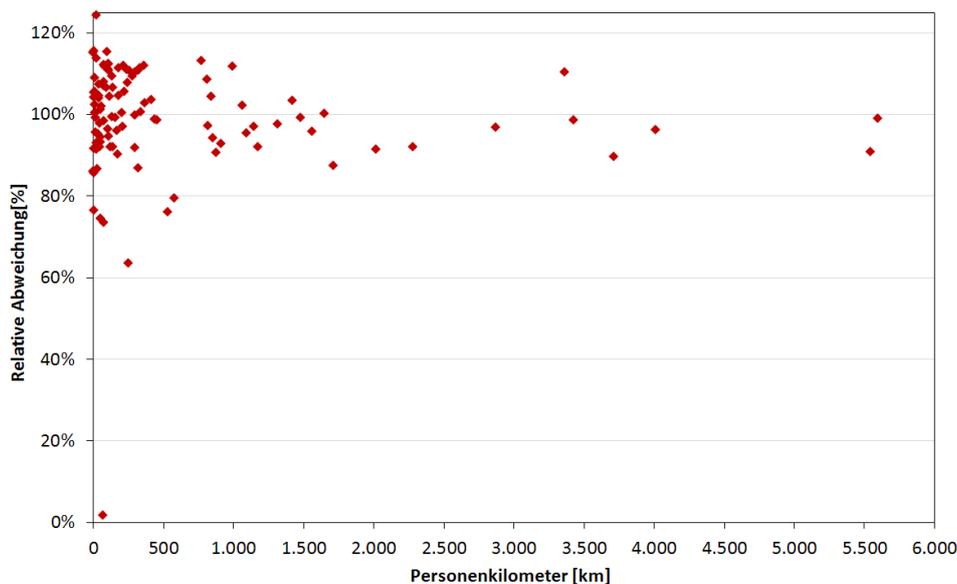


Abb. 41 Relative Abweichung Personenkilometer von Linien für Nachfragedaten mit null Kommastellen gegenüber Nachfrageberechnung mit zwei Kommastellen

Im Anhang D2 und D3 finden sich die relativen Abweichungen der Personenkilometer und der Personenstunden je Linie für Nachfragedaten mit null, einer und zwei Kommastellen.

7.2.2 Kenngrößen Verkehrsmodell Graz

Mittels Kennzahlen kann einerseits der ÖV gut beschrieben werden. Grundsätzlich kann in Angebots- und Nachfragekenngrößen unterschieden werden. In folgender Tabelle sind einige typische Kennzahlen eines repräsentativen Werktags aus dem Verkehrsmodell Graz aufgelistet.

Kennzahl mit Einheit	Wert
Anzahl Betreiber [-]	90
Anzahl Linien [-]	169
Anzahl Haltestellen [-]	527
Summe Personenkilometer [Mill.km]	1,06
Summe Personenstunden [h]	52.400
Anzahl Fahrten [-]	226.800
Anzahl Direktfahrten [-]	98.600
Anzahl Umsteigevorgänge [-]	152.200
Anzahl Linienbeförderungen [-]	379.000
Anzahl Umsteigehaltestellen mit Nachfrage [-]	186
Anzahl Umsteigerelationen mit Nachfrage [-]	3.145
mittlere Beförderungsweite [km]	4,6
mittlere Beförderungszeit [min]	16,6
mittlere Fahrzeit im Fz [min]	14,0
mittlere Wartezeit pro Umstieg [min]	2,1

Tab. 6 Kenngrößen des Verkehrsmodells Graz eines repräsentativen Werktags

Die Anzahl aller getätigten Fahrten von oder nach Graz sowie innerhalb der Stadt beträgt rund 227.000. Davon erfordern rund 57 % mindestens einen Umstieg in eine andere Linie. An 186 Haltestellen mit Umsteigemöglichkeit treten rund 2.864 Umsteigerelationen mit Nachfrage auf. Die mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge (Zug, Tram, Stadt- und Regionalbus) beträgt in Graz rund 20 km/h, wobei linien- und verkehrssystembezogene Unterschiede auftreten.

7.2.3 Umsteiger

Die sich im Tagesverlauf ändernde Verkehrsnachfrage bewirkt unterschiedliche Umsteigesituationen. In folgender Grafik sind die Tagesganglinien aller Einsteiger und aller Umsteiger stundenfein dargestellt. Daraus ist auch das Verhältnis von Um- zu Einsteiger ermittelbar. Eine Fahrt mit zwei notwendigen Umstiegen weist drei Einsteigevorgänge in drei Linien auf.

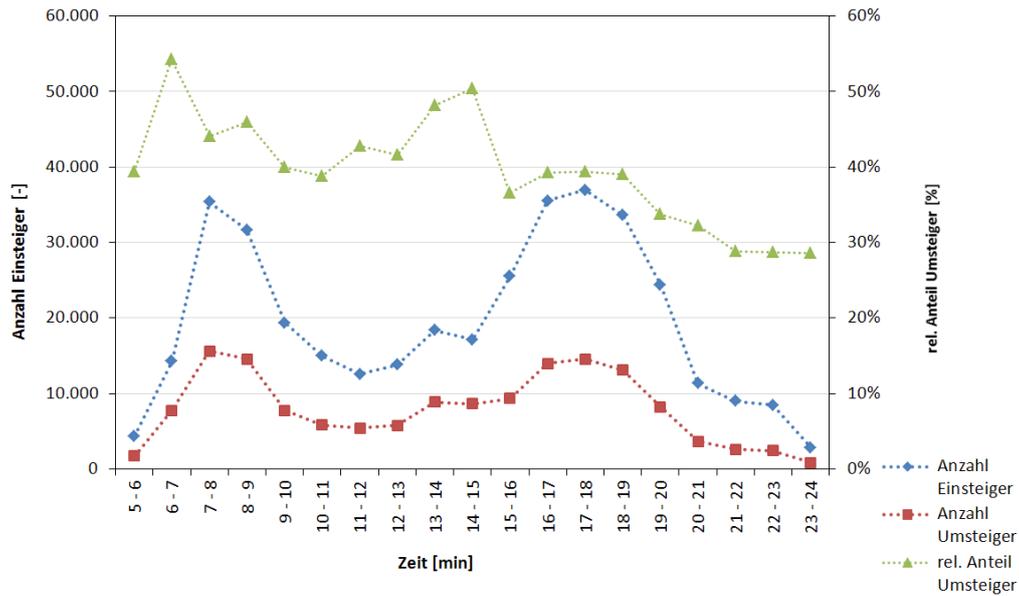


Abb. 42 Mengen Einsteiger, Umsteiger inkl. Verhältnis Einsteiger zu Umsteiger in Graz

Der relative Anteil der umsteigenden Einsteiger nimmt im Laufe eines Tages tendenziell ab. Im Tagesmittel beträgt der relative Anteil der umsteigenden Einsteiger rund 40 %, wobei dieser je nach Tageszeit zwischen 30 und 50 % variiert. Die meisten Einsteigevorgänge sowie Umsteigevorgänge treten in der Morgenspitze zwischen 7 und 8 Uhr und in der Nachmittagspitze zwischen 17 und 18 Uhr auf.

7.2.4 Übergangsgehzeiten

Die Übergangsgehzeiten zwischen Haltepunkten sind im Verkehrsmodell für ein stressfreies Umsteigen ausgelegt. Sie können mit einer schnellen Gehgeschwindigkeit deutlich unterschritten werden. Dadurch kann im Realbetrieb bei kleinen Verspätungen ein Anschlussfahrzeug noch erreicht werden. Bei Betrachtung aller Umsteigerelationen in Graz ergibt sich in folgender Darstellung abgebildete Verteilung der Übergangsgehzeiten. Halbe Minuten (z.B.: 2min 30s) sind in der Darstellung aufgerundet. Da die Fahrplandaten nur minutenfein vorliegen und halbe Minuten somit keinen Einfluss auf das Erreichen einer Anschlussverbindung haben.

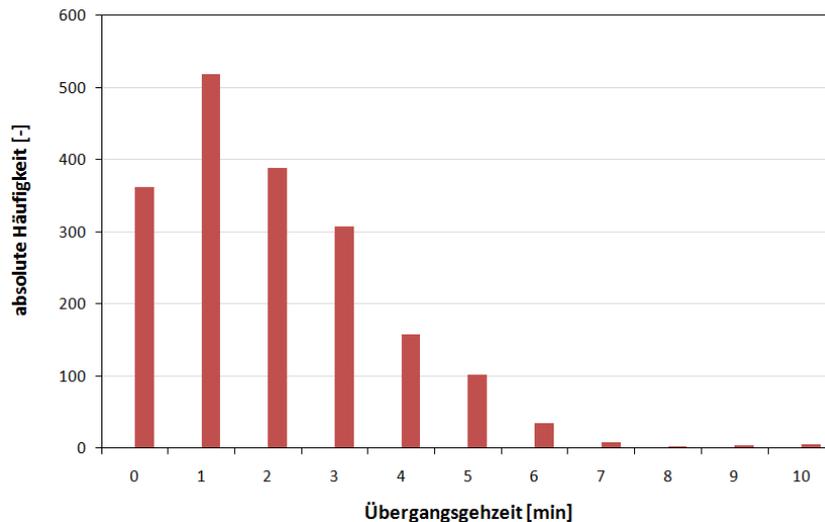


Abb. 43 Verteilung der Übergangsgezeiten aller Umsteigerelationen in Graz

Rund 27 % der Umsteigerelationen weisen eine Übergangsgezeit von einer Minute auf. Eine Übergangsgezeit von null Minuten bedeutet, dass der Aus- und der Wiedereinstieg am selben Haltepunkt erfolgen und tritt bei 19 % aller berücksichtigten Umsteigebeziehungen auf. Rund ein Drittel aller Übergangsgezeiten sind größer als zwei Minuten.

7.2.5 Wartezeiten

Die mittlere Wartezeit für einen Umstieg in Graz beträgt rund 2,1 Minuten. Bei Betrachtung aller Umsteigevorgänge, unabhängig vom auftretenden Zeitpunkt, ergibt sich, dass bei rund 38 % aller Umstiege keine Wartezeiten auftreten. Bei rund 20 % der Umstiege ist die Wartezeit größer oder gleich drei Minuten. In 43 % der täglichen Umsteigevorgänge tritt eine Wartezeit von einer oder zwei Minuten auf.

7.3 Fahrplanoptimierung für das Zeitfenster 12:00 bis 14:00

Das Optimierungstool wird für den Zeitbereich von 12 bis 14 Uhr angewendet. Technisch kann jedes beliebige Zeitfenster gewählt werden. Betrachtungen von kleiner als zwei Stunden sind jedoch nicht sinnvoll. Es werden alle richtungsbezogenen Fahrten, die in diesem Zeitfenster liegen und an der Starthaltestelle abfahren oder an der Endhaltestelle ankommen, berücksichtigt. Die Nachfrage liegt stundenfein vor. Die Definition erforderlicher Parameter und die Grundvoraussetzungen für die Optimierung sind in Abbildung 22 dargestellt und unter den Kapiteln 5.2 und 5.3 beschrieben.

7.3.1 Rahmenbedingungen Optimierung

Für die Optimierung werden 119 Linien berücksichtigt, wobei sich manche Linienverläufe nur geringfügig von einem Anderen unterscheiden. Beispielsweise fährt jeder zweite Kurs der Linie 34

eine andere Endhaltestelle an und wird dabei zur Linie 34E. Nachdem zwischen solchen Linien eine gegenseitige Abhängigkeit herrscht, werden sie zu Linienbündeln zusammengefasst. Insgesamt werden 11 Linienbündel erstellt und 54 Linien zeitlich nicht verschoben. Einerseits werden alle Linien, die vom Verkehrssystem Zug bedient werden, zeitlich fixiert und andererseits werden bedarfsorientierte Angebotsfahrten nicht verschoben. Es ergeben sich 53 Linien oder Linienbündel deren Abfahrtszeiten verschoben werden können. Davon weisen 19 fixe und 34 variable Wendezeiten auf.

Mindestwendezeiten

Die Ermittlung erfolgt nach dem Verkehrssystem, wobei bei Bussen zwischen Stadt- und Regionalbusse unterschieden wird. Grundsätzlich beträgt die Mindestwendezeit von Straßenbahn- und Stadtbuslinien eine Minute. Bei Regionalbuslinien wird eine Mindestwendezeit von zwei Minuten verwendet. Bei Linien, die vom Verkehrssystem Zug bedient werden, beträgt sie fünf Minuten. In Einzelfällen liegt eine Mindestwendezeit von null Minuten vor. Eine linienbezogene Angabe von Mindestwendezeiten sowie die Bildung von Linienbündel und Festlegung verschiebbarer Linien finden sich im Anhang E1.

Mindestwartezeiten

Um das größtmögliche Optimierungspotential zu erhalten, werden die Mindestwartezeiten aller Umsteigerelationen auf null Minuten gesetzt. Eine Verwendung von Mindestwartezeiten würde einen Vergleich von Umsteigeverbindungen vor und nach der Optimierung verfälschen, da Umsteigezeiten bei bestehenden Anschlüssen ohne Wartezeiten größer werden. Aufgrund der großzügigen Übergangsgehzeiten kann bei kleinen Verspätungen ein Anschlussfahrzeug jedoch erreicht werden. Nachdem Linien des Stadtverkehrs zum größten Teil nur über Abfahrtszeiten und nicht über Ankunftszeiten von Fahrzeugen an Haltestellen - außer an Endhaltestellen - verfügen, ergeben sich kleinere Wartezeiten als sie tatsächlich auftreten. Dadurch entstehen zusätzliche kleine Zeitreserven. Linien mit spurgebundenen Fahrzeugen und zum Teil auch Linien des regionalen Busverkehrs haben Ankunfts- und Abfahrtszeiten im Fahrplan enthalten.

7.3.2 Nachfrageabhängige Fahrplanoptimierung

Die Rechendauer des Tools bis zur Findung jenes Fahrplanes mit der globalen minimalen Wartezeit beträgt mit einem Intel(R) Core(TM) @ 3.1 GHz Prozessor (Betriebssystem: Microsoft Windows 7 mit 64-Bit-Betriebssystem) für diese Rahmenbedingungen rund zwei Stunden. Je größer der Takt einer Linie und je mehr Umsteigerelationen mit dieser Linie verbunden sind, umso länger dauert die Optimierungsberechnung dieser Linie. Auch die Größe des Verschiebungsbereichs bei Linien mit variablen Wendezeiten hat einen Einfluss auf die Optimierungsdauer. Je nach Definition der Mindestwendezeiten sind mehrere Fahrzeugeinsparungen möglich, jedoch werden einige Fahrzeuge in der Ist-Situation bewusst zusätzlich eingesetzt. Es wird daher mit konstanter Fahrzeuganzahl vor

und nach der Optimierung gerechnet. Zeitliche Verschiebungen des Fahrplanes erfolgen an 23 Linien und 5 Linienbündel und insgesamt werden 371 Servicefahrten im Zuge der Optimierung verschoben. Eine Liste mit den richtungsbezogenen zeitlichen Verschiebungen findet sich im Anhang E2.

7.3.3 Vergleich Ausgangslösung mit dem optimierten Fahrplan

Eine Gegenüberstellung von Kennzahlen zeigt, dass mit dem entwickelten Optimierungsverfahren zeitliche Einsparungen erzielt werden können. Wartezeiten an Umsteigehaltestellen können deutlich reduziert werden. Nachdem die Wartezeit nur kleineren Einfluss auf die Reisezeit hat, ergeben sich kleine Zeitgewinne von rund 1,3 %. Die gesamte Beförderungszeit im betrachteten Netz reduziert sich um 114,4 h auf 7.012,8 h. Die mittlere Beförderungszeit pro Fahrt reduziert sich um 1,3 % und beträgt im optimierten Netz nur mehr 16 min 40 s. Die Fahrzeit im Fahrzeug bleibt nahezu unverändert. Eine kleine Abweichung ergibt sich aus der geänderten Verbindungswahl von Fahrgästen. Die netzweite gesamte Wartezeit reduziert sich knapp über 100 h. Trotz einer Zunahme getätigter Umsteigevorgänge von knapp über 2 %, beträgt die mittlere Wartezeit für einen Umstieg im Ausgangsfall 140 s und im optimierten Netz nur mehr 117 s. Dies entspricht einer Verbesserung von über 16 %. Die mittlere Übergangsgezeit pro Umstieg nimmt im Mittel um 3,7 s ab. In folgender Tabelle sind sämtliche Kennzahlen mit absoluten und relativen Differenzen vor und nach der Optimierung angeführt.

	Ausgangslösung	nach Optimierung	absolute Differenz	relative Differenz
Beförderungszeit gesamt [h]	7.127,2	7.012,8	-114,4	-1,6%
Fahrzeit im Fz gesamt [h]	5.872,8	5.866,2	-6,6	-0,1%
Wartezeit gesamt [h]	700,9	600,2	-100,8	-14,4%
Gehzeit gesamt [h]	553,9	546,8	-7,1	-1,3%
Umsteigehäufigkeit [-]	18.036	18.407	371	2,1%
Linienbeförderungen [-]	43.377	43.664	287	0,7%
Direktfahrten [-]	10.865	10.773	-92	-0,8%
Fahrten mit 1 Umstieg [-]	11.353	11.189	-164	-1,4%
Fahrten mit 2 Umstiegen [-]	2.716	2.747	31	1,1%
Fahrten > 2 Umstiege [-]	407	548	141	34,6%
mittlere Wartezeit pro Umstieg [s]	140	117	-23	-16,1%

Tab. 7 Gegenüberstellung von Kenngrößen vor und nach der Optimierung

Aufgrund der steigenden Umsteigehäufigkeit von 2,1 %, die sich aufgrund der geänderten Verbindungswahl ergeben, nimmt die Anzahl der Linienbeförderungen leicht zu. Direktfahrten sowie Fahrten mit einem erforderlichen Umstieg nehmen nach der Optimierung geringfügig ab und Fahrten mit mehr als einem Umstieg leicht zu. Sowohl vor als auch nach der Optimierung sind knapp 43 % der Fahrten Direktverbindungen. 1,6 % der Fahrten vor der Optimierung und 2,2 % der Fahrten nach der Optimierung weisen mindestens zwei notwendige Umstiege auf. 25.341 Fahrten werden in der

Ausgangslösung und 25.257 nach der Optimierung berücksichtigt. Die kleine Abweichung ergibt sich daher, dass einzelne Fahrten durch Verschiebungen nicht mehr im betrachteten Zeitfenster liegen. Beispielsweise wird im Zuge der Optimierung bei einer Verschiebung der Abfahrtszeit von drei Minuten und einer Abfahrt in der Ausgangslösung um 13:58 eine Servicefahrt nicht mehr berücksichtigt.

In der folgenden Abbildung werden Umsteigevorgänge vor und nach der Optimierung betrachtet. Dabei erfolgt ein Vergleich der Wartezeiten aller Umsteigevorgänge, die sich aus der Umsteigezeit abzüglich der notwendigen Übergangszeit errechnen. Insgesamt werden 18.306 Umsteigevorgänge der Ausgangslösung und 18.407 der optimierten Lösung berücksichtigt. In der Ausgangslösung liegen bei rund 37 % aller Umstiege ideale Anschlussverhältnisse vor. Nach der Optimierung treten bei 9.084 Fahrten keine Wartezeiten auf. Das bedeutet, dass jeder zweite Umstieg ohne Zeitverlust möglich wird. Eine Wartezeit größer als eine Minute tritt vor der Optimierung in 39 % und nach der Optimierung in 28 % der Umstiege auf.

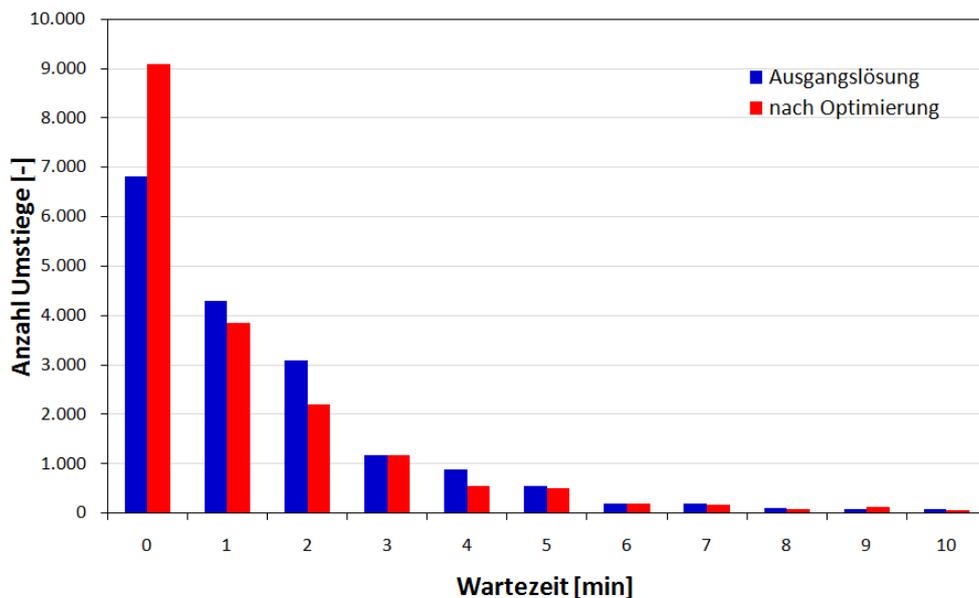


Abb. 44 Veränderung der Wartezeiten vor und nach der Optimierung

In der Ausgangslösung dieses Zeitfensters haben rund 90 % der Umstiege eine Wartezeit kleiner als fünf Minuten. Nach der Optimierung sind es rund 94 %. Wartezeiten von Umsteigevorgängen größer als zehn Minuten treten sowohl in der Ausgangslösung als auch nach der Optimierung nur in seltenen Fällen auf. Folgende Grafik gibt die Anzahl der Fahrten mit kürzeren und längeren sowie konstanten Wartezeiten vor und nach Anwendung des Optimierungstools an. Bei der Hälfte aller Fahrten treten keine zeitlichen Veränderungen auf. Rund ein Drittel der betrachteten Fahrten weisen nach der Optimierung einen Zeitgewinn und rund ein Sechstel einen Zeitverlust auf. 4.646 Fahrten mit einem mittleren Zeitgewinn von 135,6 s stehen 2.032 Fahrten mit einem mittleren Zeitverlust von 131,4 s gegenüber.

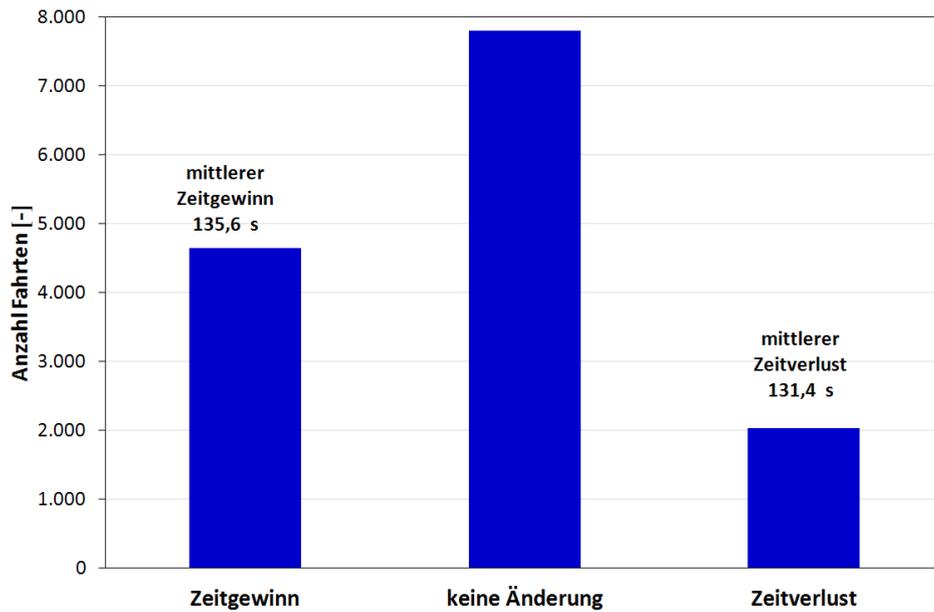


Abb. 45 Zeitveränderung von Fahrten

Rund Dreiviertel der Fahrten mit Zeitgewinn haben vor und nach der Optimierung die gleiche Verbindungswahl. Bei einem Viertel dieser Fahrten liegt eine teilweise oder gänzliche Änderung in der Verbindungswahl vor, wodurch sich die Mengen der Beförderungsfälle von Linien ändern können. Bei Fahrten mit Zeitverlust tritt nur selten eine geänderte Routenwahl auf.

8 Resümee

8.1 Fazit

Mit einer manuellen Gestaltung von Fahrplänen, wie sie in der Praxis häufig praktiziert wird, kann mit entsprechenden lokalen Kenntnissen, ein guter Fahrplan erzielt werden. Es besteht dabei immer die Gefahr, dass Umsteigesituationen vom Planer über- oder unterbewertet werden. Verbesserungen an der stärksten Umsteigerelation oder an der Haltestelle mit den meisten Umsteigevorgängen haben nicht zwingend den größten Effekt auf die Gesamtwartezeiten in einem Verkehrsnetz. Vielmehr sind alle Umsteigerelationen entlang eines gesamten Linienumlaufes und deren Auswirkungen bei zeitlichen Verschiebungen zu berücksichtigen. Durch viele Überschneidungen in einem größeren Netz entstehen viele Wechselwirkungen, die manuell nur mehr schwer überschaubar sind. Um trotzdem einen hochwertigen Fahrplan in einem ÖV- Netz anbieten zu können, bedarf es einer nachfrageorientierten und betreiberübergreifenden Optimierung.

In der Literatur sind Verfahren zur Fahrplanoptimierung mit unterschiedlich verfolgten Zielen und unterschiedlich verwendeten Optimierungsgrößen bekannt. Diese Ansätze sind entweder nicht nachfrageorientiert, nicht betreiberübergreifend, betrachten nicht alle Verkehrssysteme oder verwenden mathematische Optimierungsverfahren, die Idealisierungen zur Lösungsfindung benötigen und somit Verzerrungen mit sich bringen. Durch das Einführen von oberen oder unteren Schranken können sich suboptimale Lösungen einstellen. Je kleiner Spannweiten zwischen definierten Schranken sind, desto kleiner ist das Optimierungspotential. Eine um eine Minute größere Wartezeit als die maximal Zulässige an einer einzigen Haltestelle, könnte ein Erreichen des tatsächlich globalen Minimums verhindern. Ähnliches gilt bei Überführungen der Wartezeit in eine neue Variable mit der anschließend die Optimierung erfolgt. Prinzipiell werden damit trotzdem gute Lösungen erzielt. Durch Vereinfachungen, z.B. durch die Nichtbetrachtung von Umsteigebeziehungen mit geringer Nachfrage, wird der Rechenaufwand deutlich beschleunigt, wodurch größere und komplexere Netze herangezogen werden können. In einem gesamten Netz einer Stadt treten viele unregelmäßige Fahrten, Linienverläufe und Taktintervalle auf. Dadurch wird die Gestaltung eines Fahrplanes zu einer komplexen Aufgabe und mathematisch nur schwer eindeutig lösbar.

Der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz wurde so realitätsnah wie möglich gestaltet und benötigt so wenige Vereinfachungen wie möglich. Ein wesentlicher Gedanke des Algorithmus liegt darin, dass ihm eine automatisierte Herangehensweise ähnlich wie bei einer manuellen Fahrplangestaltung, bei der Linie für Linie betrachtet wird, zu Grunde liegt. Dadurch ist nicht nur eine Transparenz des Verfahrens gegeben, sondern es kann auch eine Akzeptanz bei Verkehrsplanern und Verkehrsbetreibern zur Anwendung erzielt werden. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines

Algorithmus, der einen bestehenden Fahrplan eines gesamten Netzes und alle damit verbundenen Umstände sowie Komplikationen berücksichtigt, um die Gesamtwartezeit aller Fahrgäste in einem Netz zu minimieren. Änderungen von Fahrzeitprofilen oder Takten, die im Laufe eines Tages oder einer Verkehrszeit variieren können, werden im Zuge der Optimierung berücksichtigt. Um das Gesamtpotential des Systems ÖV zu erreichen, ist eine Kombination des Verfahrens mit einer davor durchgeführten Linienoptimierung sinnvoll. Das entwickelte Verfahren verbessert nachfrageabhängig einen Fahrplan einer Verbundregion oder eines Teilgebietes eines Verkehrsverbundes. Alle Linien eines Netzes, sowohl mit oder ohne Taktfahrplan, werden betrachtet. Die Berücksichtigung der Verkehrsnachfrage ist für die Fahrplangestaltung ein deutlicher Mehrwert in der Planung des Systems ÖV. Durch die Reduzierung der mittleren Reisezeit eines Fahrgastes bei keinen zusätzlich anfallenden Betriebs- und Investitionskosten kann ein qualitativ hochwertiges und ein dem motorisierten Individualverkehr gegenüber wettbewerbsfähiges Verkehrsangebot sichergestellt werden.

Zur Lösung der Fahrplangestaltung kommt ein iteratives Optimierungsverfahren zur Anwendung, bei dem eine kontinuierliche Näherung zum globalen Minimum der Gesamtwartezeit durch linienweises Verschieben von Abfahrtszeiten erfolgt. Die Reihenfolge der zu optimierenden Linien hängt dabei von der potentiellen Wartezeit, die die gesamte Wartezeit aller Fahrgäste entlang einer Linie beschreibt, ab. Auf Basis dieser Reihung, die sich nach jeder Veränderung des Fahrplans ändern kann und daher immer neu bestimmt wird, kann jene Linie ermittelt werden, die zur nächsten Optimierungsiteration herangezogen wird. Im Zuge der Optimierung einer Linie werden alle Abfahrtszeiten von Servicefahrten innerhalb der gewählten Analyseperiode um jeweils eine Minute so lange verschoben bis der gesamte aufsummierte Zeitversatz dem Taktintervall der Linie entspricht. Für jede Verschiebung wird die gesamte Wartezeit entlang einer Linie und in weiterer Folge das Wartezeitenminimum ermittelt. Bei Anschlussverbindungen, die ein Fahrgast aufgrund der späteren Ankunftszeit des ersten Fahrzeuges nicht mehr erreichen kann, wird die Wartezeit bis zur Abfahrt des nächstmöglich erreichbaren Anschlussfahrzeuges berechnet. Es ist auch von Bedeutung, ob die Wendezeiten an Endhaltestellen einer Linie variieren dürfen. Im Falle variabler Wendezeiten ergibt sich durch ungleichmäßiges Verschieben der Abfahrtszeiten der beiden Richtungen zusätzliches Einsparungspotential hinsichtlich der Wartezeit. Das Verfahren ermittelt nach jeder Verschiebung von Abfahrtszeiten die Verbindungswahl von Fahrgästen durch eine Umlegungsberechnung. Änderungen in der Routenwahl werden somit dynamisch berücksichtigt. Bei den aus der Literatur bekannten Verfahren könnte die Verbindungswahl insofern berücksichtigt werden, dass nach jeder vollständigen statischen Optimierung eine Umlegung berechnet wird und anschließend neuerdings eine Optimierung vorgenommen wird, bis sich die gesamte Wartezeit nicht mehr ändert. Diese Vorgehensweise wäre mit einem enormen Rechenaufwand verbunden. Vorteile, die in dieser Arbeit entwickelten Methode, ergeben sich insofern, dass eine Konzentration der Nachfrage im Zuge der Optimierung erfolgt. Einerseits können einige Linien dadurch besser ausgelastet werden und andererseits wird eine Einsparung an Fahrzeugen durch größere Taktintervalle aufgrund von kleineren Auslastungen an anderen Linien möglich. Diese Methode kann das globale Wartezeitenoptimum auch bei nachträglichen zeitlichen Anpassungen einer Linie finden. Die Optimierung eines Netzes mit dem entwickelten Verfahren wird eingeschränkt, wenn ein Fahrplan aufgrund von Linienabhängigkeiten keine oder nur wenige Freiheitsgrade hat. Bei vielen

Linienbündeln, die nur bei gleichem Takt und längerem gleichen Linienverlauf sinnvoll sind, ergeben sich allerdings kaum Potentiale aus den Verschiebungen von Abfahrtszeiten.

Der Algorithmus zur Lösung des Optimierungsproblems wird in der Software Microsoft Excel unter Ausführung eines Microsoft Visual Basic-Skripts umgesetzt. Dabei erfolgt eine Kopplung mit der Verkehrsplanungssoftware VISUM. Mit dem entwickelten Tool wird eine automatisierte Gestaltung eines Fahrplanes mit optimalen fahrplanmäßigen Anschlussverbindungen und minimalen Wartezeiten für Fahrgäste möglich. Ein bestehender Fahrplan kann mit diesem Verfahren optimiert werden. Lokale Kenntnisse bei einer Anwendung des Fahrplantools und der Verfügbarkeit eines ÖV-Verkehrsmodells mit Fahrplandaten sind prinzipiell nicht erforderlich. Für die Linienbündelung und Linienfixierung sowie der Definition der Mindestwarte- und Mindestwendezeiten sind jedoch lokale Gegebenheiten zu berücksichtigen. Auf Basis der Umlaufplanung von Linien können mögliche Fahrzeugeinsparungen erkannt werden. Unter Verwendung des Tools ergibt sich einerseits eine deutliche Zeitersparnis bei der Fahrplangestaltung und andererseits kann sichergestellt werden, dass die ermittelte Lösung einen optimalen Fahrplan für ein Netz darstellt. Ein weiterer Vorteil des Optimierungstools ist, dass bei geänderten Bedingungen - wie zum Beispiel Änderung der Linienführung durch eine Baustelle - ein optimaler Fahrplan für ein gesamtes Netz ohne großen Zeitaufwand gefunden werden kann. Auch Änderungen von Takten, Fahrzeitprofilen, Wendezeiten, Übergangsgehzeiten oder Linienbündel können berücksichtigt werden und ergeben bei Anwendung der Methode schnell einen netzweiten optimalen Fahrplan. Eine betriebliche Überprüfung des errechneten Fahrplans ist sinnvoll, da Rahmenbedingungen wie beispielsweise Eingleisigkeiten von Streckenabschnitten oder Haltestellengröße nicht berücksichtigt werden.

Aufgrund der Nachfrageabhängigkeit sind die Anforderungen an ein Verkehrsmodell hoch. Datenfehler im Verkehrsangebot oder in der Verkehrsnachfrage pflanzen sich fort und können zu nicht optimalen Lösungen führen. Die Verfügbarkeit von stundenfeinen Quelle-Ziel-Matrizen erhöht den Mehrwert des Verfahrens gegenüber der Berechnung mit einem Tagesmodell. Nachdem Reiseauskunftssysteme im ÖV weit verbreitet sind und deren Qualität einen hohen Standard aufweisen, ist die Verwendung dieser Angebotsdaten im Verkehrsmodell gut geeignet. Für ein qualitativvolles und realitätsnahes Verkehrsmodell ist eine Kalibrierung des Nachfragemodells mit Messwerten oder Zähldaten unumgänglich.

Die exemplarische Anwendung für das ÖPNV- Netz der Stadt Graz für den Zeitbereich von 12 bis 14 Uhr eines repräsentativen Werktags der Kalenderperiode 2011 überprüft die Funktionalität des Tools und zeigt das Optimierungspotential des Fahrplanes auf. Die mittlere Wartezeit pro Umstieg wird durch die angewandte Optimierung um 23 Sekunden reduziert, was einer Verbesserung von rund 16 % entspricht. Insgesamt werden 18.306 Umsteigevorgänge der Ausgangslösung und 18.407 der optimierten Lösung berücksichtigt. In der Ausgangslösung treten bei 6.810 Umsteigevorgängen und nach der Optimierung bei 9.084 Umsteigevorgängen keine Wartezeiten auf. Das bedeutet, dass jeder zweite Umstieg ohne Zeitverlust möglich wird. 4.646 Fahrten von 14.484 Fahrten mit mindestens einem Umstieg weisen einem mittleren Zeitgewinn von 136 Sekunden und 2.032 Fahrten einen

mittleren Zeitverlust von 131 Sekunden auf. Bei einem Viertel der Fahrten mit Zeitgewinn liegt eine teilweise oder gänzliche Änderung in der Verbindungswahl oder Linienwahl vor.

8.2 Potentiale und Forschungsbedarf

In der Regel sind für viele Haltestellen nur Abfahrtszeiten von Fahrten bekannt, außer im Eisenbahnwesen oder bei Haltestellen mit längeren Aufenthalten in der Schwachverkehrszeit der Rendezvous-Technik. Wäre auch eine Verfügbarkeit der Ankunftszeiten gegeben, könnten noch zusätzlich zeitliche Ressourcen genutzt werden. Beispielsweise wäre eine Anschlussverbindung zur Minute 16:00 an einem Umsteigeknoten insofern zu erreichen, dass der Zubringer zur Minute 14:40 an einem Haltepunkt eintrifft und die notwendige Übergangszeit 70 Sekunden beträgt. Bei Verwendung der Abfahrtszeit der Zubringerlinie zur Minute 15:00 kann dieser Anschluss in der Modellierung nicht wahrgenommen werden und wird um 10 Sekunden verpasst.

Eine individuelle Verschiebung der Abfahrtszeiten aller Servicefahrten einer Linie innerhalb einer Analyseperiode könnte noch zusätzliches Potential bringen, besonders bei Übergängen der Verkehrszeit durch Taktsprünge und bei nicht getakteten Linien. So könnten beispielsweise alle Fahrten einer Folgestunde oder einer anderen Verkehrszeit zusätzlich noch einmal um fünf Minuten verschoben werden.

Umstiege auf Linien mit kleineren Taktintervallen (z.B. von Stadtbus auf Straßenbahn) werden bei der Verbindungssuche in der Verkehrsmodellierung gleich wie jene auf Linien mit größeren Taktintervallen (z.B. von Stadtbus auf Zug) abgebildet. Eine verkehrssystemabhängige Definition der Gewichtungsfaktoren für Umsteigewartezeit, Übergangszeit und Anzahl der Umsteigevorgänge hinsichtlich der Verbindungswiderstände einerseits und eine Definition von Wertebereichen der Gewichtungsfaktoren andererseits würden eine verfeinerte Verbindungssuche berücksichtigen.

Der Wissensstand über Entscheidungsgrundlagen von Verkehrsteilnehmern für die Wahl einer Verbindung ist derzeit noch nicht ausreichend. Es fehlen qualitative Informationen über das tatsächliche Routenwahlverhalten. Viele Komponenten, die einen Einfluss auf die Routenwahl haben, werden in der Verbindungswahl der Modellierung derzeit nicht berücksichtigt. Ein detailliertes Wissen über das Routenwahlverhalten von Fahrgästen im öffentlichen Verkehr würde eine qualitative Verbesserung in der Verkehrsmodellierung bewirken. Neben den wichtigen Erkenntnissen für die Fahrplangestaltung wären diese Informationen auch für die Reiseauskunft nützlich.

Mit der entwickelten Methode kann für jedes beliebige wählbare Zeitfenster die Optimierung angewendet werden. Sinnvoll ist eine Vorgabe der Verkehrszeiten, um nicht zu viele Taktsprünge in der Analyseperiode zu erhalten. Jedoch besteht hier der Bedarf Methoden zu entwickeln, die die

Anzahl und die Dauer von Verkehrszeiten entsprechend der vorhandenen Nachfrage ermitteln. Aufgrund der asymmetrischen Belastungen im Laufe eines Tages könnte es durchaus vernünftig sein, nachmittags einen anderen Fahrplan als vormittags zu verwenden.

Um das Angebot in Spitzenzeiten nachfragegerecht anzupassen, wäre es denkbar, vom Prinzip des Taktfahrplans geringfügig abzuweichen. Beispielsweise könnte vor den Spitzen eine bewusste Verzögerung des Taktes kontinuierlich erfolgen, um während der Spitzenzeit mit der gleichen Fahrzeuganzahl das System wieder zu beschleunigen und anschließend auf einen normalen Taktbetrieb zurückzukehren. Dazu ist eine sorgfältige Planung des Fahrplans zwingend notwendig. Der Einsparung von Einschubfahrzeugen steht jedoch eine schlechte Merkbarkeit eines Fahrplanes durch unregelmäßige Abfahrtszeiten gegenüber. Alternativ könnten Takte im Laufe eines Tages für ein auslastungsabhängiges Angebot variieren.

Glossar

Abgangszeit

Die Abgangszeit ist die Zeit, die zum Zurücklegen der Strecke von der letzten Ausstiegshaltestelle bis zum Zielort eines Weges benötigt wird.

Analyseperiode

Die Analyseperiode ist jener Betrachtungszeitraum, für den eine Berechnung von Verbindungswahlen und Kennzahlen auf Basis der dazugehörigen Verkehrsnachfrage erfolgt.

Aussetzfahrt

Sie ist die Fahrt von der letzten regelmäßig bedienten Haltestelle bis zum Fahrzeugabstellort eines Fahrzeuges.

Beförderungszeit

Sie ist jene Zeit, die vom Einstieg in das erste benutzte Fahrzeug bis zum Verlassen des letzten verwendeten Fahrzeuges einer Fahrt im ÖV verstreicht. Sie besteht aus der Fahrzeit im Fahrzeug und der Umsteigezeit.

Direktverbindungen

Eine Direktverbindung liegt vor, wenn bei einer Fahrt zwischen einer Quelle-Ziel-Beziehung kein Linienwechsel benötigt wird.

Einsetzfahrt

Sie ist die Fahrt vom Fahrzeugabstellort bis zur ersten regelmäßig bedienten Haltestelle eines Fahrzeuges.

Empfundene Reisezeit

Sie gibt die für Fahrgäste wahrgenommene Reisedauer einer Fahrt an und hängt im Wesentlichen von den Komponenten Fahrzeit im Fahrzeug, Übergangsgezeit, Wartezeit und der Umsteigeanzahl einer Verbindung ab.

Fahrgastfahrten

siehe Servicefahrten

Fahrplan

Ein Fahrplan gibt auf Basis von Linienverläufen die Ankunfts- und Abfahrtszeiten von Fahrgastfahrten an allen bedienten Haltestellen von Linien an.

Fahrplanfeine Umlegung

Eine fahrplanfeine Umlegung errechnet mit Nachfragedaten von Quelle-Ziel-Beziehungen und einem ÖV-Angebot linienbezogene Querschnitts- und Fahrzeugbelastungen sowie alle Einsteiger, Aussteiger, Durchfahrer und Umsteiger an Haltestellen in einem Verkehrsmodell.

Fahrplangestaltung

Unter der Fahrplangestaltung ist die Erstellung von Fahrplänen von einer oder mehreren Linien innerhalb eines Netzes zu verstehen. Bei mehreren sich verknüpfenden Linien ist die Koordinierung von Anschlussverbindungen an Umsteigehaltestellen zu berücksichtigen.

Fahrplanperiode

Die Fahrplanperiode bezeichnet im ÖV einen Fahrplan innerhalb eines definierten Zeitraums. Üblicherweise beträgt die Dauer einer Fahrplanperiode ein Jahr.

Fahrplansituation

Eine Fahrplansituation ist eine einzige zeitliche Ausprägung eines Fahrplanes. Sie unterscheidet sich zu anderen Fahrplansituationen dadurch, dass zumindest die Abfahrtszeiten einer Linie um mindestens eine Minute versetzt sind.

Fahrt

Als Fahrt wird eine Reise auf einer Route zwischen einem Quell- und Zielort mittels einem oder mehrerer Verkehrsmittel bezeichnet.

Fahrzeitprofil

Die Fahrzeitprofile geben die Dauer von Fahrzeiten zwischen Haltepunkten einer Linienroute an. Sie verfügen über die Information, ob an den Haltepunkten ein- oder ausgestiegen werden darf.

Haltepunkt

Ein Haltepunkt ist die Positionsangabe, bei der ein Fahrzeug für den Fahrgastwechsel stehen bleibt.

Haltestelle

Eine Haltestelle ist ein Ort, der von Fahrzeugen mindestens einer Linie bedient wird. Fahrgäste können an allen Haltepunkten einer Haltestelle ein-, aus- oder umsteigen.

Liniennetz

Unter einem Liniennetz sind mehrere miteinander verknüpfte Linien, die von unterschiedlichen Betreibern bedient werden können, zu verstehen. Zu einem Liniennetz einer Stadt zählen alle angebotenen möglichen Verbindungen.

Linienroute

Eine Linienroute beschreibt den richtungsbezogenen örtlichen Verlauf eines Linienwegs einer Linie in einem Netz. Sie ist eine Folge von Routenpunkten und umfasst ein oder mehrere Fahrzeitprofile.

Mindestwartezeit

Die Mindestwartezeit gibt die Dauer an, die ein umsteigender Fahrgast einer Umsteigerrelation mindestens aufweisen muss um eine Anschlussverbindung im Falle leichter Verspätungen noch zu erreichen.

Mindestwendezeit

Sie ist jene Zeit, die ein Fahrzeug an einer Endhaltestelle mindestens zur Verfügung haben muss, um etwaige Verspätungen einholen und um betriebliche Notwendigkeiten (z.B. Pausenzeit für Lenker oder Fahrerwechsel) erfüllen zu können.

Nachfragematrix

Sie gibt die Fahrtenanzahl jeder Quelle-Ziel-Beziehungen innerhalb eines betrachteten Gebietes meist verkehrssystemfein an.

Nachfragesituation

Eine Nachfragesituation ist eine einzige mengenmäßige Ausprägung der Quelle-Ziel-Matrix. Sie unterscheidet sich von jeder anderen Nachfragesituation dadurch, dass mindestens eine Quelle-Ziel-Beziehung eine geänderte Fahrtenanzahl aufweist.

Potentielle Wartezeit

Die potentielle Wartezeit ist die Summe der Wartezeiten aller Fahrgäste an einer oder aller Umsteigerelationen entlang einer Linie, abzüglich der Übergangsgezeit und der definierten Mindestwartezeiten. Sie gibt prinzipiell das mögliche zeitliche Einsparungspotential an.

Reisezeit

Sie ist jene Zeitdauer, die vom Antritts- bis zum Ankunftszeitpunkt einer Reise vergeht und sich im ÖV aus der Beförderungszeit, der Zugangs- und der Abgangszeit zusammensetzt.

Servicefahrt

Ist eine von einem Betreiber angebotene Fahrt eines Fahrzeuges für eine Linie von einer Start- bis zu einer Endhaltestelle.

Sollfahrplan

Ein Sollfahrplan gibt die planmäßigen Abfahrtszeiten von Fahrzeugen an Haltestellen an.

Taktfamilie

Jeder Takt, der ein ganzzahliges Vielfaches eines Grundtaktes ist, ist Teil einer Taktfamilie.

Taktsprung

Ein Taktprung ist ein Zeitpunkt ab dem sich ein Taktintervall ändert.

Taktverkehr

Bei einem Taktverkehr fahren Fahrzeuge einer Linie mit regelmäßigen Zeitabständen ab.

Übergangsgezeit

Sie gibt die Gezeit, die zum Zurücklegen der Distanz zwischen den Haltepunkten des Ausstieges und des Wiedereinstieges in ein Fahrzeug einer anderen Linie benötigt wird, an.

Umsteigehäufigkeit

Die Umsteigehäufigkeit einer Fahrt gibt die Anzahl der notwendigen Umstiege zwischen einer Quelle-Ziel-Beziehung an.

Umlaufplanung

Die Umlaufplanung hat als Aufgabe, dass für jede planmäßige Fahrt eines Fahrplanes ein Fahrzeug zur Verfügung steht. Ein Umlauf eines Fahrzeuges setzt sich aus einer Einsetzfahrt, einer oder mehreren Fahrgastfahrten und einer Aussetzfahrt zusammen.

Umsteigerelation

Eine Umsteigerelation beschreibt den richtungsbezogenen Übergang vom Ausstiegsort einer Linie bis zum Einstiegsort einer anderen Linie. Die Gegenrichtung ist eine eigene Umsteigerelation.

Umsteigezeit

Die Umsteigezeit ist jene Zeitspanne, die bei einem Linienwechsel eines Fahrgasts zwischen Ankunft eines Fahrzeuges und Abfahrt eines Fahrzeuges der anderen Linie verstreicht. Sie setzt sich aus der Wartezeit und der Übergangsgezeit zusammen.

Verkehrsmittel

Ein Verkehrsmittel ist ein Fortbewegungsmittel mit oder ohne eigenen Antrieb, das der Beförderung von Personen oder Gütern dient. Je nach Verkehrsweg wird bei Verkehrsmittel mit Antrieb zwischen Schienen-, Wasser-, Straßen- und Luftfahrzeuge unterschieden. Nicht motorisierte Verkehrsmittel sind das Fahrrad und zu Fuß gehen.

Verkehrssystem

In einem Verkehrssystem sind alle strukturellen Komponenten enthalten, die zur Ortsveränderung von Personen oder Gütern erforderlich sind. Es beinhaltet sowohl die Verkehrsinfrastruktur als auch die notwendigen Transportmittel. Die verkehrsverursachenden Aktivitäten und die transportierten Personen und Güter gehören auch zum Verkehrssystem.

Verkehrszeit

Im Rahmen der Fahrplangestaltung werden Zeitscheiben bestimmt. Im Regelfall erfolgt eine Einteilung in die Hauptverkehrszeit, in die Nebenverkehrszeit, in die Schwachverkehrszeit und gegebenenfalls in die Nachtverkehrszeit.

Weg

Als Weg wird eine Reise auf einer Route zwischen einem Quell- und Zielort mit oder ohne Benützung eines oder mehrerer Verkehrsmittel bezeichnet.

Wendezeit

Sie ist die Dauer, die ein Fahrzeug an einer End- oder Starthaltestelle verweilt.

Zugangszeit

Die Zugangszeit ist die Zeit, die zum Zurücklegen der Strecke vom Startort eines Weges bis zur ersten Einstiegshaltestelle benötigt wird.

Literaturverzeichnis

ADAMSKI Andrzej, BRYNIARSKA Zofia (1996): Schedule synchronization in public transport by tabu search and genetic method, Division of Transport Organization, Cracow University of Technology

ANG Albert, MCIVOR Michael (2010): Optimal Public-Transport Transfer Synchronization Using Operational Tactics, 45th Annual Conference of the ORSNZ, S140-S149, University of Auckland

bahntech (2007): Diskon- Rat aus dem Rechner, bahntech, Ausgabe 02/07, S4-S9, Koelblin-Fortuna-Druck GmbH, Berlin

bahntech (2008): Pünktlichkeit auf dem Prüfstand, bahntech, Ausgabe 01/08, S20-21, Koelblin-Fortuna-Druck GmbH, Berlin

BASTIAN Michael (2006): Beurteilung der eingesetzten Methoden im Hinblick auf den aktuellen Stand der Forschung im Operations Research, OptiV - Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr

BECKER Josef (2006): Anschlussicherung, OptiV - Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr

BECKER Josef (2006): Umlaufplanung für den ÖV, OptiV - Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr

BOLTZE Manfred, JENTSCH Heiko, FRIEDRICH Bernhard, BASTIAN Michael (2008): OptiV-Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr, Heureka 08, Optimierung in Verkehr und Transport, FGSV Verlag, Stuttgart

BORNDÖRFER Ralf, LIEBCHEN Christian, PFETSCH Marc (2006): Ganzzahlige Optimierung im öffentlichen Verkehr, Skript WS 06/07, Institut für Mathematik, Technische Universität Berlin

BORNDÖRFER Ralf, NEUMANN Monika (2011): Linienoptimierung-reif für die Praxis?, Heureka 11 Optimierung in Verkehr und Transport, Optimierung in Verkehr und Transport, FGSV Verlag, Stuttgart

BORNDÖRFER Ralf, NEUMANN Monika, PFETSCH Marc E. (2008): Angebotsplanung im öffentlichen Nahverkehr, Heureka 08, Optimierung in Verkehr und Transport, FGSV Verlag, Stuttgart

BRUNO Guisepe, IMPROTA Gennaro, SGALAMBRO Antonio (2007): Optimization of the Departure Schedule at a Public Transit Terminal with Multiple Destinations, MISTA 2007, 3th Multidisciplinary International Scheduling Conference, S104-S111, Paris

CARDENEO Andreas, VAN DINTHER Clemens, FURMANS Kai, WEINHARDT Christof (2008): Offene getaktete robuste multimodale Dienstleistungsnetze, Netzwerklogistik: Logistik aus technischer und ökonomischer Sicht - Begleitband zur 13. Magdeburger Logistik-Tagung, Karlsruhe

CASAZZA Walter (1995): Anschlussoptimierung in Fahrplannetzen mit einer Fuzzy-Logik-Bewertung der Umsteigequalität, Fakultät für Bauingenieurwesen und Architektur, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Dissertation

- CEDER Avishai (2007): Public Transit planning and operation: Theory, Modelling And Practice, Transport Research Institute, Technion-Israel Institute of Technology, Butterworth-Heinemann, Haifa
- CEDER Avishai (2011): Optimal Multi-Vehicle Type Transit Timetabling and Vehicle Scheduling, *Procedia Social and Behavioral Sciences* 20, S19-S30
- CEDER Avishai (2011): Public-transport vehicle scheduling with multi vehicle type, *Transportation Research Part C* 19, S485-S497
- DADUNA Joachim R., VOSS Stefan (1995): Practical Experiences in Schedule Synchronization, *Computer-Aided Transit Scheduling*, S39-S55
- DOMSCHKE Wolfgang (1989): Schedule synchronization for public transit networks, *Operations-Research-Spectrum*, Volume 11, S17-S24
- DOMSCHKE Wolfgang, FORST P., VOSS Stefan (1992): Tabu search techniques for the quadratic semi-assignment problem, *New Directions for Operations Research in Manufacturing*, S389-S405
- Dresdner Verkehrsbetriebe AG (2009): Das Busnetz 2010, Aktuelle Fakten zum Thema ÖPNV 4, DVB-Fakt, Dresden
- ERNST Edgar (1982): Fahrplanerstellung und Umlaufdisposition im Containerschiffverkehr, Philosophische Fakultät, Rheinisch-Westfälischen Technische Hochschule Aachen, Dissertation
- FGSV Forschungsgesellschaft für Straßen- u. Verkehrswesen (2001): Merkblatt zum Integralen Taktfahrplan- Definitionen, Randbedingungen, Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen im Fern-, Regional- und Nahverkehr, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung, Köln
- FGSV Forschungsgesellschaft für Straßen- u. Verkehrswesen (2005): HBS- Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen, Fassung 2005, Köln
- FGSV: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2009): RIN Richtlinien für integrierte Netzgestaltung, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung, Köln
- FLEURENT Charles, LESSARD Réjean, SÉGUIN Lise (2007): Transit Timetable Synchronization: Evaluation and Optimization, Giro publications
- FOLKMANN Michael, JESPERSON Julie, NIELSEN Morten N. (2007): Estimates on Rolling Stock and Crew in DSB S-tog Based on Timetables, *Algorithmic Methods for Railway Optimization*, S91-S107, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- FRIEBOLIN Andreas (2009): Verkehrsplanung braucht integrierte Konzepte: Der Cruise Terminal Ostseekai als Baustein in einem zukunftsweisenden Verkehrskonzept, *Verkehr und Technik*, Ausgabe 5/2009, Erich Schmidt Verlag, Halle
- FRIEDRICH Markus (2002): Analyse und Optimierung von Verkehrsnetzen im IV und ÖV, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrs- und Stadtplanung, Heft 14, Technische Universität München
- FRIEDRICH Markus, GERLACH Jürgen (2002): Verfahren zur integrierten Netzbewertung und Netzgestaltung, Heureka 02, Optimierung in Verkehr und Transport, FGSV Verlag, Karlsruhe

- FSV Österreichische Forschungsgesellschaft Straße- Schiene- Verkehr (1999): Optimierung des Öffentlichen Personennahverkehrs, RVS 02.03.11, Verkehrsplanung, Wien
- FÜGENSCHUH Armin, SEPP Michelle, SCHÖNBERGER Christine (2006): Schülerbeförderung "IKOSANA - Integrierte Koordinierung der Schulanfangszeiten und des Nahverkehrs-Angebots", OptiV - Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr
- FÜGENSCHUH Armin, STÖVEKEN Peter (2005): Integrierte Optimierung des ÖPNV-Angebotes und der Schulanfangszeiten, Heureka 05, Optimierung in Verkehr und Transport, S265-S278, FGSV Verlag, Karlsruhe
- GENC Zülfükar (2003): Ein neuer Ansatz zur Fahrplanoptimierung im ÖPNV: Maximierung von zeitlichen Sicherheitsabständen, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität zu Köln, Dissertation
- GENC Zülfükar, SPECKENMEYER Ewald (2001): Fahrplanoptimierung im ÖPNV, Projekt „CATS“ (Computer Aided Tram Scheduling), Institut für Informatik, Universität zu Köln
- GERTSBAKH I. und SERAFINI P. (1991): Periodic transportation schedules with flexible departure times. An interactive approach based on the periodic event scheduling problem and the deficit function approach, European Journal of Operational Research, Volume 50, Issue 3, S298-S309
- GRÖTSCHL Martin, LÖBEL Andreas, VÖLKER Manfred (1996): Optimierung des Fahrzeugumlaufes im öffentlichen Nahverkehr, BMBF-Projekt „Anwendungsorientierte Verbundvorhaben auf dem Gebiet der Mathematik“, ZIB Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin
- GUIHAIRE Valérie, HAO Jin-Kao (2008): Transit Network Design And Scheduling: a Global Review, Preprint submitted to Transportation Research Part A
- GÜNTHER Rolf (1985): Untersuchung planerischer und betrieblicher Maßnahmen zur Verbesserung der Anschlusssicherung in städtischen Busnetzen, Institut für Verkehrsplanung und Verkehrswegebau, Technische Universität Berlin
- HALLER Franz (2011): Nachfrageorientierte Fahrplanoptimierung am Beispiel des Grazer Öffentlichen Verkehrs, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Technische Universität Graz, Masterarbeit
- HAMACHER Horst W., KLAMROTH Kathrin (2006): Lineare Optimierung und Netzwerkoptimierung, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, GWV Fachverlage GmbH, 2.Auflage, Wiesbaden
- HECK Hans-Martin (1986): Anwendung von Optimierungsverfahren beim Entwurf und bei der Gestaltung von städtischen Straßennetzen unter Berücksichtigung des Betriebes, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 492, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn
- HECK Hans-Martin, BOBINGER Rupert (2006): Netzentwurf und Netzoptimierung "Konzepte-Struktur-Dimensionierung", OptiV - Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr
- IFFLÄNDER Helmut (2009): Sichere Arbeitsabläufe bei Betriebsstörungen, Verkehr und Technik, Ausgabe 06/2009, S209-S210, Erich Schmidt Verlag, Halle

- JAMILI A., SHAFIA M. A., SADJADI S. J., TAVAKKOLI-MOGHADDAM R. (2012): Solving a periodic single-track train timetabling problem by an efficient hybrid algorithm, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 25, S793-S800
- JORVANG Claus, NEUFELD Anna, SCHLAKOW Sergej (2005): Optimierungssystem zur integrierten Umlaufplanung und Dienstplanung, *Heureka 05, Optimierung in Verkehr und Transport*, S501-S511, FGSV Verlag, Karlsruhe
- JUNGLAS Peter (2011): *Simulationstechnik 2, Skript 2011*, FHWT Vechta-Diepholz-Oldenburg
- KAISER Jürgen (2008): Generierung von Linienbündeln im ÖPNV, *Heureka 08, Optimierung in Verkehr und Transport*, FGSV Verlag, Stuttgart
- KIRCHHOFF Peter (2002): *Städtische Verkehrsplanung Konzepte, Verfahren, Maßnahmen*, B. G. Teubner GmbH
- KIRCHHOFF Peter, TSAKARESTOS Antonios (2007): *Planung des ÖPNV in ländlichen Räumen: Ziele – Entwurf – Realisierung*, B. G. Teubner Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- KÖNIGSHOFER Daniela (2009): *Verkehrsbetreiberübergreifendes Umsteigeverhalten von Fahrgästen des ÖPNV an wichtigen Umsteigeknoten in Graz*, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Technische Universität Graz, Diplomarbeit
- KOOP Andreas und MOOCK Hardy (2008): *Lineare Optimierung- eine anwendungsorientierte Einführung in Operations Research*, Spektrum Akademischer Verlag
- KRISTA Matthias (1996): *Methoden zur Fahrplanoptimierung dargestellt am Beispiel der Synchronzeiten*, Institut für Eisenbahn und Verkehrssicherung, Technische Universität Braunschweig, Dissertation
- KROON Leo G., DEKKER Romert, VROMANS Michiel J.C.M. (2007): *Cyclic Railway Timetabling: A Stochastic Optimization Approach, Algorithmic Methods for Railway Optimization*, S41-S66, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- LICHTENEGGER Michael (1990): *Der Taktfahrplan, Abbildung und Konstruktion mit Hilfe der Graphentheorie, Minimierung der Realisierungskosten*, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, Technische Universität Graz, Dissertation
- LICHTENEGGER Michael (2004): *Eisenbahnbetrieb, Skript WS 04/05*, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, Technische Universität Graz
- LIEBCHEN Christian (2002): *A Case Study in Periodic Timetabling*, *Electronic Notes in Theoretical Computer Science* 66 No. 6
- LIEBCHEN Christian (2004): *Symmetry for Periodic Railway Timetables*, *Electronic Notes in Theoretical Computer Science* 92, S34-S51
- LIEBCHEN Christian (2005): *Der Berliner U-Bahnfahrplan 2005- Realisierung eines mathematisch optimierten Angebotskonzeptes*, *Heureka 05, Optimierung in Verkehr und Transport*, S483-S500, FGSV Verlag, Karlsruhe
- LIEBCHEN Christian (2006): *Periodic Timetable Optimization in Public Transport*, Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften der Technischen Universität Berlin, Dissertation

LIEBCHEN Christian, MÖHRING Rolf (2007): The Modeling Power of the Periodic Event Scheduling Problem: Railway Timetables — and Beyond, Algorithmic Methods for Railway Optimization, S3-S40

LIEBCHEN Christian, NÖKEL Klaus (2002): Überführung eines mathematischen Modells zur Taktversatzoptimierung in die Praxis, Heureka 02, Optimierung in Verkehr und Transport, S49-S61, FGSV Verlag, Karlsruhe

LIEBCHEN Christian, PEETERS L. (2009): Integral cycle bases for cyclic timetabling, Discrete Optimization 6, S98-S109

LOSSEN Elisabeth, STEINFELS Torsten (2006): Standortplanung "Optimale Standorte von Depots und Haltestellen", OptiV - Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr

MARAULI Anton (2011): Nachfrageorientierte Verkehrsmodellbasierte ÖPNV- Planung, 9. Sommerakademie 2011, Trends in der ÖPNV-Planung, S73-S85, Graz

MARAULI Anton, FELLENDORF Martin, BERGER Martin, SELZ Emanuel (2011): ÖV-Angebotsdaten in einem GIS-basierenden Verkehrsnachfragemodell, Angewandte Geoinformatik 2011, Beiträge zum 23. AGIT-Symposium, S393-S402, Salzburg

MÜLLER Thorsten, OPITZ Jens, RITTNER Michael (2011): Weiterentwicklung eines linearen Linienoptimierungsmodells mit Hilfe entscheidender Kenntnisse aus der Betriebspraxis – Umsetzung für die Anwendung, Heureka 11 Optimierung in Verkehr und Transport, Optimierung in Verkehr und Transport, FGSV Verlag, Stuttgart

MÜLLER-HANNEMANN Matthias, SCHULZ Frank, WAGNER Dorothea, ZAROLIAGIS Christos (2007): Timetable Information: Models and Algorithms, Algorithmic Methods for Railway Optimization, S67-S90

NACHTIGALL Karl, JEROSCH Karl (1996): Periodic network optimization with different arc frequencies, Discrete Applied Mathematics 69, S1-S17

NACHTIGALL Karl, JEROSCH Karl (2008): Simultaneous Network Line Planning and Traffic Assignment, ATMOS 2008- 8th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modeling, Optimization and Systems, Karlsruhe

NÖKEL Klaus, BUNDSCHUH Michael (2008): Robuste Umsteigeverbindungen: Zuverlässigkeit von Fahrplänen aus Fahrgastsicht, Heureka 08, Optimierung in Verkehr und Transport, Optimierung in Verkehr und Transport, FGSV Verlag, Stuttgart

NÖKEL Klaus (2006): Network Design for Public Transport, A VISUM model, PTV AG, Karlsruhe

o. A. (2006): Aufgaben im Verkehr, OptiV - Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr

o. A. (2006): Optimierungsmethoden im Verkehr, OptiV - Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr

ODIJK Michiel A. (1996): A constraint generation algorithm for the construction of periodic railway timetables, Transportation Research Part B: Methodological, Volume 30, Issue 6, S455-S464

- ODIJK Michiel A., ROMEIJN H. Edwin und VAN MAAREN Hans (2006): Generation of classes of robust periodic railway timetables, *Computers & Operations Research*, Volume 33, Issue 8, S2283-S2299
- PACHL Jörn (2012): Systemtechnik des Schienenverkehrs- Bahnbetrieb planen, steuern und sichern, 5. Bearbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden
- PAPAGEORGIOU Markos (2006): Schwierigkeiten bei der Anwendung von Optimierungsmethoden im Verkehrswesen, *OptiV - Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr*
- PFETSCH Marc (2007): Ganzzahlige Optimierung im öffentlichen Verkehr, Linienplanung, Skript WS 06/07, Institut für Mathematik, Technische Universität Berlin
- PROCEED (2009): Grundsätze für den erfolgreichen Betrieb und die Entwicklung eines qualitativ hochwertigen Öffentlichen Personennahverkehrs, Ergebnisbericht 4, Leitfaden für einen qualitativ hochwertigen Stadtbusverkehr in Klein- und Mittelstädten in Europa, *Research for sustainable mobility*, Generaldirektion Energie und Verkehr
- PTV AG (2011): VISUM 12 - Benutzerhandbuch, ptv vision, traffic mobility logistics, Karlsruhe
- PTV AG (2011): VISUM 12 - Grundlagen, ptv vision, traffic mobility logistics, Karlsruhe
- RIEßBERGER Klaus (2004): Nahverkehr, Skript WS 04/05, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, Technische Universität Graz
- SCHMIDT D. (2006): Integrierte Linien- und Taktfahrplanung "Linienverlauf und Taktfahrplan gemeinsam optimieren", *OptiV - Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr*
- SCHOLL Susanne (2005): Customer-oriented line planning, Fachbereich Mathematik, Technische Universität Kaiserslautern, Dissertation
- SCHRÖDER Michael, SCHÜLE Ingmar (2007): SynPlan, Ein neuer Lösungsansatz für die Fahrplanabstimmung in Verkehrsverbänden, Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM), Kaiserslautern
- SCHRÖDER Michael, SOLCHENBACH Ingmar (2006): Optimization of transfer quality in regional public transit, *Berichte des Fraunhofer ITWM*, Nr. 84, Fraunhofer Institut Techno- und Wirtschaftsmathematik, Kaiserslautern
- SCHRÖDER Michael, SCHÜLE Ingmar (2008): Interaktive mehrkriterielle Optimierung für die regionale Fahrplanabstimmung in Verkehrsverbänden, *Straßenverkehrstechnik*, Ausgabe 6/2008, S332-S340, Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn
- SEERAINER Anja (2004): Strukturelle Bewertung von Buslinien im städtischen Raum, Studiengang Infrastrukturwirtschaft, Fachhochschule Joanneum Kapfenberg, Diplomarbeit
- SERAFINI Paolo und UKOVICH Walter (1989): A mathematical model for periodic scheduling problems, *SIAM Journal Discrete Mathematics*, Volume 2, Issue 4, S550-S581
- SERAFINI Paolo, SPERANZA M. G. (2003): Production scheduling problems in a textile industry, *European Journal of Operational Research*, *Practical Combinatorial Optimization*, Volume 58, Issue 2, S173-S190

SHAFIA M. A., SADJADI S. J., JAMILI A., TAVAKKOLI-MOGHADDAM R., POURSEYED-AGHAEI M. (2011): The periodicity and robustness in a single-track train scheduling problem, Applied Soft Computing, Volume 12, Issue 1, S440-S452

SIMONIS Carsten, WALL H. (1980): Omnibusse zur Erschließung von Verdichtungsräumen und deren Randzonen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 317, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn- Bad Godesberg

STEMME Wolfgang (1988): Anschlußoptimierung in Netzen des öffentlichen Personennahverkehrs, Fachbereich 20, Technische Universität Berlin, Dissertation

STEUER Arne (2000): Über die Bemessung außerplanmäßiger Synchronzeiten in einem periodischen Netz des Eisenbahn-Personenverkehrs. Eine Untersuchung mittels objektorientierter Simulation, Wirtschafts- und Organisationswissenschaften, Universität der Bundeswehr Hamburg, Dissertation

Transportation Research Board (2004): TCQSM- Transit Capacity and Quality of Service Manual, Washington D. C.

VDV Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (1992): Linienoptimierung, VDV Schriften 2, Ausgabe 10/92, Köln

VDV Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2001): Verkehrserschließung und Verkehrsangebot im ÖPNV, VDV Schriften 4, Ausgabe 6/2001, Köln

VDV Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2008): Ist Daten Schnittstelle (VDV 453), VDV Schriften 453, Ausgabe 03/08, Köln

VDV Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (2008): Ist Daten Schnittstelle (VDV 454), VDV Schriften 454, Ausgabe 03/08, Köln

VINCE A. (1989): Scheduling Periodic Events, Discrete Applied Mathematics 25, S299-S310

VOSS Stefan (1992): Network design formulations in schedule synchronization, Computer-Aided Transit Scheduling, Volume 386, S137-S152

WALTER Stefan (2010): Nachfrageorientierte Liniennetzoptimierung am Beispiel Graz, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Technische Universität Graz, Diplomarbeit

WALTER Stefan (2010): Steuerungsmöglichkeiten für Verkehrsverbünde in Österreich, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, Technische Universität Graz, Masterprojekt

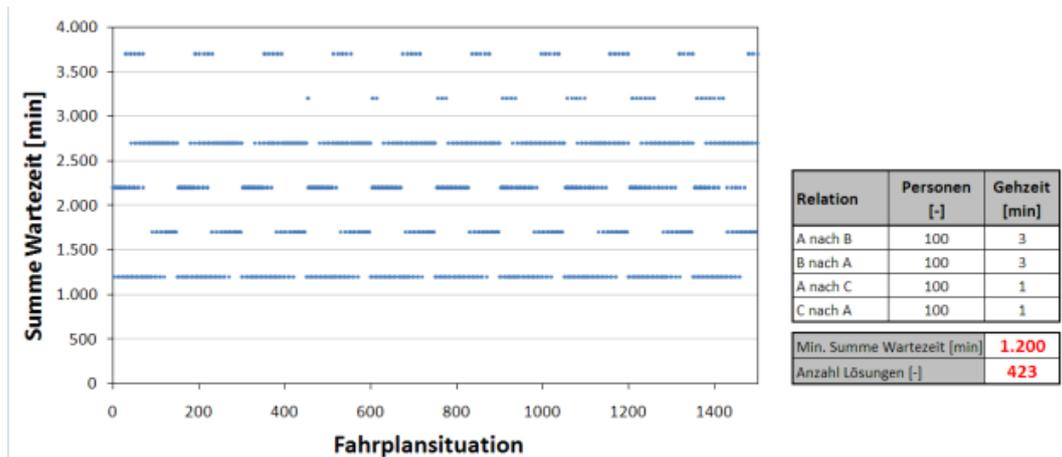
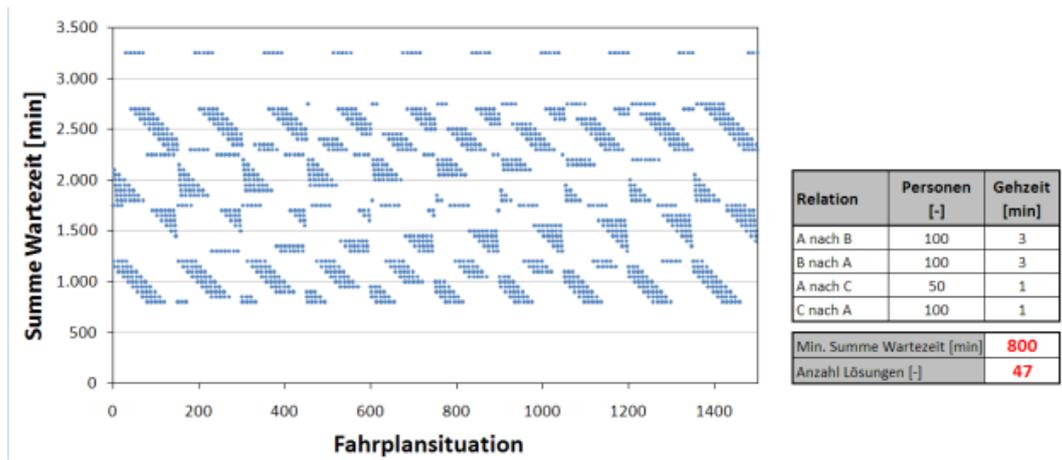
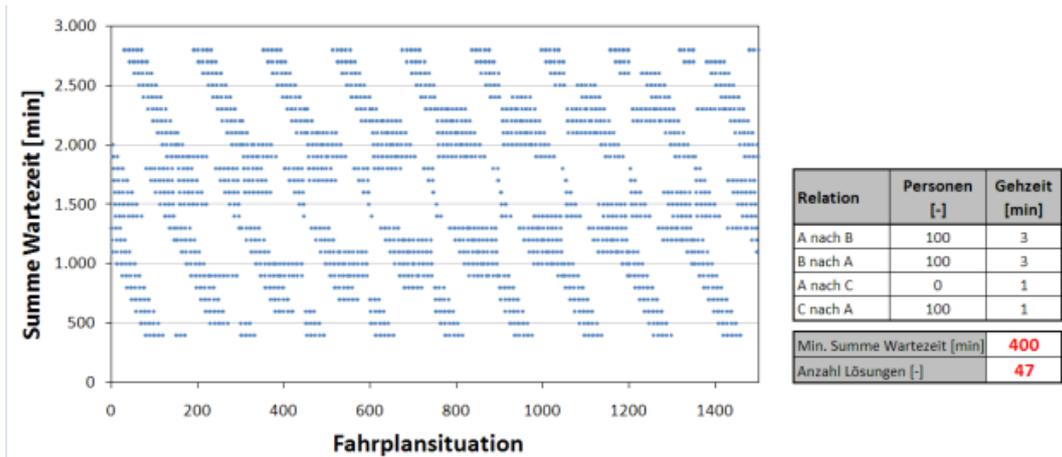
WALTHER Christoph, BUNDSCHUH Michael (2009): ÖV-Anschlusssicherung: Methode und Tool zur Qualitätsverbesserung von Anschlussbeziehungen, Symposium zu den Projektergebnissen MOSAIQUE, Leipzig

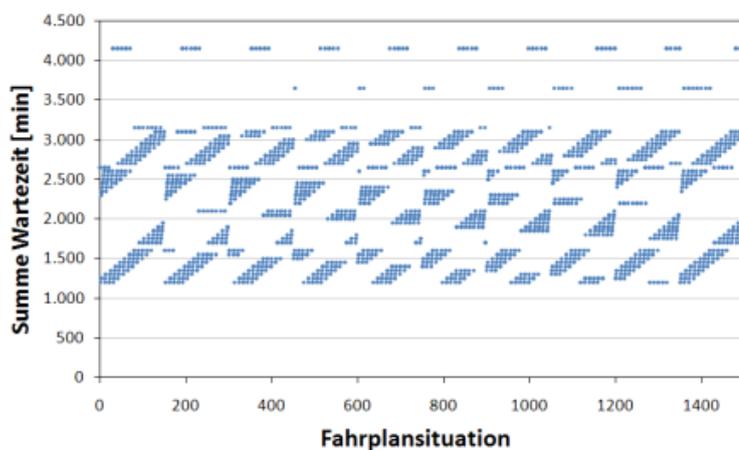
WEIS Claude (2006): Routenwahl im ÖV, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Diplomarbeit

Anhang

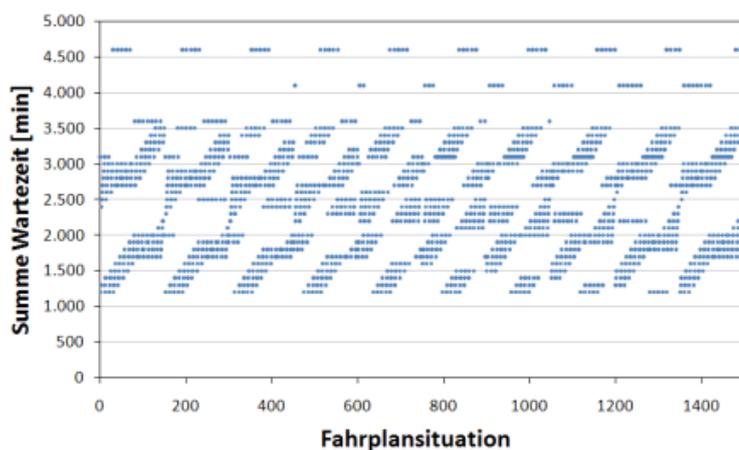
A Einfluss Nachfrage auf Fahrplan

A1 Änderung der Nachfrage bei Relation A nach C von 0 auf 200 in 50er Schritten



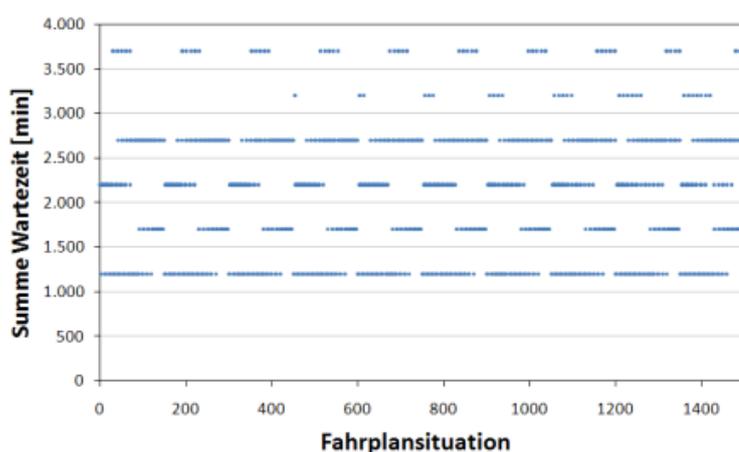


Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	100	3
B nach A	100	3
A nach C	150	1
C nach A	100	1
Min. Summe Wartezeit [min]		1.200
Anzahl Lösungen [-]		47

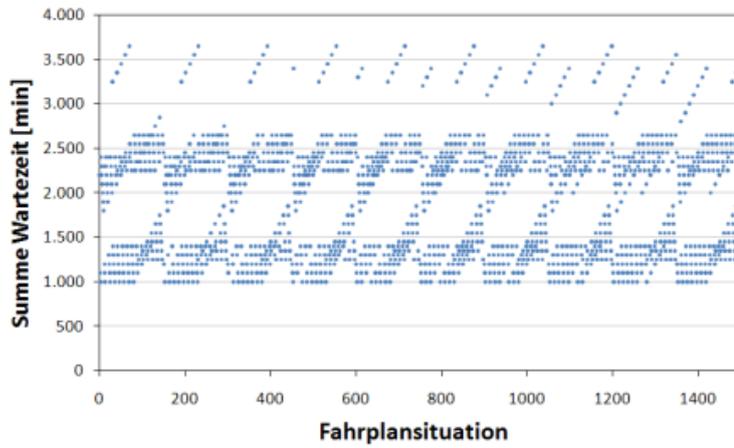


Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	100	3
B nach A	100	3
A nach C	200	1
C nach A	100	1
Min. Summe Wartezeit [min]		1.200
Anzahl Lösungen [-]		47

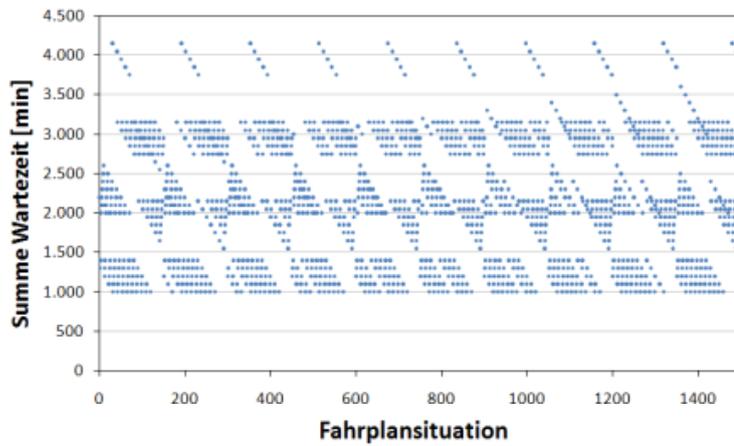
A2 Konstante Gesamtnachfrage an jeder Haltestelle bei unterschiedlichen Aufteilungen



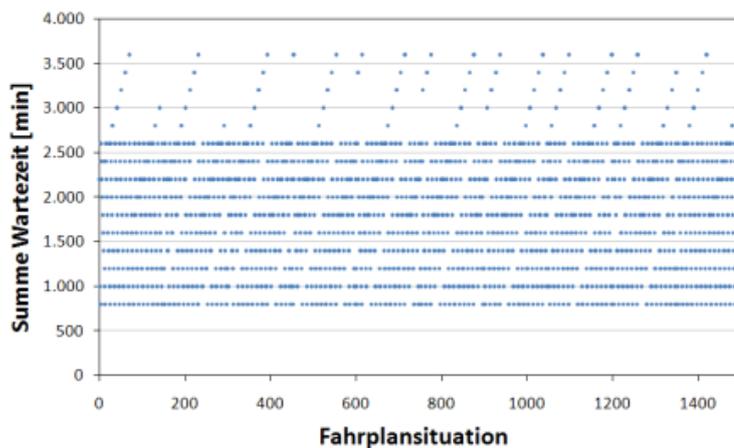
Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	100	3
B nach A	100	3
A nach C	100	1
C nach A	100	1
Min. Summe Wartezeit [min]		1.200
Anzahl Lösungen [-]		423



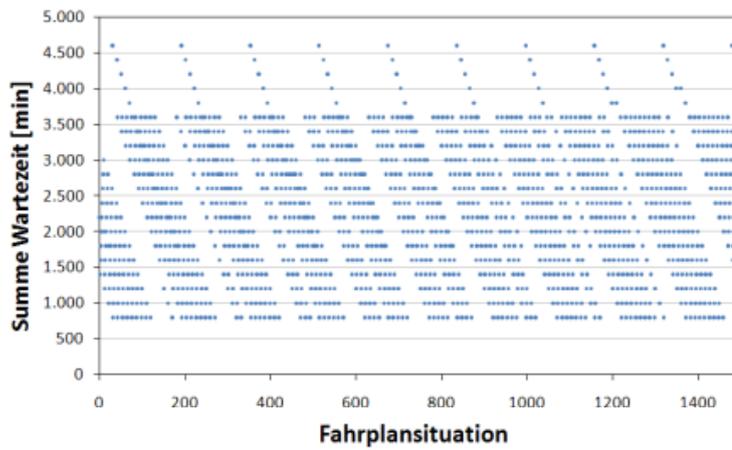
Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	50	3
B nach A	150	3
A nach C	100	1
C nach A	100	1
Min. Summe Wartezeit [min]		1.000
Anzahl Lösungen [-]		72



Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	150	3
B nach A	50	3
A nach C	100	1
C nach A	100	1
Min. Summe Wartezeit [min]		1.000
Anzahl Lösungen [-]		90

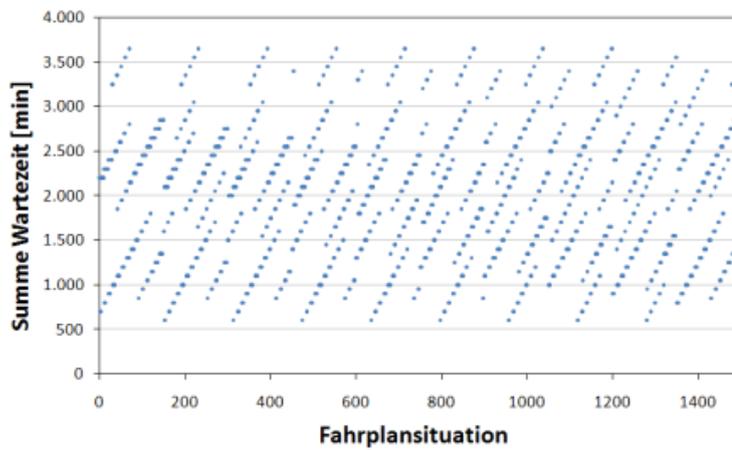


Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	0	3
B nach A	200	3
A nach C	100	1
C nach A	100	1
Min. Summe Wartezeit [min]		800
Anzahl Lösungen [-]		135



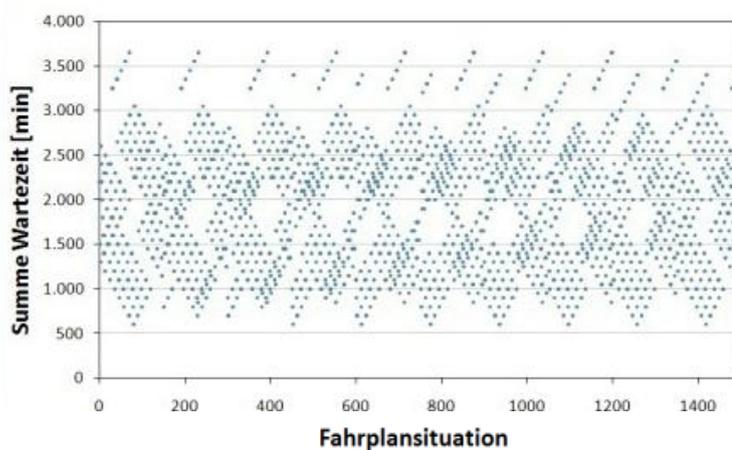
Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	200	3
B nach A	0	3
A nach C	100	1
C nach A	100	1

Min. Summe Wartezeit [min]	800
Anzahl Lösungen [-]	90



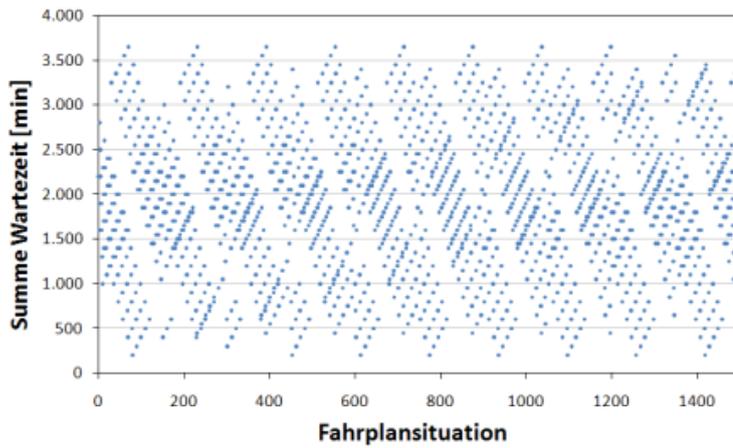
Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	50	3
B nach A	150	3
A nach C	150	1
C nach A	50	1

Min. Summe Wartezeit [min]	600
Anzahl Lösungen [-]	8

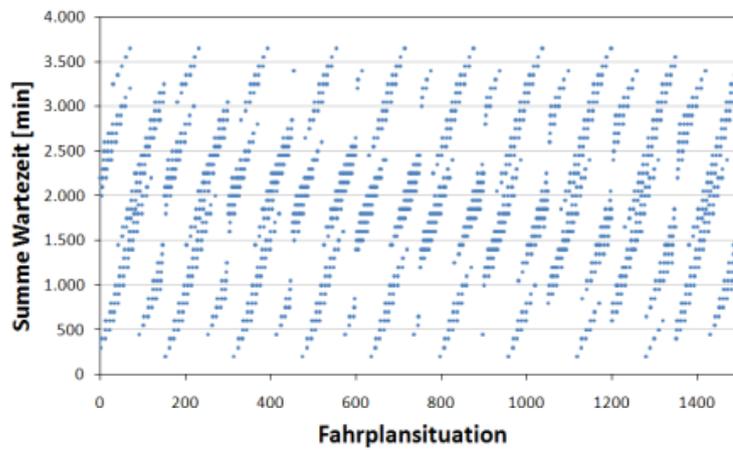


Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	50	3
B nach A	150	3
A nach C	50	1
C nach A	150	1

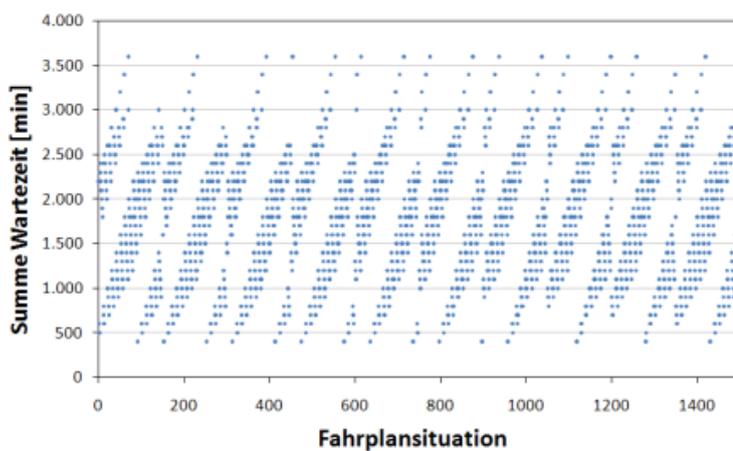
Min. Summe Wartezeit [min]	600
Anzahl Lösungen [-]	8



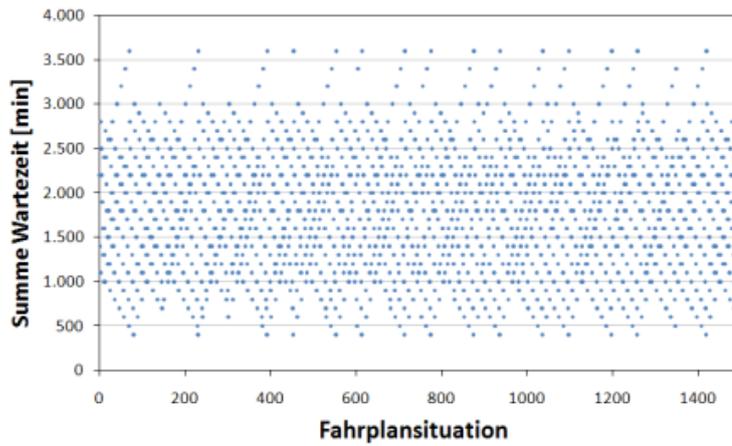
Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	50	3
B nach A	150	3
A nach C	0	1
C nach A	200	1
Min. Summe Wartezeit [min]		200
Anzahl Lösungen [-]		8



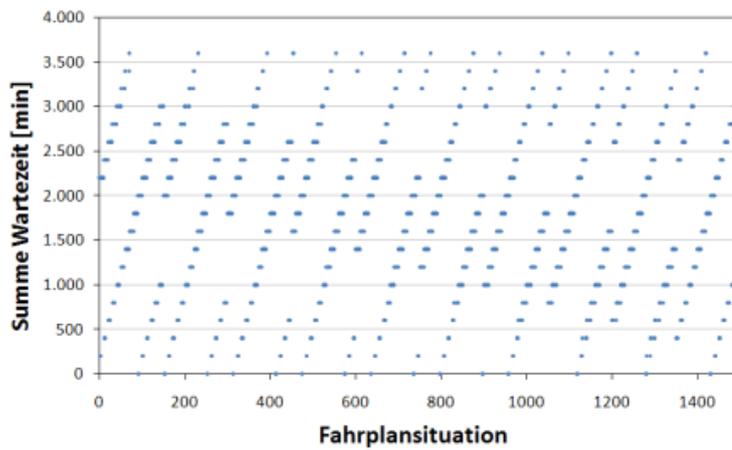
Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	50	3
B nach A	150	3
A nach C	200	1
C nach A	0	1
Min. Summe Wartezeit [min]		200
Anzahl Lösungen [-]		8



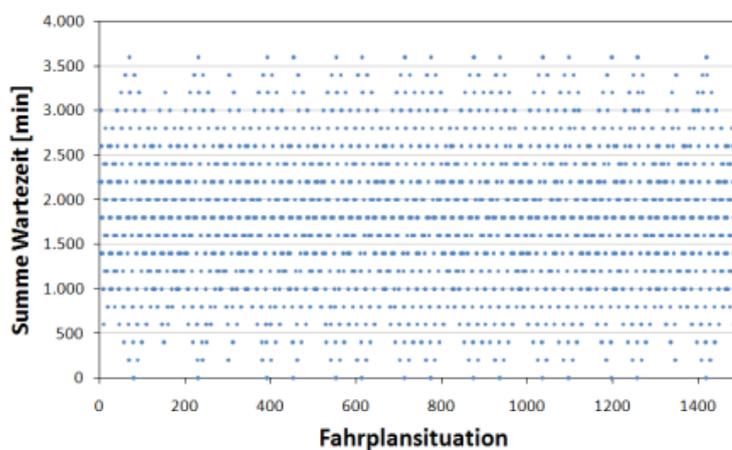
Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	0	3
B nach A	200	3
A nach C	150	1
C nach A	50	1
Min. Summe Wartezeit [min]		400
Anzahl Lösungen [-]		15



Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	0	3
B nach A	200	3
A nach C	50	1
C nach A	150	1
Min. Summe Wartezeit [min]		400
Anzahl Lösungen [-]		15

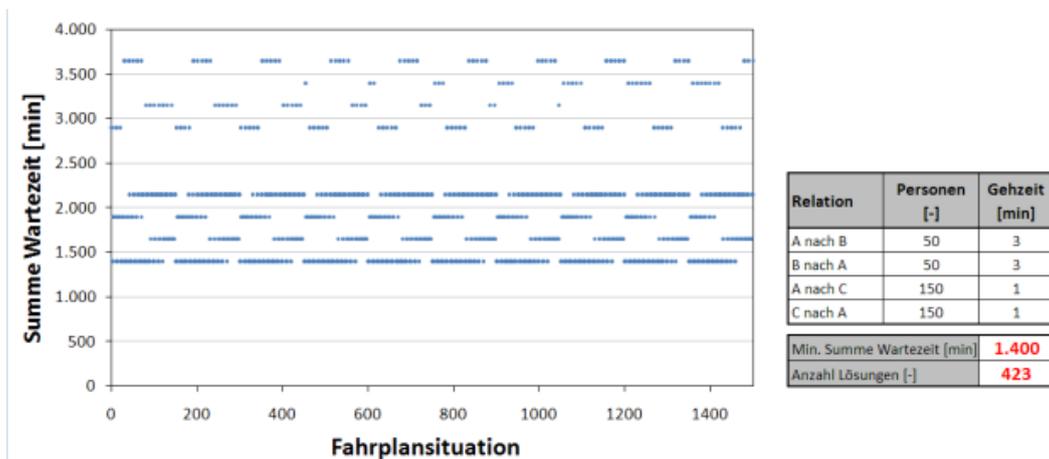
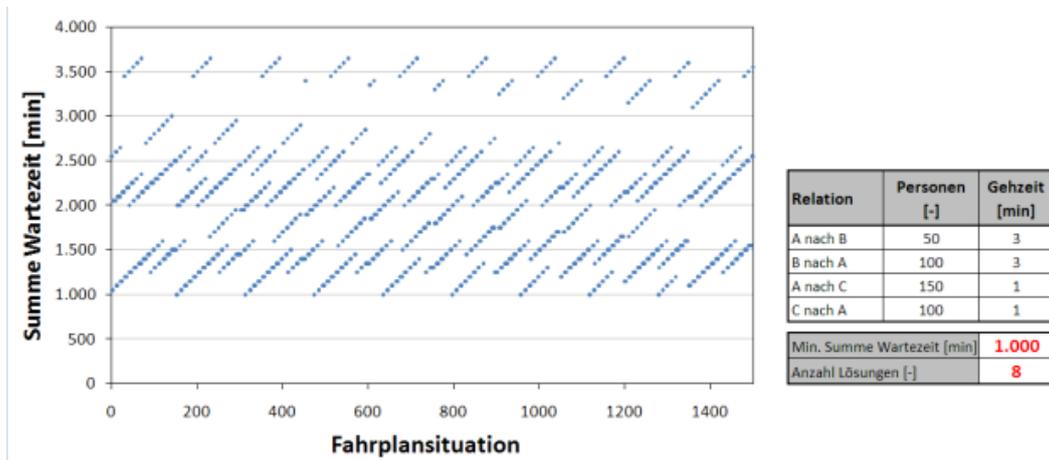
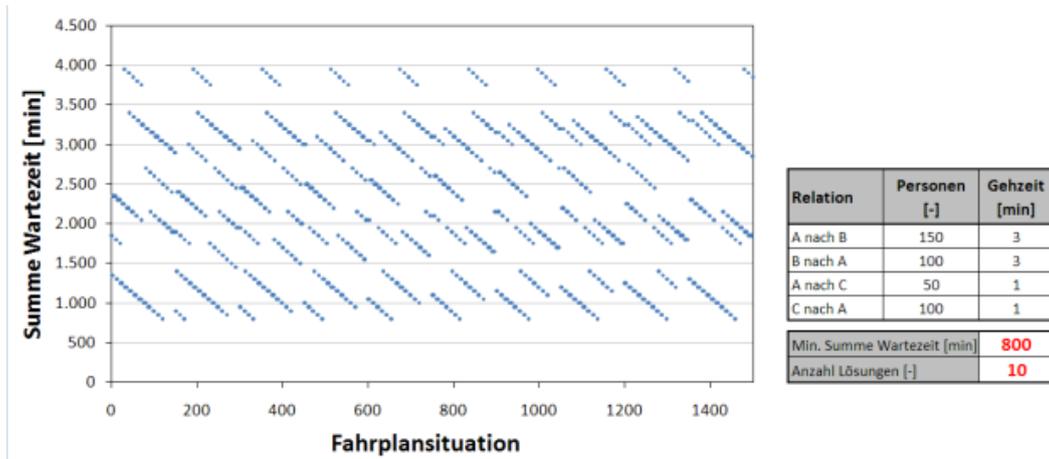


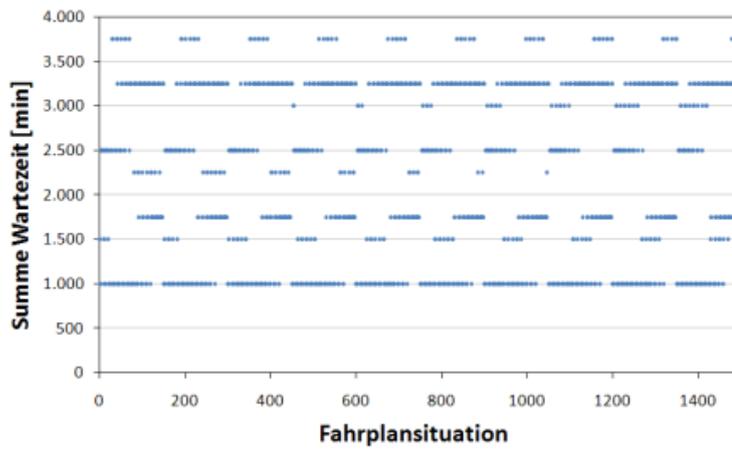
Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	0	3
B nach A	200	3
A nach C	200	1
C nach A	0	1
Min. Summe Wartezeit [min]		0
Anzahl Lösungen [-]		15



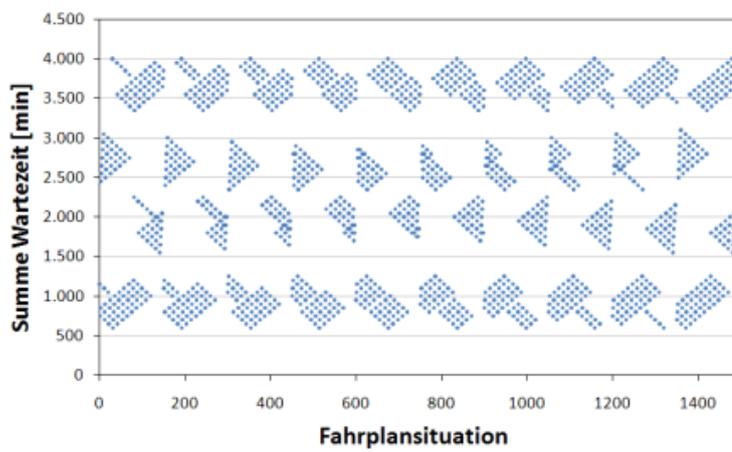
Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	0	3
B nach A	200	3
A nach C	0	1
C nach A	200	1
Min. Summe Wartezeit [min]		0
Anzahl Lösungen [-]		15

A3 Konstante Gesamtnachfrage bei unterschiedlichen Verteilungen auf Haltestellen

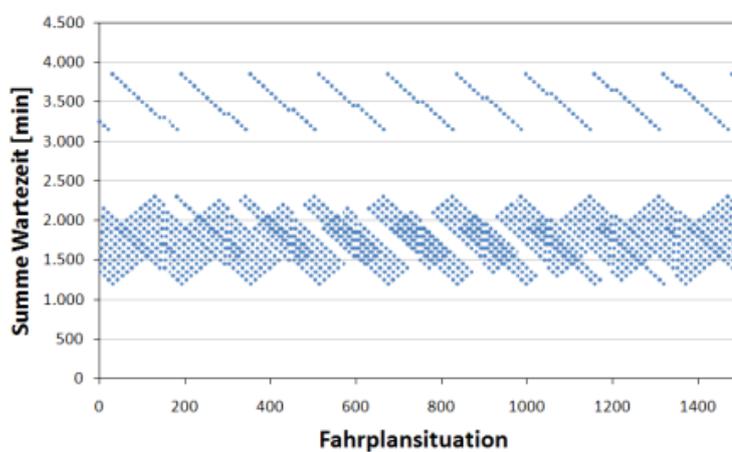




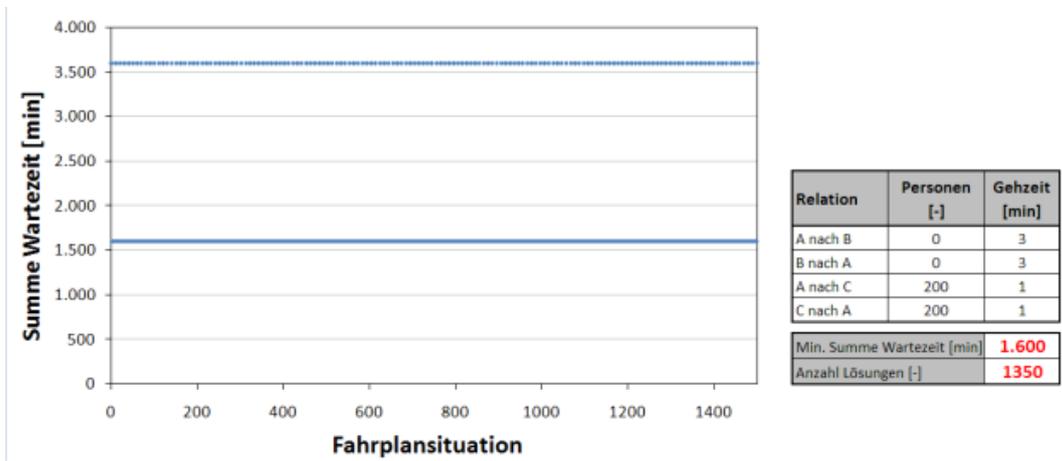
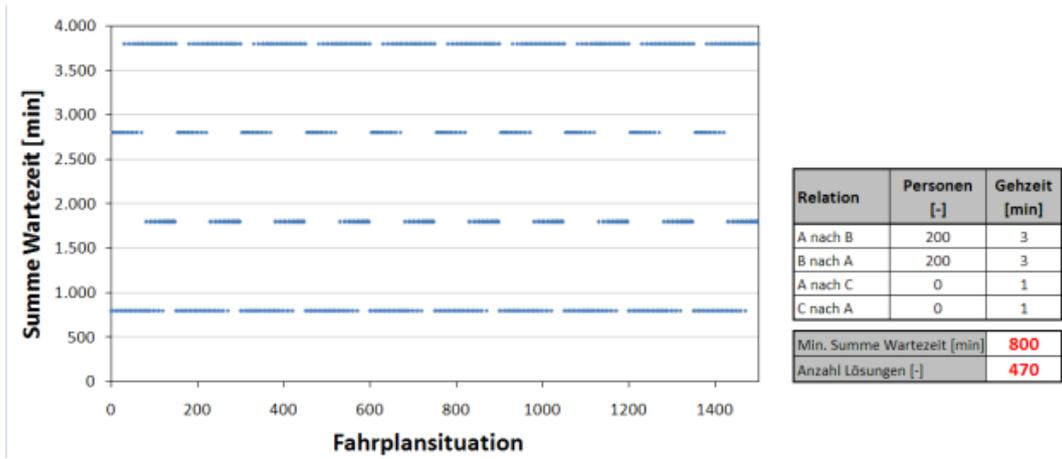
Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	150	3
B nach A	150	3
A nach C	50	1
C nach A	50	1
Min. Summe Wartezeit [min]		1.000
Anzahl Lösungen [-]		423



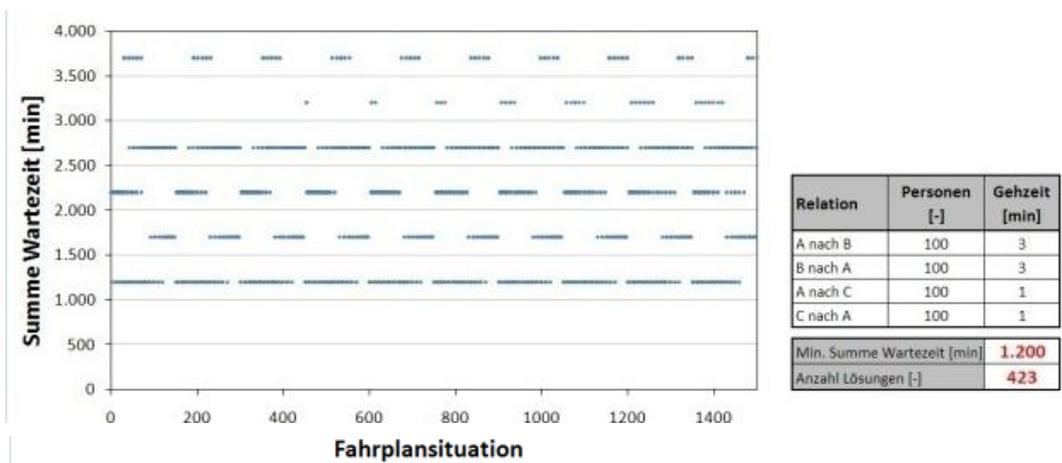
Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	200	3
B nach A	150	3
A nach C	50	1
C nach A	0	1
Min. Summe Wartezeit [min]		600
Anzahl Lösungen [-]		10

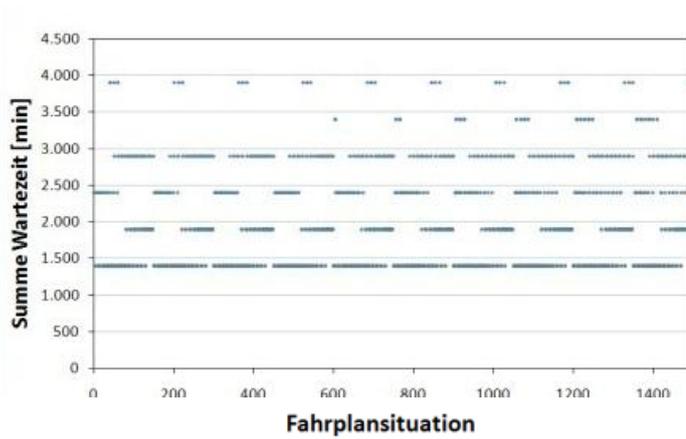


Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	50	3
B nach A	0	3
A nach C	200	1
C nach A	150	1
Min. Summe Wartezeit [min]		1.200
Anzahl Lösungen [-]		10

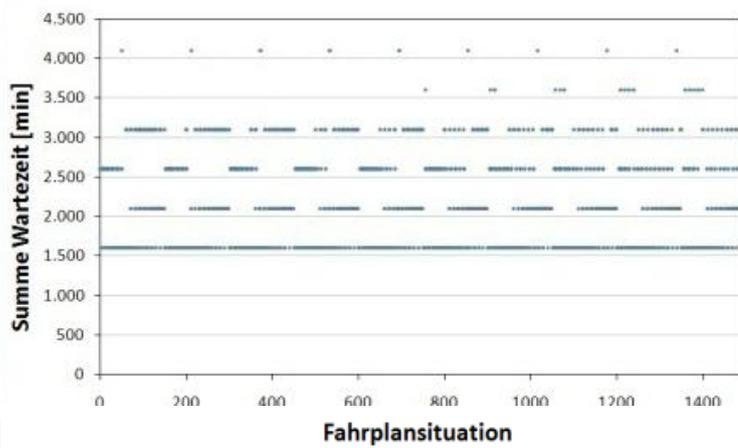


A4 Konstante Gesamtnachfrage bei unterschiedlichen Übergangsgelzeiten

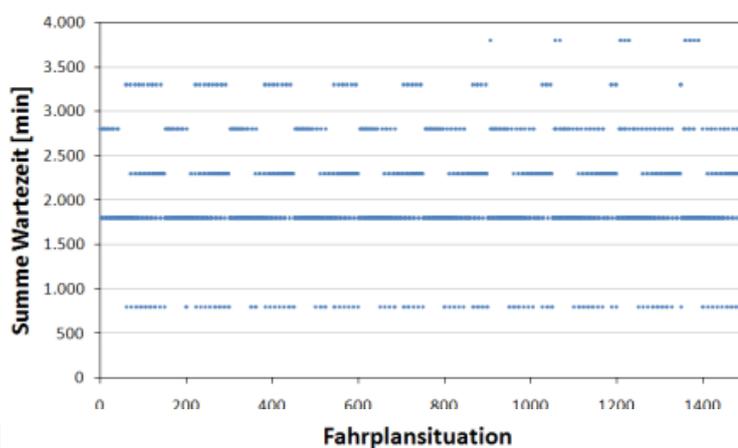




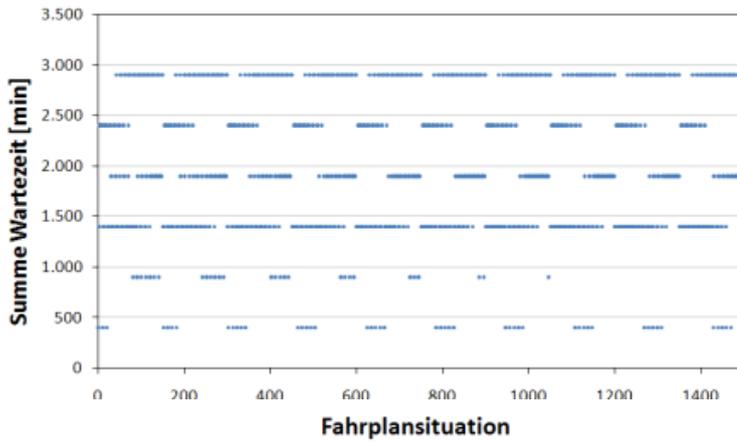
Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	100	2
B nach A	100	2
A nach C	100	1
C nach A	100	1
Min. Summe Wartezeit [min]		1.400
Anzahl Lösungen [-]		576



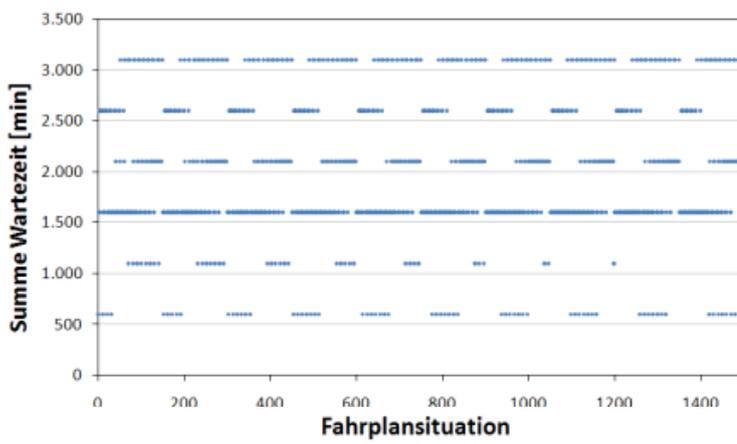
Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	100	1
B nach A	100	1
A nach C	100	1
C nach A	100	1
Min. Summe Wartezeit [min]		1.600
Anzahl Lösungen [-]		720



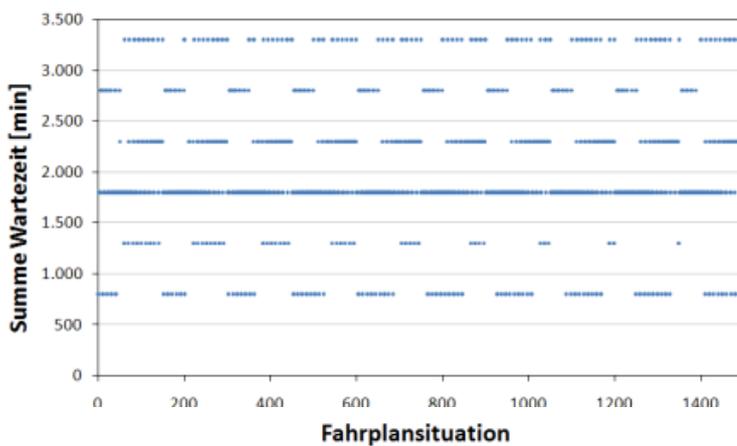
Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	100	0
B nach A	100	0
A nach C	100	1
C nach A	100	1
Min. Summe Wartezeit [min]		800
Anzahl Lösungen [-]		90



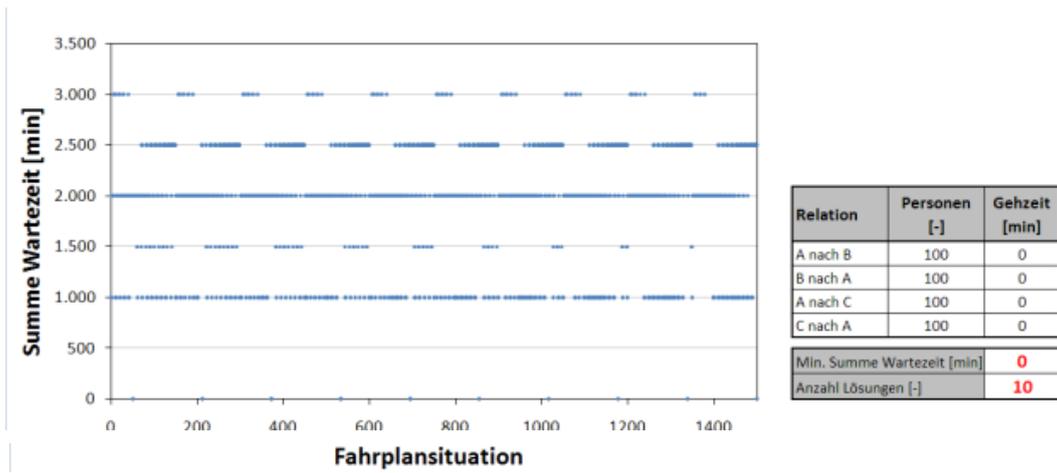
Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	100	3
B nach A	100	3
A nach C	100	0
C nach A	100	0
Min. Summe Wartezeit [min]		400
Anzahl Lösungen [-]		47



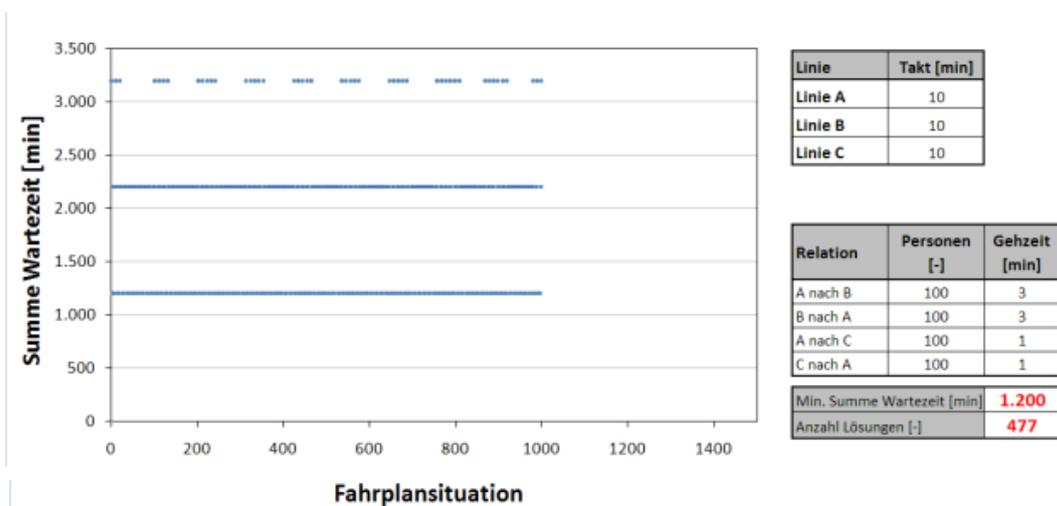
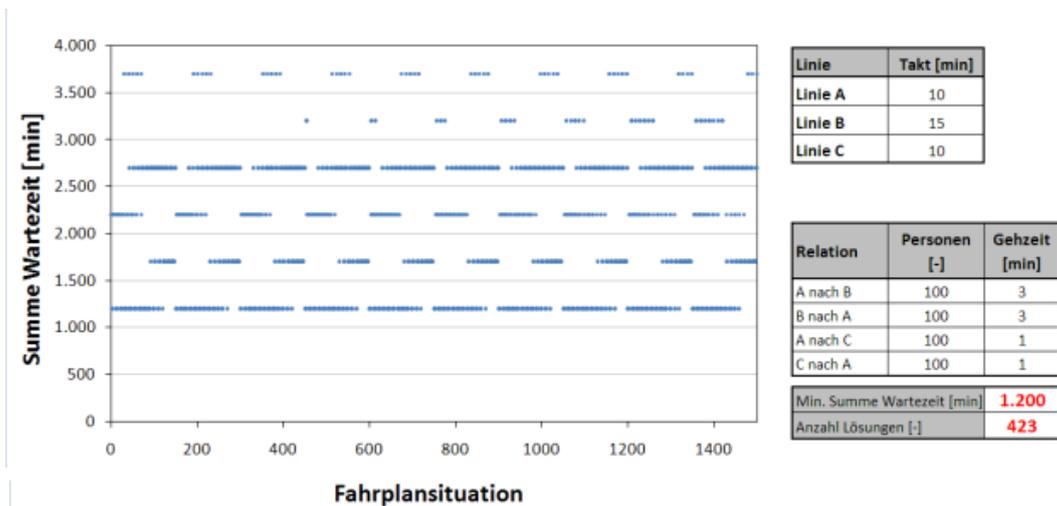
Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	100	2
B nach A	100	2
A nach C	100	0
C nach A	100	0
Min. Summe Wartezeit [min]		600
Anzahl Lösungen [-]		64

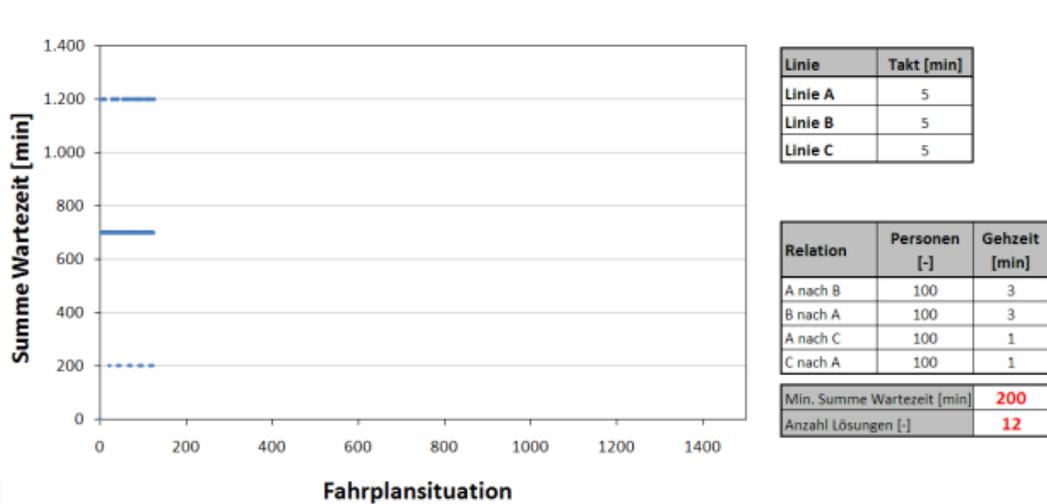
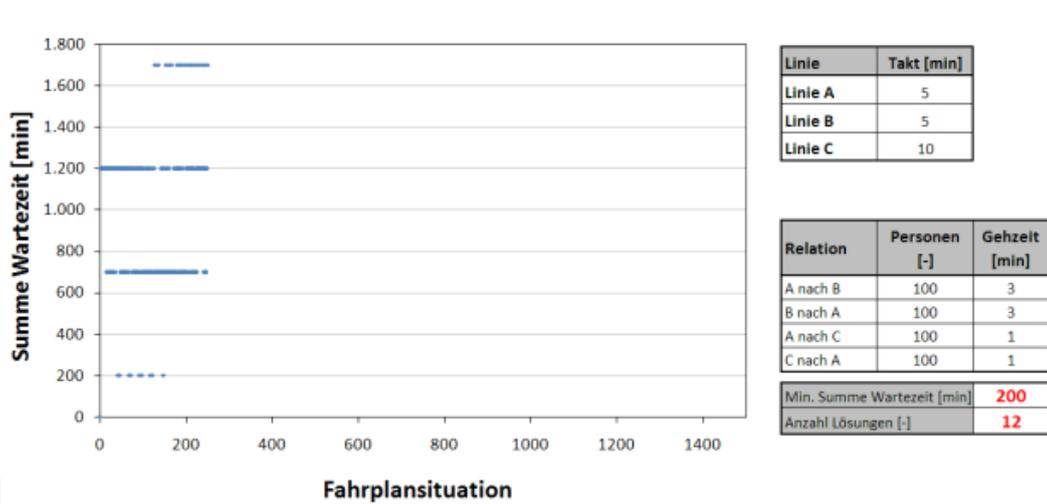
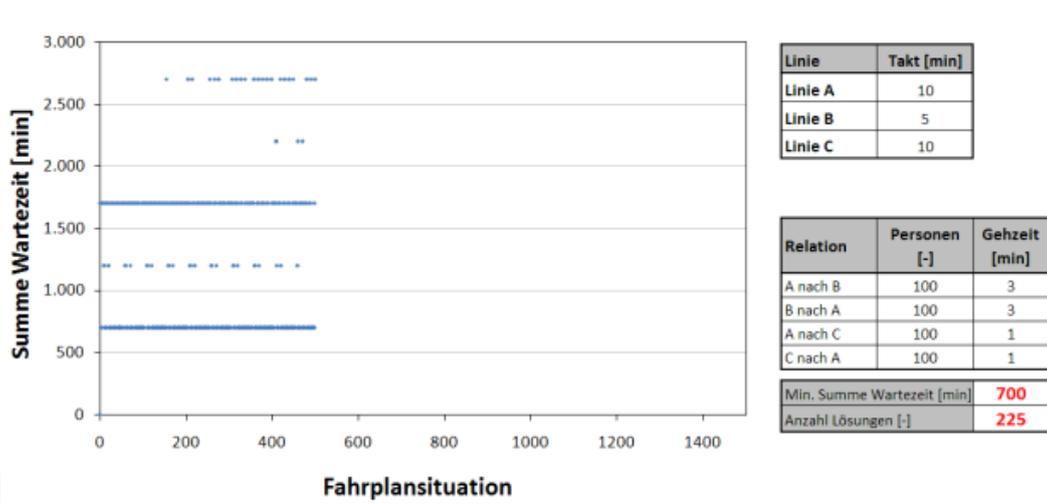


Relation	Personen [-]	Gehzeit [min]
A nach B	100	1
B nach A	100	1
A nach C	100	0
C nach A	100	0
Min. Summe Wartezeit [min]		800
Anzahl Lösungen [-]		80



A5 Konstante Gesamtnachfrage bei unterschiedlichen Taktintervallen





B Variation der Parameter des Aufteilungsmodells der Nachfrage

B1 Kenngrößen bei Aufteilungsmodell nach Logit

Variationen des Parameters β : (0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4)

		min	1.Quartil	Median	Mittelwert	3.Quartil	max
mittlere Beförderungszeit	[s]	1.061	1.065	1.070	1.074	1.080	1.097
mittlere Fahrzeit im Fz	[s]	858	861	861	861	862	862
mittlere Wartezeit	[s]	82	83	84	84	86	87
mittlere Übergangsgezeit	[s]	117	120	124	129	134	152
Umsteigehäufigkeit	[-]	23.365	24.095	24.537	24.362	24.770	24.901
Linienbeförderungen	[-]	70.165	70.895	71.337	71.162	71.570	71.701
Direktfahrten	[-]	23.395	23.509	23.703	23.848	24.067	24.683
Fahrten mit 1 Umstieg	[-]	20.869	21.372	21.657	21.543	21.812	21.910
Fahrten mit 2 Umstiegen	[-]	1.248	1.362	1.440	1.409	1.479	1.496

B2 Kenngrößen bei Aufteilungsmodell nach Lohse

Variationen des Parameters β : (1; 2; 3; 4; 5; 6; 7)

		min	1.Quartil	Median	Mittelwert	3.Quartil	max
mittlere Beförderungszeit	[s]	1.061	1.066	1.073	1.079	1.087	1.114
mittlere Fahrzeit im Fz	[s]	853	859	861	859	861	861
mittlere Wartezeit	[s]	83	85	86	86	88	89
mittlere Übergangsgezeit	[s]	116	120	127	134	142	172
Umsteigehäufigkeit	[-]	22.571	23.758	24.441	24.146	24.775	24.944
Linienbeförderungen	[-]	69.371	70.558	71.241	70.946	71.575	71.744
Direktfahrten	[-]	23.345	23.417	23.617	23.927	24.194	25.307
Fahrten mit 1 Umstieg	[-]	20.416	21.455	21.926	21.600	21.978	21.992
Fahrten mit 2 Umstiegen	[-]	1.077	1.152	1.258	1.273	1.392	1.489

B3 Kenngrößen bei Aufteilungsmodell nach KirchhoffVariationen des Parameters β : (1; 2; 3; 4; 5; 6; 7)

	min	1.Quartil	Median	Mittelwert	3.Quartil	max
mittlere Beförderungszeit [s]	1.072	1.079	1.089	1.097	1.109	1.139
mittlere Fahrzeit im Fz [s]	853	856	857	857	859	860
mittlere Wartezeit [s]	84	85	86	86	87	87
mittlere Übergangsgezeit [s]	128	135	146	154	167	199
Umsteigehäufigkeit [-]	21.659	22.764	23.552	23.301	24.019	24.335
Linienbeförderungen [-]	68.459	69.564	70.352	70.101	70.819	71.135
Direktfahrten [-]	23.745	24.014	24.431	24.678	25.165	26.213
Fahrten mit 1 Umstieg [-]	19.515	20.507	21.187	20.942	21.553	21.775
Fahrten mit 2 Umstiegen [-]	1.072	1.129	1.182	1.180	1.233	1.280

B4 Kenngrößen bei Aufteilungsmodell nach BoxCoxVariationen des Parameters β : (0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75)Variationen des Parameters τ : (0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7)

	min	1.Quartil	Median	Mittelwert	3.Quartil	max
mittlere Beförderungszeit [s]	1.056	1.068	1.082	1.087	1.102	1.145
mittlere Fahrzeit im Fz [s]	853	857	859	858	861	861
mittlere Wartezeit [s]	81	84	85	85	87	88
mittlere Übergangsgezeit [s]	113	123	137	143	159	204
Umsteigehäufigkeit [-]	21.480	23.113	23.921	23.753	24.581	24.991
Linienbeförderungen [-]	68.280	69.913	70.721	70.553	71.381	71.791
Direktfahrten [-]	23.282	23.622	24.142	24.331	24.876	26.387
Fahrten mit 1 Umstieg [-]	19.346	20.735	21.401	21.185	21.777	22.046
Fahrten mit 2 Umstiegen [-]	1.067	1.180	1.263	1.284	1.403	1.480

C Fahrplan und Kenngrößenvergleich Modellbeispiel

C1 Taktintervall Linie grün: 7,5 Minuten mit variablen Wendezeiten

Ausgangslösung	Line	Takt	Fahrzeit	Wendezeit	1. Abfahrt Hin+Rück	Potentielle Wartezeit	Wendezeit			1. Abfahrt Hin	1. Abfahrt Rück	Potentielle Wartezeit
							min	Start	Ende			
							Optimierung					
schwarz	30	24	6	06:04	40.002	2	3	9	06:15	06:18	18.982	
rot	10	16	4	05:55	53.145	1	6	2	05:57	05:55	32.779	
grau	10	16	4	05:50		1	6	2	05:52	05:50		
blau	10	17	3	05:50	28.292	1	2	4	05:50	05:51	14.312,5	
grün	7,5	26	4	05:41	fix	4	4	4	05:41	05:41	fix	

	Ausgangsl.	Opt.	Differenz
Beförderungszeit [h]	14.147	13.263	-6%
Fahrzeit im Fz[h]	11.509	11.252	-2%
Wartezeit gesamt [h]	1.240	706	-43%
Gehzeit gesamt [h]	1.397	1.305	-7%
Umsteigehäufigkeit [-]	25.704	27.102	5%
Linienbeförderungen	72.504	73.902	2%
Direktfahrten	22.418	22.043	-2%
Fahrten mit 1 Umstieg	23.059	22.412	-3%
Fahrten mit 2 Umstiegen	1.322	2.345	77%

C2 Taktintervall Linie grün: 7,5 Minuten mit fixen Wendezeiten

Ausgangslösung	Line	Takt	Fahrzeit	Wendezeit	1. Abfahrt Hin+Rück	Potentielle Wartezeit	Wendezeit			1. Abfahrt Hin	1. Abfahrt Rück	Potentielle Wartezeit
							min	Start	Ende			
							Optimierung					
schwarz	30	24	6	06:04	40.002	-	6	6	06:15	06:15	23.551	
rot	10	16	4	05:55	53.145	-	4	4	05:55	05:55	47.508	
grau	10	16	4	05:50		-	4	4	05:50	05:50		
blau	10	17	3	05:50	28.292	-	3	3	05:50	05:50	22.092,0	
grün	7,5	26	4	05:41	fix	-	4	4	05:41	05:41	fix	

	Ausgangsl.	Opt.	Differenz
Beförderungszeit [h]	14.147	13.689	-3,2%
Fahrzeit im Fz[h]	11.509	11.364	-1,3%
Wartezeit gesamt [h]	1.240	961	-22,5%
Gehzeit gesamt [h]	1.397	1.363	-2,5%
Umsteigehäufigkeit [-]	25.704	26.515	3,2%
Linienbeförderungen	72.504	73.315	1,1%
Direktfahrten	22.418	22.329	-0,4%
Fahrten mit 1 Umstieg	23.059	22.428	-2,7%
Fahrten mit 2 Umstiegen	1.322	2.043	54,6%

C3 Taktintervall Linie grün: 10 Minuten mit variablen Wendezeiten

Ausgangslösung	Line	Takt	Fahrzeit	Wendezeit	1. Abfahrt Hin+Rück	Potentielle Wartezeit	Wendezeit			1. Abfahrt Hin	1. Abfahrt Rück	Potentielle Wartezeit
							min	Start	Ende			
Optimierung	schwarz	30	24	6	06:04	40.198	2	2	10	06:04	06:00	28.353
	rot	10	16	4	05:55	66.284	1	6	2	05:57	05:55	50.375
	grau	10	16	4	05:50		1	6	2	05:52	05:50	
	blau	10	17	3	05:50	39.510	1	3	3	05:50	05:50	32.005
	grün	10	26	4	05:41	fix	4	4	4	05:41	05:41	fix

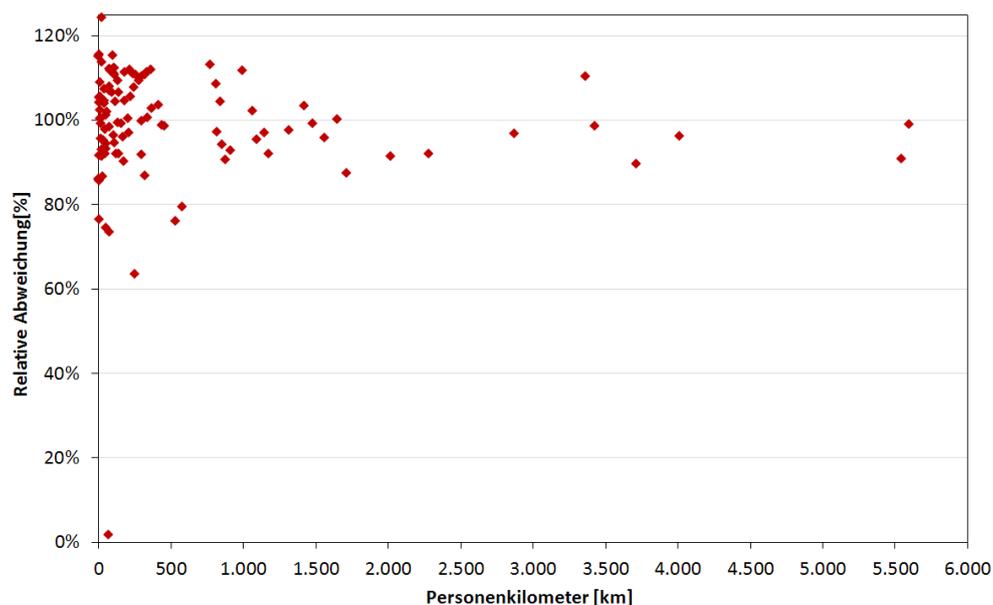
	Ausgangsl.	Opt.	Differenz
Beförderungszeit [h]	14.428	14.031	-3%
Fahrzeit im Fz[h]	11.544	11.498	0%
Wartezeit gesamt [h]	1.565	1.252	-20%
Gehzeit gesamt [h]	1.319	1.282	-3%
Umsteigehäufigkeit [-]	25.221	25.324	0%
Linienbeförderungen	72.021	72.124	0%
Direktfahrten	22.379	22.321	0%
Fahrten mit 1 Umstieg	23.622	23.634	0%
Fahrten mit 2 Umstiegen	800	845	6%

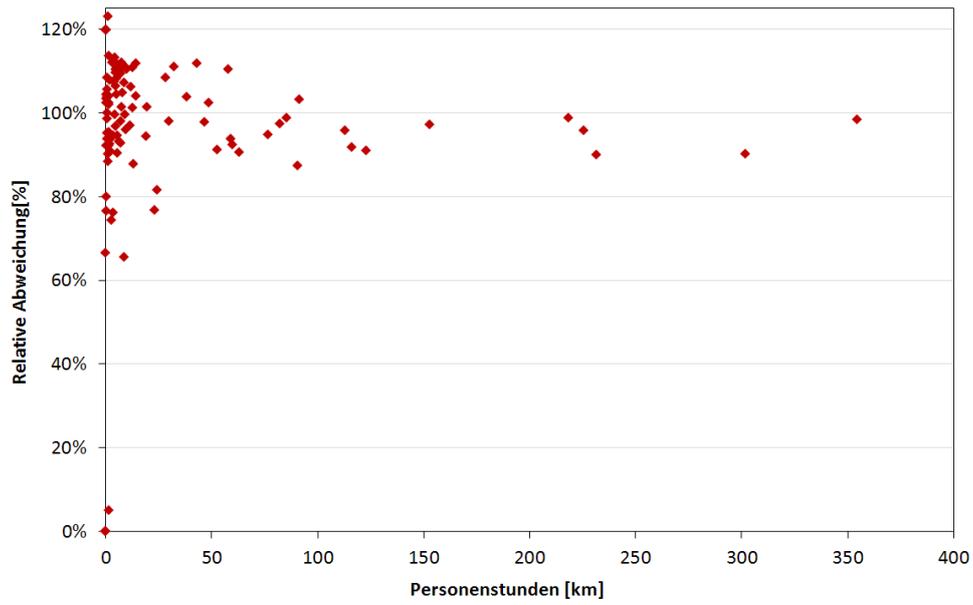
D Modelltechnische Anpassungen

D1 Kennzahlenvergleich der Nachfragedaten mit 0, 1 und 2 Kommastellen

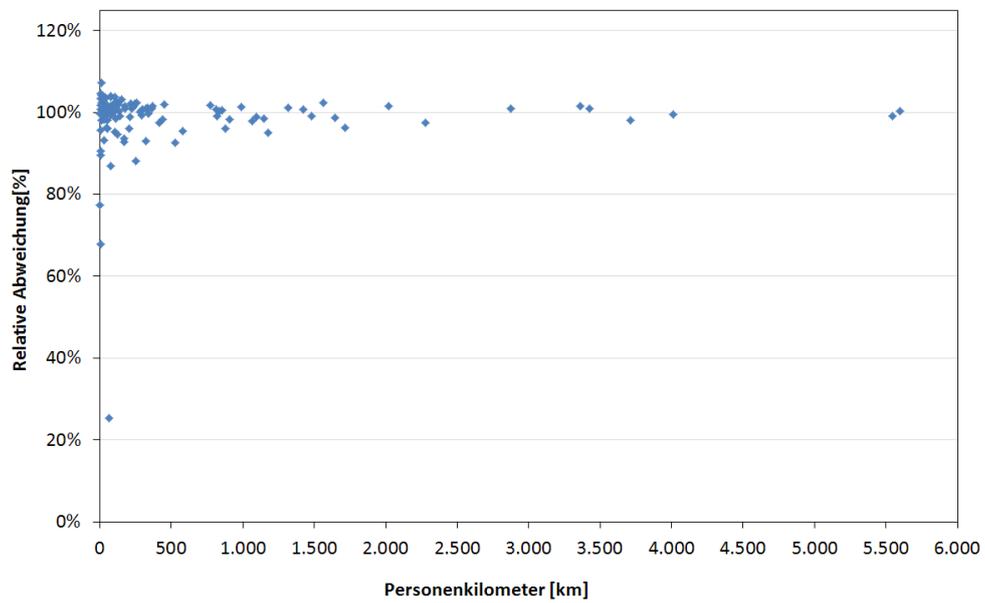
Kenngröße	Einheit	Anz Kommastellen 0	Anz Kommastellen 1	Anz Kommastellen 2
Summe Matrix	-	22.745	23.012	22.841
Dauer Umlegungsrechnung	s	57	86	128
Anzahl ÖV_Beziehungen	-	13.899	39.792	94.014
Anzahl ÖV_Wege	-	148.402	412.232	789.847
Anzahl Umsteigeverbindungen	-	10.334	12.350	13.319
Summe Personenkilometer	km	62.776	64.104	64.453
Summe Personenstunden	h	3.117	3.223	3.237
Mittlere Reisezeit	min	23,8	24,2	24,6
Mittlere Beförderungszeit	min	15,5	15,9	16,2
Mittlere Fahrzeit im Fahrzeug	min	13,2	13,5	13,8
Mittlere Umsteigewartezeit	s	84	85	86
Mittlere Übergangszeit	s	125	123	122
Mittlere Beförderungsweite	km	4,487	4,559	4,642
Gesamte Umsteigehäufigkeit	-	14.171	14.962	15.151
Linienbeförderungen	-	35.426	36.610	36.642
Personenfahrten gesamt	-	22.737	23.006	22.835
Personenfahrten 0 Umstiege	-	9.386	9.133	8.882
Personenfahrten 1 Umstieg	-	9.677	10.186	10.193
Personenfahrten 2 Umstiege	-	2.085	2.212	2.291
Personenfahrten >2 Umstiege	-	108	116	124
Personenfahrten mit Beförderung	-	21.255	21.648	21.490
Personenfahrten ohne Beförderung	-	274	261	261
Personenfahrten ohne Verbindung	-	1.208	1.097	1.083

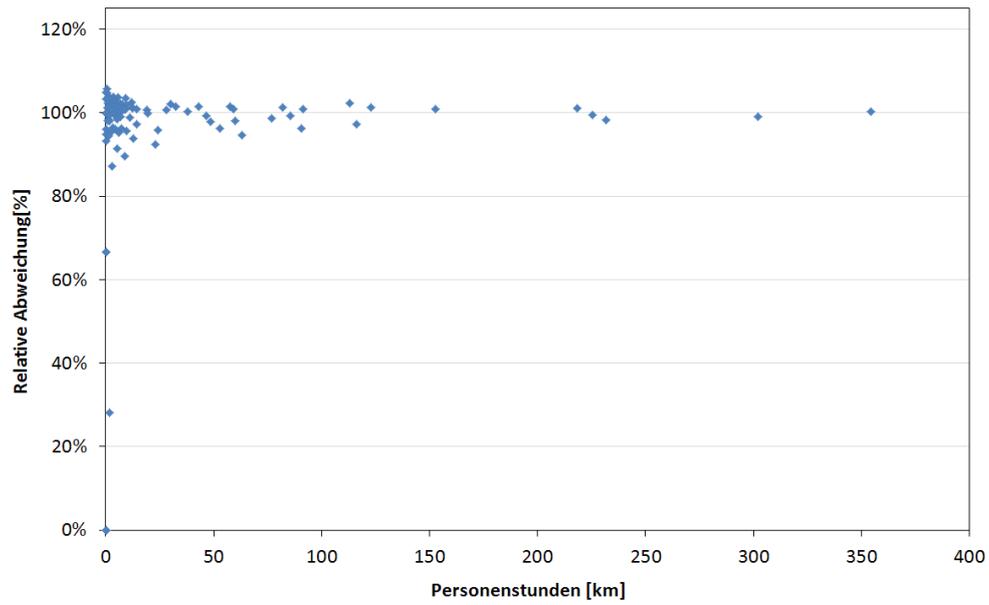
D2 Relative Abweichungen Personenkilometer und Personenstunden von Linien der Nachfragedaten mit null Kommastellen gegenüber Nachfragedaten mit zwei Kommastellen





D3 Relative Abweichungen Personenkilometer und Personenstunden von Linien der Nachfragedaten mit einer Kommastellen gegenüber Nachfragedaten mit zwei Kommastellen





E Fahrplanoptimierung Graz Zeitfenster 12:00 bis 14:00

E1 Eingangsdaten

LINIENBÜNDEL				ZEITLICHE VERSCHIEBUNG			VARIABLE LINIEN MIT WENDEZEITEN				
Linie	VSys	Linienbündel	Takt	Linie	VSys	zeitlich fixiert	Linie	VSys	Wendezeit Start+ Ende	zwischen Hin + Rück	Mindestwendezeit
04681_	B		02:00	04681_	B	fix	09035_	B	6	00:03	2
09035_	B		00:30	09035_	B		09047_	B	5	00:16	2
09047_	B		01:00	09047_	B		09061_	B	4	00:01	2
09061_	B		00:30	09061_	B		09069_	B	7	00:04	0
09068_	B	LC07	01:00	09069_	B		09071_	B	12	00:07	2
09068a	B	LC07	01:00	09071_	B		09080_	B	3	00:11	1,5
09069_	B		00:15	09080_	B		09110_	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
09071_	B		00:30	09110_	B		09131_	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
09080_	B		00:30	09111_	B	fix	09431_	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
09110_	B		01:00	09120_	B	fix	09440_	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
09111_	B		01:00	09121_	B	fix	09521_	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
09120_	B		02:00	09131_	B		19510_	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
09121_	B		02:00	09431_	B		34081_	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
09131_	B		01:00	09440_	B		34083_	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
09430_	B	LC08	01:00	09448_	B	fix	38001_	T	8	00:04	1
09430a	B	LC08	01:00	09450_	B	fix	38007_	T	8	00:03	1
09431_	B		01:00	09521_	B		38032_	B	9	00:03	1
09440_	B		01:00	09671_	B	fix	38040_	B	9	00:01	1
09448_	B		01:00	09711_	B	fix	38048_	B	10	00:03	1
09450_	B		01:00	10691_	B	fix	38050_	B	9	00:05	1
09521_	B		01:00	19510_	B		38052_	B	12	00:08	1
09671_	B		01:00	23160_	B	fix	38053_	B	16	00:12	1
09711_	B		02:00	27541_	B	fix	38058_	B	12	00:06	1
10691_	B		02:00	27610_	B	fix	38060_	B	7	00:01	1
19510_	B		01:00	27620_	B	fix	38062_	B	10	00:05	1
21301_	B	LC12	01:00	34042_	B	fix	38063_	B	7	00:04	1
21301a	B	LC12	01:00	34043_	B	fix	38064_	B	10	00:07	1
23160_	B		02:00	34081_	B		38077_	B	8	00:06	1
27541_	B		02:00	34083_	B		38082_	B	8	00:02	1
27610_	B		02:00	36511a	E	fix	38085_	B	8	00:03	1
27620_	B		01:00	36531a	E	fix	39600h	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
34042_	B		02:00	37506_	E	fix	39630h	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
34043_	B		02:00	37507_	E	fix	40041_	B	9	00:07	2
34081_	B		00:30	37561_	E	fix	40220h	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
34083_	B		01:00	38001_	T		40250_	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
36511a	E		00:30	38007_	T		40420h	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
36531a	E		00:30	38032_	B		40421_	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
37506_	E		00:30	38040_	B		86710_	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
37507_	E		01:00	38048_	B		98072_	B	18	00:09	2
37561_	E		00:30	38050_	B		98075u	B	24	00:02	2
38001_	T		00:10	38052_	B		98076u	B	17	00:05	2
38003_	T	LC01	00:08	38053_	B		LC01	T	6	00:04	1
38004_	T	LC02	00:10	38058_	B		LC02	T	12	00:04	1
38005_	T	LC02	00:10	38060_	B		LC03	B	7	00:02	1
38006_	T	LC01	00:08	38062_	B		LC04	B	8	00:03	1
38007_	T		00:06	38063_	B		LC05	B	6	00:05	1
38030_	B	LC03	00:12	38064_	B		LC06	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
38030e	B	LC03	00:12	38077_	B		LC07	B	3	00:01	0
38031_	B	LC04	00:10	38082_	B		LC08	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
38032_	B		00:10	38085_	B		LC09	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
38033_	B	LC04	00:10	38E00_	B	fix	LC10	B	10	00:00	0
38034_	B	LC05	00:15	38SBB_	B	fix	LC11	B	21	00:09	2
38034e	B	LC05	00:15	38SBL_	B	fix	LC12	B	fixe Wz	fixe Wz	fixe Wz
38039_	B	LC06	00:10	39150h	B	fix					
38040_	B		00:10	39400h	B	fix					
38048_	B		00:40	39600h	B						
38050_	B		00:15	39630h	B						
38052_	B		00:15	39631h	B	fix					
38053_	B		00:15	39831h	B	fix					

38058_	B		00:15	39E57_	B	fix
38060_	B		00:15	40041_	B	
38062_	B		00:15	40100_	B	fix
38063_	B		00:10	40140_	B	fix
38064_	B		00:15	40200h	B	fix
38067_	B	LC06	00:10	40201h	B	fix
38077_	B		00:12	40211_	B	fix
38082_	B		00:15	40220h	B	
38085_	B		00:10	40221h	B	fix
38E00_	B		00:30	40241_	B	fix
38SBB_	B		00:15	40250_	B	
38SBL_	B		00:04	40270_	B	fix
39150h	B		01:00	40300h	B	fix
39400h	B		02:00	40310h	B	fix
39600h	B		01:00	40360_	B	fix
39630h	B		01:00	40362_	B	fix
39631h	B		02:00	40420h	B	
39831h	B		02:00	40421_	B	
39E57_	B		02:00	40500_	B	fix
40041_	B		00:15	40570_	B	fix
40100_	B		02:00	40650_	B	fix
40140_	B		01:00	80045_	B	fix
40200h	B		01:00	8125l_	E	fix
40201h	B		02:00	8151l_	E	fix
40211_	B		01:00	81S01_	E	fix
40220h	B		01:00	81S03_	E	fix
40221h	B		01:00	81S05_	E	fix
40241_	B		00:30	86700_	B	fix
40250_	B		01:00	86710_	B	
40270_	B		02:00	86712_	B	fix
40300h	B		02:00	86760_	B	fix
40310h	B		02:00	91KRO_	B	fix
40360_	B		02:00	91LKH_	B	fix
40362_	B		02:00	98072_	B	
40420h	B		01:00	98075u	B	
40421_	B		01:00	98076u	B	
40470_	B	LC09	00:30	LC01	T	
40470s	B	LC09	02:00	LC02	T	
40500_	B		01:00	LC03	B	
40570_	B		02:00	LC04	B	
40650_	B		02:00	LC05	B	
80045_	B		02:00	LC06	B	
8125l_	E		02:00	LC07	B	
8151l_	E		01:00	LC08	B	
81S01_	E		00:30	LC09	B	
81S03_	E		00:30	LC10	B	
81S05_	E		00:30	LC11	B	
86700_	B		01:00	LC12	B	
86710_	B		01:00			
86712_	B		02:00			
86760_	B		01:00			
91KRO_	B		02:00			
91LKH_	B		00:20			
98072_	B		00:30			
98074_	B	LC10	00:20			
98074e	B	LC10	00:30			
98075u	B		00:30			
98076u	B		00:30			
98078_	B	LC11	00:30			
98078e	B	LC11	00:30			

E2 Ergebnisdaten: richtungsbezogene Linien mit Verschiebung

Linie	Von Haltestelle	Richtung Haltestelle	Versatz
09047_	Stattegg Buch	Graz Andritz	- 00:13:00
09068_	Graz Schulzentrum St. Peter	Graz Lustbühel	- 00:01:00
09068a	Graz Schulzentrum St. Peter	Graz Lustbühel	- 00:01:00
09069_	Graz Petri Au	Graz St. Peter	00:13:00
09069_	Graz St. Peter	Graz Petri Au	00:13:00
09071_	Graz Schulzentrum St. Peter	Graz Ostbahnhof	00:29:00
09071_	Graz Ostbahnhof	Graz Schulzentrum St. Peter	00:31:00
09080_	Graz Puntigam Bahnhof	Feldkirchen/Graz Raiffeisenpl	00:13:00
09080_	Feldkirchen/Graz Raiffeisenpl	Graz Puntigam Bahnhof	00:03:00
09110_	Graz Lendplatz	Rein Gemeinde	00:18:00
09110_	Rein Gemeinde	Graz Lendplatz	00:18:00
09131_	Graz Lendplatz	Deutscheistriz Gemeindeamt	00:53:00
09131_	Gratwein Schule	Judendorf Gh Gruber	00:53:00
09430_	Graz Jakominiplatz	Laßnitzhöhe Am Quellenhof	00:01:00
09430_	Laßnitzhöhe Am Quellenhof	Graz Jakominiplatz	- 00:17:00
09430a	Graz Lustbühel	Pachern/Graz Schule	00:01:00
09430a	Pachern/Graz Schule	Graz Lustbühel	- 00:17:00
09431_	Graz Jakominiplatz	Nestelbach bei Graz Parkplatz	00:57:00
09431_	Nestelbach bei Graz Parkplatz	Graz Jakominiplatz	00:57:00
09521_	Graz Jakominiplatz	Siebing bei Wildon Gh Fruhmann	00:48:00
09521_	Siebing bei Wildon Gh Fruhmann	Graz Jakominiplatz	00:48:00
21301_	Graz Hauptbahnhof	Pinggau Hauptplatz	00:02:00
21301_	Hartberg Busbahnhof	Graz Hauptbahnhof	00:02:00
21301a	Rohrbach/Lafnitz P+R	Graz Magna Tor 1	00:02:00
34083_	Graz Mariagrün	Graz Volksschule Mariagrün	00:56:00
34083_	Graz Volksschule Mariagrün	Graz Mariagrün	00:52:00
38003_	Graz Laudongasse	Graz Krenngasse	00:06:00
38003_	Graz Krenngasse	Graz Laudongasse	00:03:00
38006_	Graz Laudongasse	Graz St. Peter	00:06:00
38006_	Graz St. Peter	Graz Laudongasse	00:03:00
38048_	Graz Gösting	Thal bei Graz Kötschberg	00:06:00
38048_	Thal bei Graz Kötschberg	Graz Gösting	00:05:00
38052_	Graz Hauptbahnhof	Graz Ziegelstraße	00:14:00
38052_	Graz Ziegelstraße	Graz Hauptbahnhof	00:15:00
38058_	Graz Hauptbahnhof	Graz Mariagrün	00:10:00
38058_	Graz Mariagrün	Graz Hauptbahnhof	00:15:00
38060_	Graz Krenngasse	Graz Lustbühel	00:12:00
38060_	Graz Lustbühel	Graz Krenngasse	00:17:00
38062_	Graz Puntigam Bahnhof	Graz Carnerigasse	00:14:00
38062_	Graz Carnerigasse	Graz Puntigam Bahnhof	00:15:00
38063_	Graz Hauptbahnhof	Graz Petersbergenstraße	00:09:00
38063_	Graz Petersbergenstraße	Graz Hauptbahnhof	00:10:00
38064_	Graz Schulzentrum St. Peter	Graz Wetzelsdorf	00:13:00
38064_	Graz Wetzelsdorf	Graz Schulzentrum St. Peter	00:15:00
38077_	Graz St. Leonhard/LKH	Graz Ragnitz	00:11:00
38077_	Graz Ragnitz	Graz St. Leonhard/LKH	00:07:00
38082_	Graz St. Leonhard/LKH	Stifting	00:12:00
38082_	Stifting	Graz St. Leonhard/LKH	00:16:00
40421_	Graz Dietrichsteinplatz	Hönigtal Gh Großschädl	00:04:00
40421_	Hönigtal Gh Großschädl	Graz Lustbühel	00:04:00
98075u	Pachern/Graz P+R	Graz Liebenau Murpark	00:31:00
98078_	Graz Puntigam Bahnhof	Gedersberg Kirchweg	- 00:18:00
40250_	Graz Jakominiplatz	St Radegund Seilbahntalstation	00:30:00
40250_	Plenzengreith Gh Windisch	Graz Andreas-Hofer-Platz	00:30:00
98072_	Graz Liebenau Murpark	Graz Schulzentrum St. Peter	- 00:02:00
98075u	Graz Liebenau Murpark	Pachern/Graz P+R	00:29:00
98076u	Hausmannstätten Hauptschule	Graz Schulzentrum St. Peter	- 00:03:00
98078e	Graz Puntigam Bahnhof	Seiersberg GVB-Endstation	- 00:18:00

