Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel

Karl-Scharfenberg-Fakultät Salzgitter

Diplomarbeit

Verkehrsumlegungsmodelle im ÖPNV: Analyse der Wirkung von Verfahrenswahl und Parametrierung auf die Qualität der Ergebnisse

Karlsruhe, 20. Dezember 2007

vorgelegt von:
Kevin Löhr
Matr.-Nr.: 40388410
Marktplatz 3A
55130 Mainz

eingereicht bei:
Prof. Dr.-Ing. Reinhard Forst-Lürken,
FH Braunschweig/Wolfenbüttel
Steven Pfisterer,
PTV AG, Karlsruhe

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis ..... **V**

Abbildungsverzeichnis ..... **VI**

Tabellenverzeichnis ..... **VII**

Zusammenfassung ..... **VIII**

Abstract ..... **X**

1 Einleitung **1**

2 Vorstellung des Unternehmens PTV AG **6**

3 Ziel und Vorgehensweise einer Umlegung **8**

3.1 Die verkehrssystemfeine Umlegung 9

3.2 Die taktfeine Umlegung 11

3.2.1 Taktberechnung 11

3.2.2 Routensuche und -belastung 13

3.2.3 Modellierung von vertakteten Linien und Anschlüssen 14

3.2.4 Bewertung und Einsatz des Verfahrens 15

3.3 Die fahrplanfeine Umlegung 16

3.3.1 Verbindungssuche 17

3.3.1.1 Optimalroutensuchverfahren 17

3.3.1.2 Alternativroutensuchverfahren 19

3.3.2 Vorauswahl der Verbindungen 19

3.3.3 Berechnung des Verbindungswiderstandes 20

3.3.4 Belastung der Verbindungen 24

3.3.5 Eigenständigkeit der Verbindungen 25

3.3.6 Bewertung und Einsatz des Verfahrens 27

4 Aufteilungsmodelle für die fahrplanfeine Umlegung **29**

4.1 Kirchhoff 29

4.2 Logit 31

4.3 Box-Cox 34

4.4 Lohse 36

4.5 Vergleich der Aufteilungsmodelle 38

5 Wirkungsanalyse in Referenznetzen 41

5.1 Vorgehen 41

5.2 Beschreibung der Referenznetze 42

5.2.1 Stadt Oberhausen 43

5.2.2 Region Rhein-Neckar 44

5.3 Vergleichskonzept 44

5.3.1 Untersuchungsgrößen 45

5.3.2 Teilnetz- und Relationsbetrachtung 46

5.3.3 Bewertung und Gewichtung 47

5.3.4 Sensitivitätsanalyse 48

5.4 Untersuchungsparameter der fahrplanfeinen Umlegung 49

5.4.1 Suche und Vorauswahl 49

5.4.2 Widerstand 50

5.4.3 Aufteilungsmodell 51

5.4.4 Untersuchungsbasis 52

5.5 Analyse der fahrplanfeinen Umlegung 53

5.5.1 Vorbereitung 53

5.5.2 Auswertung 54

5.6 Untersuchung der taktfeinen Umlegung 60

5.6.1 Suche 61

5.6.2 Widerstand 61

5.6.3 Untersuchungsbasis 61

5.7 Analyse und Auswertung der taktfeinen Umlegung 62

6 Empfehlung eines Vorgehens für vergleichbare Umlegungen 65

7 Fazit und Ausblick 68

Literaturverzeichnis 70

Anhang A: Tabelle Vergleich der Aufteilungsmodelle 72

Anhang B: Tabellen zur Sensitivitätsanalyse 73

Anhang C: Abbildungen Struktur der Referenznetze 74

Anhang D: Ergebnistabellen 76

Anhang E: Netzbelastungsgrafiken 78

Anhang F: Korrelartionsdiagramme 80

Anhang G: Verwendete Software 82

Eidesstattliche Erklärung 83

Abkürzungsverzeichnis

GB	Gigabyte (= 2^{30} Byte ≈ 1,074 · 10^9 Byte)
GHz	Gigahertz (= 10^9 Hertz)
GIS	Geografisches Informationssystem
IV	Individualverkehr
MIV	Motorisierter Individualverkehr
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
Pkw	Personenkraftwagen
PTV	PTV Planung Transport Verkehr AG
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
Strab	Straßenbahn
VISUM	Verkehr in Städten Umlegungsmodell, Software der PTV
VRN	Verkehrsverbund Rhein-Neckar GmbH
VRR	Verkehrsverbund Rhein-Ruhr GmbH

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klassischer Prozess der Verkehrsplanung 3

Abbildung 2: Funktionen der Startwartezeit 22

Abbildung 3: Verkehrsaufteilung auf zwei Verbindungen mit der Kirchhoff-Funktion in Abhängigkeit des Quotienten ihrer Widerstände 30

Abbildung 4: Verkehrsaufteilung auf zwei Verbindungen mit der Logit-Funktion in Abhängigkeit der Differenz ihrer Widerstände 32

Abbildung 5: Verkehrsaufteilung auf zwei Verbindungen mit der Logit-Funktion in Abhängigkeit des Quotienten ihrer Widerstände für $WID_1 = 30$ 33

Abbildung 6: Verkehrsaufteilung auf zwei Verbindungen mit der Logit-Funktion in Abhängigkeit des Quotienten ihrer Widerstände für $WID_1 = 15$ 33

Abbildung 7: Verkehrsaufteilung auf zwei Verbindungen mit dem Box-Cox-Modell in Abhängigkeit des Quotienten ihrer Widerstände für $WID_1 = 30$ und $\beta = 1$ 35

Abbildung 8: Verkehrsaufteilung auf zwei Verbindungen mit dem Box-Cox-Modell in Abhängigkeit des Quotienten ihrer Widerstände für $WID_1 = 60$ und $\beta = 1$ 36

Abbildung 9: Verkehrsaufteilung auf zwei Verbindungen mit dem Lohse-Modell in Abhängigkeit des Quotienten ihrer Widerstände für $WID_1 = WID_{min} = 30$ 38

Abbildung 10: Gebiet des Verkehrsverbundes Rhein-Neckar 74

Abbildung 11: Gebiet der Stadt Oberhausen mit dargestelltem ÖPNV-Netz 75

Abbildung 12: Korrelationsdiagramm aus VISUM-Umlegungsanalyse, Netz Oberhausen, fahrplanfeine Umlegung Variante 12 80

Abbildung 13: Korrelationsdiagramm aus VISUM-Umlegungsanalyse, Netz Oberhausen, taktfeine Umlegung mit Zeitscheiben 81

Abbildung 14: Korrelationsdiagramm aus VISUM-Umlegungsanalyse, Netz Oberhausen, taktfeine Umlegung ohne Zeitscheiben 81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Empfohlene Parametrierung für fahrplanfeine Umlegungen	IX
Tabelle 2:	Recommended values for the timetable-based assignment	XI
Tabelle 3:	Aufteilungsmodelle Beispiel I	39
Tabelle 4:	Aufteilungsmodelle Beispiel II	39
Tabelle 5:	Aufteilungsmodelle Beispiel III	39
Tabelle 6:	Aufteilungsmodelle Beispiel IV	40
Tabelle 7:	Aufteilungsmodelle Beispiel V	40
Tabelle 8:	Basisgrößen des Bewertungssystems	48
Tabelle 9:	Varianten der Untersuchungsparameter der Suchverfahren	49
Tabelle 10:	Varianten der Untersuchungsparameter des Verkehrssystemspezifischen Widerstands	50
Tabelle 11:	Übersicht der Analysereihenfolge und Ausgangswerte der zu untersuchenden Parameter	54
Tabelle 12:	Parametrierung der Widerstände für die taktfeine Umlegung	61
Tabelle 13:	Empfohlene Parametrierung für fahrplanfeine Umlegungen	66
Tabelle 14:	Empfohlene Parametrierung der Aufteilungsmodelle	67
Tabelle 15:	Parametrierung der Aufteilungsmodelle zur Erstellung der Vergleichstabellen	72
Tabelle 16:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse, Bewertungspunkte gemäß Bewertungssystem	73
Tabelle 17:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse, Rangfolge der Varianten	73

Zusammenfassung

Diese Diplomarbeit befasst sich mit der Problematik der Verfahrensauswahl und Parametrierung von Verkehrsumlegungsmodellen in Verkehrsnetzen des öffentlichen Personennahverkehrs. Bei der Durchführung einer Verkehrsumlegung, beispielsweise innerhalb des klassischen Vier-Stufen-Modells der Verkehrsplanung, muss für diesen Schritt ein geeignetes Verfahren gewählt werden. Innerhalb des Verfahrens ist eine sinnvolle Parametrierung des gewählten Verfahrens Grundlage für ein hochwertiges Ergebnis.

Ziel ist es, für die Anwendung der Verkehrsumlegung in Planungsprojekten des ÖPNV eine Empfehlung für den Einsatz eines geeigneten Verfahrens und dessen Parametrierung zu geben.

Hierzu werden nach einer Betrachtung der theoretischen Grundlagen ein Referenznetz einer kreisfreien Großstadt mit 220.000 Einwohnern (Oberhausen) und einer vermischt städtisch und ländlich geprägten Metropolregion mit 3 Mio. Einwohnern und einer Größe von 10.000 Quadratkilometern (Rhein-Neckar) untersucht. Es werden unter systematischer Änderung des Routensuchalgorithmus, des Aufteilungsmodells und weiterer Parameter für beide Referenznetze verschiedene Umlegungen berechnet und mit Hilfe eines zuvor festgelegten Bewertungsverfahrens miteinander und mit Erhebungsdaten verglichen. Die Berechnungen werden mit der Verkehrsplanungssoftware VISUM der PTV AG durchgeführt und analysiert. Auf Grund des schematisch wissenschaftlichen Aufbaus der Software entsprechend der üblichen Modellierungsschritte sind die Ergebnisse auch auf andere Software übertragbar.

Bei allen Ergebnissen ist zwischen städtisch geprägten Gebieten und vermischt städtischen und ländlichen Gebieten zu differenzieren. Für städtische Netze ist das Logit-Aufteilungsmodell und für vermischt städtische und ländliche Netze das Lohse-Modell zu empfehlen. Außerdem ist das Alternativroutensuchverfahren „Branch&Bound-Suche“ dem Optimalroutensuchverfahren „Kurzwegsuche“ vorzuziehen, es liefert bessere Ergebnisse und arbeitet erheblich schneller. Mit den folgenden Parametrierungen wurden die besten Ergebnisse erzielt:

VISUM-Menü / Parameter	**städtische Struktur**	**vermischte Struktur**
Suche: Suchverfahren	Branch&Bound	Branch&Bound
Suche / Vorauswahl: Faktor Verbindung verwerfen	2	2
Suche / Vorauswahl: Zuschlag Verbindung verwerfen	12min	12min
Suche / Vorauswahl: Zusätzliche Umstiege	3	3
Widerstand: Zeitzuschlag für Umstieg	8min	12min
Widerstand: Faktor Umsteigewartezeit	2	1

VISUM-Menü / Parameter	**städtische Struktur**	**vermischte Struktur**
Wahl: Aufteilungsmodell	Logit	Lohse
Wahl: Sensitivitätsparameter β	0,15	2
Wahl: Eigenständigkeit verwenden	Ja	Ja
Basis: Ganglinienintervalle feiner aufrastern	Ja, 20min	Ja, 20min

Tabelle 1: Empfohlene Parametrierung für fahrplanfeine Umlegungen

Die Ergebnisse dieser Arbeit können nur auf Gebiete mit einer ähnlichen Struktur wie die der Referenznetze übertragen werden. Allgemeine Aussagen sind auf Grund der geringen Anzahl der Referenznetze nicht mit hinreichender Sicherheit möglich.

Das Umlegungsverfahren, das Fahrpläne genau berücksichtigt (fahrplanfeines Verfahren) ist dem ungenaueren Umlegungsverfahren, welches nur Linienwege und Taktungen berücksichtigt (taktfeines Verfahren) vorzuziehen. Das fahrplanfeine Verfahren sollte immer angewendet werden, wenn Fahrplandaten für ein Netz verfügbar sind. Das taktfeine Verfahren erreicht bei den Untersuchungsrechnungen 15% Abweichung bei der Streckenbelastung und ist nur für Abschätzungen geeignet, wenn etwa Planungsszenarien verglichen werden sollen und kein Fahrplan vorhanden ist. Das fahrplanfeine Verfahren erreicht 10% Abweichung und ermöglicht eine gute Abbildung des Verkehrsgeschehens im Modell.

Abstract

This diploma thesis deals with the problem of the choice for method and parameterisation of traffic assignment models in the public transport sector. The traffic assignment is the fourth part of the four-step modelling in the traffic planning process. It is necessary to choose a method which will guarantee a high quality result during the accomplishment of the fourth step. It is essential to use a reasonable parameterisation in content of this method.

The goal is to give a commendation of an appropriate method and parameterisation for applying in planning projects in the public transport sector.

At first this paper will take a view of the theoretical fundamentals of traffic assignment. Then two reference networks of a major city with about 220.000 habitants (the German city of Oberhausen) and a major region with urban and rural influences with 3 million habitants and a size of 10.000 square kilometres (the German metropolitan area of Rhein-Neckar) will be analysed.

For evaluating different methods of traffic assignment several calculations will be done by systematical change of search algorithm, choice model and other parameters for both of the reference networks. They will be compared with a special benchmarking method, which will be designed for this purpose. A comparison with survey data will be part of the benchmarking, too. The calculations and analysis of the results will be done with the traffic planning software VISUM from PTV AG, Germany. The systematical and scientifical structure of the used software ensures the transferability to other software.

By having a look on the results, it is necessary to differ between major urban and mixed rural and urban analysing areas. For major urban networks the Logit choice model provides the best results in this analysis. The Lohse choice model provides the best results for mixed rural and urban areas. For the search algorithms the alternative search algorithm “Branch&Bound” delivers the best results. It is better than the optimal search algorithm “Kurzwegsuche” and operates much faster. The following table shows the best values for the analysed parameters in the reference networks:

VISUM-Menu / Parameter	**Urban area**	**Mixed area**
Search: Search algorithm	Branch&Bound	Branch&Bound
Search / Preselection: Factor assembly disapproval	2	2
Search / Preselection: Addition assembly disapproval	12min	12min
Search / Preselection: Additional transfer	3	3
Impedance: Additional time for transfer	8min	12min
Impedance: Factor transfer-waiting-time	2	1
Choice: Choice model	Logit	Lohse

VISUM-Menu / Parameter	Urban area	Mixed area
Choice: Sensitivity-parameter β	0,15	2
Choice: Use Independence	Yes	Yes
Basis: Refine time series intervals	Yes, 20min	Yes, 20min

Tabelle 2: Recommended values for the timetable-based assignment

This results can be applied only on areas with similar structure. General recommendation can not be given without doubt in cause of the small number of analysed samples in this diploma thesis.

The timetable-based assignment model calculates much better results than the headway-based assignment model. So the timetable-based assignment model should always be chosen whenever timetable data is available. The headway-based assignment model achieved in the calculations an average deviation of 15% for the link volumes. It can be recommended only for a estimation. The timetable-based assignment model achieved an average deviation of 10% for the link volume allows a good description of the traffic situation in the model.

1 Einleitung

In der Verkehrsplanung hat die Modellierung des Verkehrsgeschehens in den vergangenen zwanzig Jahren insbesondere durch die stark zugenommene Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit von EDV-Systemen sehr an Bedeutung gewonnen. Sie spielt heute sowohl für das integrierte Gesamtverkehrssystem als auch für einzelne Teilbereiche, wie den öffentlichen Personennahverkehr, eine bedeutende Rolle bei der Gestaltung und Weiterentwicklung dieser Verkehrssysteme.

„Die Grundlage aller verkehrsplanerischen Arbeiten ist die Annahme, dass der Verkehrsablauf bestimmten Gesetzen unterliegt, das heißt, dass sich Richtung und Größe von Verkehrsströmen in Abhängigkeit von bestimmten messbaren Kriterien einstellen.“[1] Meist werden zur Beschreibung dieser Gesetzmäßigkeiten Planungsmodelle angewandt, die auf einer vierstufigen Aufteilung des Modellierungsprozesses in Teilmodelle beruhen. „Aufgrund historischer Entwicklungen, formal-methodischer Überlegungen sowie aus praktischen Erfordernissen werden innerhalb eines gesamten Verkehrsmodells üblicherweise die vier Teilmodelle Verkehrsaufkommen, Verkehrsverteilung, Verkehrsmittelwahl (Modal Spilt) und Verkehrswegewahl (Umlegung) unterschieden.“[2]

Ziel der Verkehrsmodellierung ist es, die Verkehrsnachfrage für einen gedanklich vorweggenommenen zukünftigen Zustand detailliert zu ermitteln. Für einzelne Querschnitte im Untersuchungsraum sollen Aussagen über die Anzahl der dort stattfindenden Ortsveränderungen getroffen werden, sowie die Frage nach Quelle, Route und Ziel der einzelnen Wege beantwortet werden. Dabei ist zu differenzieren, mit welchem Verkehrsmittel die Ortsveränderung jeweils erfolgt. Mit Hilfe dieser Datengrundlage ist es dann möglich, Aussagen zu Überlastungen von Strecken oder zu Reisezeiten zwischen wichtigen Verkehrszellen zu treffen.[3] Diese Aussagen wiederum bilden die Grundlage für Entscheidungen über Veränderungen der Verkehrsinfrastruktur und des ÖPNV-Angebotes in der Zukunft.

Analog zu den Begrifflichkeiten der allgemeinen Ökonomie kann die Verkehrsnachfrage als Bedarf nach einem Gut und das Verkehrsangebot als Angebot zur Befriedigung dieses Bedarfs gesehen werden.[4] Dabei ist Verkehr jedoch kein Selbstzweck. Aus einem Bedürfnis nach einer Aktivität entsteht ein Bedarf nach Aktivität und damit Nachfrage nach dieser. Der Verkehr resultiert aus der räumlichen Trennung der verschiedenen Aktivitätsbedürfnisse und ihrer Überwindung durch eine Ortsveränderung als

[1] Scholz, G. (1963), S. 3
[2] Schaechterle, K.; Braun, J. (1977), S. 1
[3] Vgl. Friedrich, M. (2003): Multimodal Transportation Planning, Kap. 8, S. 9
[4] Vgl. Schiller, C. (2004), S. 57

unbedingte Notwendigkeit zur ihrer Befriedigung. Die Summe aller Ortsveränderungen bildet die Verkehrsnachfrage.

Das Vier-Stufen-Modell versucht, den Prozess des Entstehens einer Aktivität bis zum daraus resultierenden Zurücklegen eines Weges abzubilden. Bei der Anwendung wird der Untersuchungsraum dabei in einzelne, hinreichend kleine Verkehrszellen gleicher oder zumindest ähnlicher Größe und Struktur aufgeteilt, und für diese Verkehrszellen bzw. für alle zwischen diesen Verkehrszellen entstehenden Verbindungen der folgende Prozess einzeln modelliert:

- Verkehrserzeugung (engl. Trip generation):
  In der ersten Stufe wird das Quell- und Zielverkehrsaufkommen jeder Verkehrszelle mit einem Verkehrserzeugungsmodell abgebildet. Die gängigen Modelle basieren auf der Abschätzung von Aktivitätenhäufigkeiten verschiedener verhaltenshomogener Personengruppen aus verfügbaren Strukturdaten und empirisch ermittelter Daten über das allgemeine Aktivitätenverhalten.

- Verkehrsverteilung (engl. Trip distribution):
  Im zweiten Schritt wird der Quellverkehr jeder einzelnen Verkehrszelle auf alle anderen Verkehrszellen verteilt. Genauso wird mit dem Zielverkehr verfahren. Zu nennen ist hier das Gravitationsmodell, welches zugrunde legt, dass die Attraktivität und damit die Größe des Verkehrsstromes einer Verkehrszelle im Bezug auf eine andere Verkehrszelle vom Aufwand der Raumüberwindung abhängt und die Attraktivität mit steigendem Aufwand zurück geht. Der Aufwand kann sich dabei beispielsweise aus Reisezeit, Reisekosten etc. zusammensetzen.

- Verkehrsmittelwahl (engl. Modal split):
  Die aus der zweiten Stufe resultierenden Quell-Ziel-Verkehrsströme zwischen den einzelnen Verkehrszellen werden auf alle in der jeweiligen Beziehung zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel (z.B. Pkw, ÖV, Rad, zu Fuß gehen) aufgeteilt. Als Ergebnis dieser dritten Stufe steht für jedes Verkehrsmittel eine Quell-Ziel-Matrix mit der Anzahl der Wege zwischen allen Verkehrszellen zur Verfügung.

- Verkehrsumlegung (engl. Trip assignment):
  Für jede Quell-Ziel-Beziehung stehen mit jedem Verkehrsmittel unterschiedliche Routen zur Raumüberwindung zur Verfügung. Das Umlegungsmodell ermittelt diese und teilt jeden Verkehrsstrom eines Verkehrsmittels auf die zur Verfügung stehenden Routen auf. Damit ergeben sich als Summe aller einzelnen belasteten Routen konkrete Belastungen von Strecken in einem Netz und die eingangs erwähnten Fragen nach Querschnittsbelastungen und genauen Routen einzelner Wege können beantwortet werden.

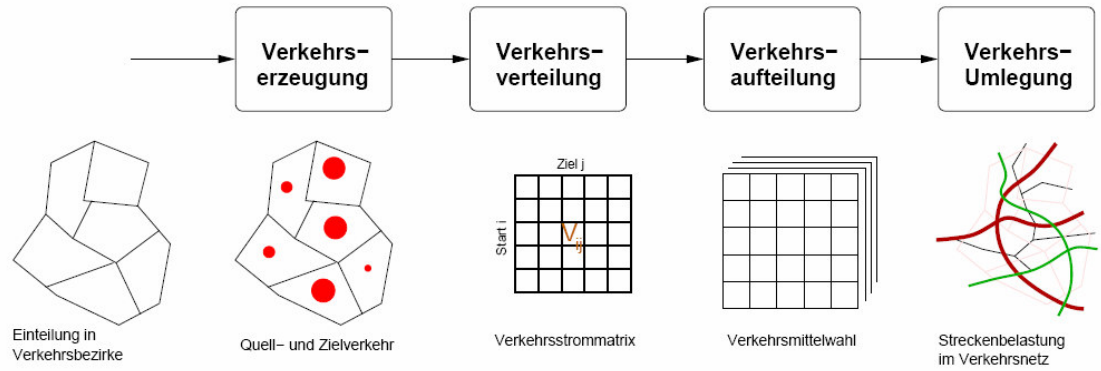


Abbildung 1: Klassischer Prozess der Verkehrsplanung, Darstellung: Treiber, M. (2007)

Gegenstand dieser Diplomarbeit ist die vierte Stufe des dargelegten Gesamtmodells. Sie kann weiter aufgegliedert werden in zwei Teile, die immer nacheinander abgearbeitet werden. Zunächst müssen für jede Quell-Ziel-Beziehung Routen ermittelt werden, bevor diese mit einem zu bestimmenden Anteil des Verkehrsstromes belastet werden. Sowohl für den Teilschritt Routensuche als auch insbesondere für den Teilschritt Aufteilung des Verkehrsstromes wurden in der Vergangenheit verschiedene, teils sehr unterschiedliche Verfahren zur Durchführung bzw. modellhaften Abbildung entwickelt, die Ergebnisse von unterschiedlicher Qualität liefern.

Bei der Durchführung von größeren Verkehrsplanungsprojekten sind Informationen über Verkehrsbelastungen von Netzen unerlässlich, um Aussagen treffen zu können über[5]:

1. Bewertung vorhandener Verkehrsinfrastrukturen,
2. Bewertung eventueller, zukünftiger Verkehrsinfrastrukturen,
3. vergleichende Bewertung mehrerer alternativer zukünftiger Verkehrsinfrastrukturen oder die
4. Entwicklung einer in irgendeiner definierten Form optimalen Verkehrsinfrastruktur

Analog zur Verkehrsinfrastruktur ist im ÖPNV das Fahrplanangebot zu bewerten oder zu verbessern. Bei diesen und anderen konkreten Anwendungen eines Verkehrsumlegungsmodells stellt sich schnell die Frage nach der Auswahl eines geeigneten Verfahrens um die auftretenden Fragestellungen adäquat und möglichst präzise zu beantworten. Neben dieser grundsätzlichen Wahl eines Verfahrens ist auch eine Differenzierung innerhalb eines Verfahrens durch das Festlegen von bestimmten Parametern möglich. Auch hier stellt sich die Frage nach sinnvollen und zielführenden

[5] Schaechterle, K.; Braun, J. (1977), S. 6

Einstellungen, die auch je nach Struktur des Planungsraums individuell variieren können.

In dieser Diplomarbeit sollen ausgewählte Verfahren der Routensuche und der Verkehrsaufteilung für den Bereich des ÖPNV auf ihre Eignung und Qualität hin untersucht werden. Hierbei wird die vierte Stufe des beschriebenen Modellierungsprozesses unabhängig von den vorangehenden Stufen betrachtet. Mögliche Rückkopplungen zwischen der vierten Stufe und den vorangegangenen Stufen können zwar auftreten und werden beispielsweise bei der Gruppe der sog. Simultanmodelle auch berücksichtigt, werden aber zur Abgrenzung des betrachteten Problems in dieser Arbeit vernachlässigt. In größeren Planungsprojekten für den ÖPNV liegen häufig Fahrgasterhebungen vor. Hierbei werden aus Befragungen der Fahrgäste aller Fahrten in einem ÖPNV-Netz an bestimmten Stichtagen die genaue Route jedes Fahrgastes durch das Netz ermittelt. Aufgabe des Verkehrsmodells ist es dann, Veränderungen der Routen in anderen Planfällen mit veränderten Netzen abzubilden. Hier werden die vier Stufen der gängigen Modelle häufig unabhängig voneinander durchgeführt. Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung und Verkehrsmittelwahl werden dann immer auf Grundlage der Fahrgasterhebung ermittelt und diese jeweils für einen Planfall modifiziert. Veränderungen in der Verkehrsnachfrage bei einer Veränderung des Angebotes sind nicht Gegenstand dieser Diplomarbeit. Dem Schritt der Verkehrsumlegung kommt die größte Bedeutung zu, da der Fahrgast bei Änderungen von Linienwegen gezwungen ist, eine andere Route zu wählen und sich so unmittelbar die Netzbelastung verändert. Insbesondere diesem Fall wird in dieser Diplomarbeit besondere Beachtung gegeben und auf dieser Grundlage die Einschränkung auf die isolierte Behandlung der vierten Stufe vorgenommen.

Ziel ist es, ein oder mehrere geeignete Umlegungsmodelle mit zweckmäßiger Parametrierung ggf. in Abhängigkeit spezifischer raumstruktureller Gegebenheiten des Planungsraumes zu ermitteln und für die Anwendung in zukünftigen ÖPNV-Planungsprojekten zu empfehlen.

Nach kurzer Vorstellung des Unternehmens PTV AG in Kapitel 2 und Einordnung der Abteilung, in der diese Diplomarbeit entstanden ist, wird in Kapitel 3 zunächst auf die verkehrswissenschaftlichen Grundlagen der Verkehrsumlegung und ihre verschiedenen Ausgestaltungen und das Vorgehen bei der Umlegung insgesamt sowie insbesondere auch auf die Routensuche eingegangen. Besonderes Augenmerk wird in Kapitel 4 auf die Theorie verschiedener mathematischer Modelle zur Aufteilung eines Verkehrsstromes auf verschiedene Routen gelegt und diese eingehend miteinander verglichen.

In Kapitel 5 wird im Schwerpunkt dieser Arbeit zunächst ein Konzept mit Vergleichskriterien für Verkehrsumlegungsergebnisse und einem Verfahren zu ihrer Bewertung erarbeitet. Anschließend werden für zwei real existierende ÖPNV-Netze unter

Anwendung verschiedener Routensuchalgorithmen und Verkehrsaufteilungsmodelle Netzbelastungen ermittelt. Die Ergebnisse werden nun dem zuvor definierten Vergleichskonzept unterzogen und ausgewertet. Als Vergleichsreferenz dienen insbesondere vor Ort erhobene tatsächliche Netzbelastungen und Fahrgastwege. In Kapitel sechs wird eine Empfehlung für zu wählende Routenwahlalgorithmen und Verkehrsumlegungsmodelle sowie ihrer Parametrierung in Abhängigkeit von Randbedingungen für zukünftige Verkehrsplanungsprojekte in Städten vergleichbarer Struktur gegeben.

2 Vorstellung des Unternehmens PTV AG

In den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts ermöglichte die aufkommende und sich schnell weiterentwickelnde Computertechnologie neue Möglichkeiten für Forschungsansätze auf dem Gebiet der Verkehrstechnik und Verkehrsplanung. Die Simulation von komplexen Verkehrsabläufen wurde mit Werkzeugen der EDV in der Praxis erstmals mit vertretbarem Aufwand umsetzbar. Aus diesen neuen Anwendungsgebieten heraus entwickelten sich Ideen und die Möglichkeit, in diesem Bereich wert schöpfend tätig zu werden. So wurde die PTV Planungsbüro Transport und Verkehr GmbH von den wissenschaftlichen Mitarbeitern der Universität Karlsruhe Hans Hubschneider und Bernd-Michael Sahling im Jahr 1979 gegründet.

Die Idee, Kenntnisse des Operation Research auf dem Gebiet Transport und Verkehr technisch-wissenschaftlich umzusetzen, führte zu den ersten beiden Software-Produkten, der interaktiven Tourenplanung INTERTOUR für die Optimierung des Güterverkehrs und der interaktiven Liniennetzplanung INTERNETZ für die Optimierung des ÖPNV, die zunächst von wenigen Mitarbeitern entwickelt und vertrieben wurden.

Nach zwei Jahrzehnten des intensiven Wachstums und der umfassenden Ausweitung der Arbeitsgebiete wurde im Jahr 1999 die PTV Planung Transport Verkehr AG gegründet und damit die inzwischen entstandenen vier größten PTV-Firmen mit der Holding verschmolzen und so die Unternehmensstruktur nachhaltig konsolidiert. Damit ist die bis heute unveränderte Gliederung der Firma in die drei Geschäftsfelder Traffic, Mobility und Logistics entstanden.

Die PTV AG zählte im vergangenen Geschäftsjahr 2006/2007 384 Mitarbeiter in acht Niederlassungen und erzielte einen Umsatz von rund 50 Mio. Euro.

Im Geschäftsfeld Logistics sind Softwarelösungen zur Optimierung von logistischen Ketten angesiedelt. Hierzu zählen u.a. die Transportplanung und Tourenoptimierung im Güterverkehr sowie die Fahrzeugeinsatzplanung und Flottensteuerung für Gewerbe unterschiedlichster Art. Außerdem ist das Geomanagement in dieses Geschäftsfeld eingeordnet.

Das Geschäftsfeld Mobility bietet Lösungen zu den Themen Reise, Verkehr und Mobilität des motorisierten Individualverkehrs. Hierzu gehören Routingdienste auf der Basis digitalen Kartenmaterials, Systeme zur individuellen Verkehrsinformation und darüber hinaus die Entwicklung individueller Lösungen, z.B. für Internetplattformen von Mitfahrzentralen.

Der Inhalt dieser Diplomarbeit fällt in das Geschäftsfeld Traffic. Hier werden zum einen die Software der Produktfamilie PTV VISION entwickelt und zum anderen umfangreiche

Consulting-Dienstleistungen für MIV und ÖPNV angeboten. Außerdem ist der Bereich Verkehrsmanagement hier angesiedelt.

Das Software-Angebot orientiert sich dabei grundsätzlich am verkehrsplanerischen Vier-Stufen-Modell. Dabei bildet das Programm VISEM (VerkehrsInformationsSystem-ErzeugungsModell) die ersten drei Stufen der Verkehrserzeugung, die Verkehrsverteilung und der Verkehrsmittelwahl auf Basis von Aktivitätenketten ab. Mit Hilfe von VISUM (Verkehr in Städten Umlegungsmodell) wird die vierte Stufe der Verkehrsumlegung abgebildet. Darüber hinaus bietet VISUM umfangreiche Werkzeuge für Verkehrsanalysen des Angebotes und der Nachfrage sowie eine umfangreiche GIS-Orientierte Datenverwaltung. VISUM ist intermodal aufgebaut und bildet ein reales Verkehrsnetz in einem Netzmodell ab. Neue Entwicklungen wie VISUM-Online sind in der Lage, in Echtzeit Verkehrsflüsse zu simulieren, Daten von Verkehrsmanagementsystemen z.B. von Autobahnen aufzunehmen und Prognosen für Stauentwicklungen etc. aufzustellen. Weitere Software, wie etwa zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation (VISSIM), runden das umfangreiche Software-Angebot des Geschäftsfeldes Traffic ab. Da für diese Diplomarbeit in erster Linie das Programm VISUM relevant ist, wird an dieser Stelle auf weitere Software-Produkte anderer Geschäftsfelder nicht eingegangen.

Im Bereich des Consultings werden Leistungen in Verkehrsplanung und Verkehrstechnik für den MIV angeboten. Darüber hinaus werden für den ÖPNV die folgenden Consulting-Leistungen angeboten:

- ► Erhebungen
- ► Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen
- ► Entwurf und Bewertung von Tarifsystemen
- ► Leistungsfähigkeitsuntersuchungen
- ► Ermittlung und Fortschreibung von Nachfragedaten
- ► Nahverkehrspläne
- ► Liniennetz- und Angebotsplanung
- ► Ausschreibungen

Diese Diplomarbeit ist in erster Linie für den Bereich der Liniennetz- und Angebotsplanung sowie der Nahverkehrspläne relevant und wird in Abstimmung mit diesen Bereichen angefertigt, spielt aber untergeordnet auch für andere Tätigkeitsfelder der PTV AG eine Rolle.

3 Ziel und Vorgehensweise einer Umlegung

Die Verkehrsumlegung wird der Nachfragemodellierung eines Verkehrsnetzes zugeordnet. Sie ist „die Verteilung des Verkehrsbedarfs auf die Verkehrswege eines bestehenden oder geplanten Netzes.“[6] Dabei bildet die Umlegung die Schnittstelle zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage bzw. Verkehrsbedarf, indem die zuvor ermittelte relationsbezogene Nachfrage, in Form einer Quell-Ziel-Matrix, auf die Fahrten eines definierten ÖPNV-Angebotes, das Verkehrsangebot, verteilt bzw. umgelegt wird. Damit ist dem Verkehrsangebot eine konkrete Verkehrsnachfrage zugeordnet.

Für die Umlegung ist demzufolge neben der Nachfrage auch das Verkehrsangebot von Bedeutung. Mit ihrer Hilfe kann die Wirkung eines Verkehrsangebotes durch die Nachbildung der Ortsveränderungen der Verkehrsteilnehmer modelliert und analysiert werden. Je nach Detaillierungsgrad der Modellierung können beispielsweise Aussagen zur Belastung einzelner Strecken oder Linienabschnitten bis hin zu Abschnitten einzelner Fahrten der Verkehrsmittel getroffen werden oder das Ein-, Aus-, und Umsteigeraufkommen an Haltestellen bestimmt werden. Es können zudem aus den Ergebnissen der Umlegung auch allgemeine Kenngrößen der Verbindungsqualität (z.B. mittlere Reisezeit, mittlere Umsteigehäufigkeit) zwischen Verkehrszellen oder global für den gesamten Untersuchungsraum gebildet werden.

Diese Ausgangsgrößen bilden das unmittelbare Ergebnis der Umlegung und damit auch des gesamten Prozesses der Verkehrsmodellierung im Vier-Stufen-Modell. Im etwas weiter gefassten Rahmen eines Verkehrsplanungsprojektes ist die gesamte Verkehrsmodellierung als „Handwerkszeug“ im Planungsprozess zu sehen. Es ermöglicht dem Verkehrsplaner zum einen Schwachstellen in einem vorhandenen Verkehrsangebot z.B. in Form von Überlastung oder geringer Auslastung in Netzteilen festzustellen und bietet damit Hinweise zur Verbesserung des Angebotes. Zum anderen kann das Modell auf verschiedene Planungsszenarien für nicht real existente Angebote angewandt werden und einen Vergleich dieser Szenarien liefern.

In diesem Kapitel werden zunächst die drei verschiedenen Detailstufen verkehrssystemfeine Umlegung, taktfeine Umlegung und fahrplanfeine Umlegung unterschieden, charakterisiert und ihre Vor- und Nachteile, sowie sinnvolle Anwendungsgebiete aufgezeigt. Die verkehrssystemfeine Umlegung wird in dieser Diplomarbeit nicht untersucht, aber zur vollständigen Darstellung aller Möglichkeiten trotzdem aufgenommen. Im Weiteren werden die einzelnen Schritte in den drei unterschiedlichen Detailstufen dargestellt und insbesondere die Routensuche und -auswahl problematisiert. Den

[6] Falkenhausen, H. von (1967), S. 1

Verkehrsaufteilungsmodellen wird auf Grund ihrer wichtigen Rolle im Anschluss ein eigenes Kapitel gewidmet.

3.1 Die verkehrssystemfeine Umlegung

Das Verfahren der verkehrssystemfeinen Umlegung gehört zur Gruppe der streckenbasierten Verfahren und besitzt den geringsten Detaillierungsgrad unter den hier betrachteten Verfahren. Es bildet im Modell nur die befahrbaren Strecken jeweils differenziert nach Verkehrssystem ab. Dabei werden die Verkehrssysteme durch das Verkehrsmittel untereinander abgegrenzt. Bei der Modellierung von Verkehrsnetzen im ÖPNV bilden Bus, Straßenbahn/Stadtbahn, U-Bahn und Regionalzug die wichtigen Verkehrssysteme. Es werden im gesamten Netz keine Linienwege, Bedienungshäufigkeiten oder Fahrpläne modelliert. Nur jeweils die Fahrzeit einer Strecke für jedes befahrene Verkehrssystem wird abgebildet. Es entsteht bei diesem Verfahren somit eine Situation ähnlich der in MIV-Netzen, lediglich die Größe des Netzes wird auf die vom ÖPNV befahrenen Strecken eingeschränkt.

Aus dieser Modellbeschreibung lässt sich ableiten, dass es sich bei diesem Verfahren um eine sehr starke Vereinfachung der wirklichen Gegebenheiten im Modell handelt. Umsteigevorgänge können innerhalb eines Verkehrssystems auf Grund der fehlenden Linienweg-Information nicht abgebildet werden. Bei einem Wechsel des Verkehrssystems werden Umsteigevorgänge zwar erfasst, durch die fehlende Information über Bedienungshäufigkeit oder Fahrplan ist es jedoch nicht möglich, eine individuelle Umsteigehäufigkeit für eine Route zu ermitteln. Auch Umsteigewartezeiten können nicht ermittelt werden. Nur die Anzahl und der Ort der Verkehrssystemwechsel, beispielsweise von Bus auf Zug, sind im Modell erfassbar. In dem aus Kanten und Knoten bestehenden Netzmodell ist es zusätzlich möglich, eine Umsteigeinformation durch das Festlegen von Abbiegebeziehungen an einzelnen Knoten zu gewinnen. Eine Abbiegebeziehung beinhaltet für einen Knoten getrennt nach Verkehrssystemen die Information, aus welchem Knotenarm kommend in welche Knotenarme ein- bzw. abgebogen werden darf. Wird nun eine Route über eine gesperrte Abbiegebeziehung hinaus ermittelt, lässt sich daraus schließen, dass am zugehörigen Knoten ein Umstieg erfolgen muss. Sind Abbiegebeziehungen freigegeben, über welche nur einzelne Fahrten verkehren, wird hier kein Umstieg ermittelt, obwohl ggf. ein Großteil der Fahrgäste anderer Fahrten umsteigen muss. Damit ergeben sich wesentliche Einschränkungen für die notwendige Bewertung der Attraktivität von Routen. Eine Route, die in der Realität auf Grund von mehreren Umsteigevorgängen mit langen Wartezeiten von Fahrgästen nicht gewählt wird, wird in diesem Modellansatz nicht von einer umsteigefreien Direktverbindung unterschieden. Somit ist dieses Verfahren mit erheblichen Ungenauigkeiten verbunden und bei den Ergebnissen muss mit großen Fehlern gerechnet werden.

Auch beim Ablauf des Verfahrens werden starke Vereinfachungen vorgenommen. Die Routensuche erfolgt nach dem Prinzip des geringsten Widerstandes. Es wird für jede Beziehung zwischen zwei Verkehrszellen die widerstandsminimale Route ermittelt. In den Widerstand gehen die Größen Fahrzeit und Umsteigezeit ein, wobei diese konstant ist und nur nach Verkehrssystemwechsel (z.B. Bus – Straßenbahn oder Bus – Zug etc.) unterschieden wird und der Pauschalwert jeweils zuvor festzulegen ist. Außerdem geht eine konstante Umsteigezeit innerhalb eines Verkehrssystems ein, sofern dieser beim Umstieg über eine gesperrte Abbiegebeziehung – wie zuvor erläutert – überhaupt festgestellt wird. Auch hier werden festzulegende Pauschalwerte (z.B. für Bus – Bus oder Zug – Zug) verwendet. Außerdem ist es möglich, für Umstiege an einem oder mehren bestimmten Knoten im Netz manuell abweichende Umsteigezeiten vorzusehen. Dies kann sinnvoll sein, etwa an einem großen Bahnhof, wo die Umsteigezeit höher angenommen werden soll, ist aber mit einem hohen Aufwand bei der manuellen Netzmodellierung verbunden. Auf den verwendeten Routenwahl-Algorithmus wird an dieser Stelle nicht eingegangen, da in Kapitel 3.3 bei der fahrplanfeinen Umlegung verschiedene Algorithmen betrachtet werden.

Der Teilschritt der Routenbelastung erfolgt mittels einer Alles-Oder-Nichts-Umlegung (engl. All-or-nothing). Die gesamte Nachfrage zwischen zwei Verkehrszellen wird auf die Route mit minimalem Widerstand umgelegt. Die Notwendigkeit der Anwendung dieses Verfahrens ergibt sich daraus, dass bei der Routensuche zuvor nur die widerstandsminimale Route – und damit genau eine Route – für jede Beziehung zwischen zwei Verkehrszellen ermittelt wird. Eine Aufteilung der Fahrgäste auf Routen mit ähnlichem Widerstand wird nicht berücksichtigt und führt zu einem weiteren Fehler.

Bei der Anwendung des verkehrssystemfeinen Verfahrens kommt es zu dem Effekt, dass Routen gewählt werden, bei denen innerhalb eines Verkehrssystems sehr häufig umgestiegen wird, weil dies (unter Berücksichtigung der oben genannten Ausnahmen) nicht erfasst werden kann und den Widerstand einer Route somit nicht erhöht. Bei anderen Verfahren erhöht jeder Umsteigevorgang den Widerstand, was zu einer insgesamt realistischeren Routenwahl mit weniger Umsteigevorgängen führt. Außerdem können die Größen Umsteigehäufigkeit, Umsteigewartezeit und Bedienungshäufigkeit nicht bzw. nicht korrekt berechnet werden.

Es muss beachtet werden, dass die Ergebnisse des verkehrssystemfeinen Verfahrens auf Grund der vorgenommenen erheblichen Vereinfachungen in der Abbildung der Wirklichkeit in diesem Modell deutlich von den Ergebnissen anderer Verfahren mit genauerer Abbildung abweichen. Aus diesem Grund wird dieses Verfahren nicht in die Analyse dieser Diplomarbeit aufgenommen, es kann zu einem hochwertigen Ergebnis nicht beitragen.

Dieses Verfahren ist zur Abbildung der Realität ungeeignet. Von einer Anwendung zur Umlegung von Verkehrsnetzen ist abzuraten. Trotzdem bietet es für die Verkehrsplanung einen Vorteil auf Grund seiner besonderen Eigenschaften: Dadurch, dass die Nachfrage unabhängig von Linienwegen auf das befahrbare Netz umgelegt werden kann, wird diese auf eine für den Fahrgast optimale Route umgelegt. Das Ergebnis in Form eines belasteten Streckennetzes kann nun vom Verkehrsplaner daraufhin analysiert werden, auf welchen Routen hohe Nachfrage auftritt. Entlang dieser Routen sollen neu zu planende Linienwege verlaufen, so dass für die Mehrheit der Fahrgäste sowohl eine umweglose als auch umsteigefreie Fahrt möglich ist. Dieses Vorgehen kann zwar nie eine detaillierte manuelle Planung ersetzen, da nie alle Randbedingungen und Einschränkungen berücksichtigt werden können, es kann dem Planer jedoch werdvolle Hinweise und neue Denkanstöße im Planungsprozess bieten. Aus diesem Grund ist eine verkehrssystemfeine Umlegung überhaupt sinnvoll und kann in der Praxis Anwendung finden.

3.2 Die taktfeine Umlegung

Das Verfahren der taktfeinen Umlegung bietet einen höheren Detaillierungsgrad als die verkehrssystemfeine Umlegung. Im Modell werden für jedes Verkehrssystem die Routen aller Linien abgebildet. Jede Linienroute wird durch ihren Takt und die Fahrzeit zwischen ihren Haltestellen charakterisiert. Diese Größen können tageszeitabhängig für verschiedene Zeitintervalle differenziert werden. Fahrplan-Abfahrtszeiten werden für die Berechnung der taktfeinen Umlegung jedoch nicht berücksichtigt.

Bei der Modellierung eines Netzes mit bekanntem Fahrplan stellt die taktfeine Umlegung eine bloße Vereinfachung des Modells dar. Der Takt wird in diesem Fall für jede Linie und für jedes Zeitintervall vor Beginn der eigentlichen Umlegung errechnet oder kann alternativ für jede Linie in Abhängigkeit der Tageszeit manuell festgelegt werden. Der vorgesehene Takt jeder Linie aus der Angebotsdefinition sowie Linienweg und Fahrzeiten sind als Datengrundlage für das Modell ausreichend.

Im Gegensatz zum zuvor behandelten verkehrssystemfeinen Verfahren werden beim taktfeinen Verfahren alle Umsteigevorgänge durch den Wechsel der Linie genau erfasst. Damit ist es möglich, im Ergebnis des Modells eine Aussage über die Größe der Umsteigehäufigkeit zu treffen. Außerdem dient die Information über Umsteigevorgänge dazu, die Attraktivität einer Route realistischer zu ermitteln und damit die Ergebnisse der Umlegung zu verbessern.

3.2.1 Taktberechnung

Ist ein Fahrplan im Netzmodell vorhanden, muss der Takt zunächst berechnet werden. Da bei der Berechnung des mittleren Taktes durch eine erweiterte Vorgehensweise das

Ergebnis mit geringer Aufwandsteigerung verbessert werden kann, wird hierauf im Detail eingegangen.

Grundsätzlich kann der Takt als Quotient aus der Länge eines Zeitintervalls und der Anzahl der Fahrten in diesem Intervall ermittelt werden. Dieser Ansatz führt bei einer großen Anzahl von Fahrten pro Zeit bzw. einem dichten Takt und hinreichend großen Zeitintervallen zu genauen Ergebnissen. Ebenfalls wenn der echte Takt ein Teiler der Länge des Zeitintervalls ist, kommt es zu korrekten Ergebnissen. Bei großen Takten und kurzen Zeitintervallen führt dieses einfache Vorgehen jedoch zu teils beträchtlichen Ungenauigkeiten. Aus diesem Grund soll ein erweiterter Ansatz, im Folgenden am Beispiel eines 40-Minuten-Taktes erläutert werden.

Bei Zeitintervallen, die häufig zweckmäßigerweise auf 60 Minuten festgelegt werden, finden in jedem Zeitintervall bei einem 40-Minuten-Takt abwechselnd eine oder zwei Abfahrten statt. Nach o. g. einfachem Vorgehen ergibt sich damit ein mittlerer Takt von wechselnd 30 oder 60 Minuten. Dies führt bei der anschließenden Routenermittlung und -belastung zu Fehlern. Außerdem wird bei dieser einfachen Definition nicht berücksichtigt, dass bei gleichmäßig verteilten Abfahrten – für den zufällig an einer Haltestelle eintreffenden Fahrgast – kürzere Wartezeiten entstehen als bei gleicher Anzahl von Abfahrten, die in kurzer Zeit gehäuft erfolgen.

Im verbesserten Ansatz wird „der Takt $\tau^{a,b}$ einer Linie L […] als das Doppelte der erwarteten Wartezeit auf die nächste Abfahrt von L bei zufälligem Zugang in I =[a,b[definiert“[7]. Die mathematische Umsetzung geschieht wie folgt:

Abfahrtszeitpunkte im Intervall I: $x_{1...n}$

Erste Abfahrt nach Zeitpunkt b: x'

Fiktive Abfahrt nach b bei zyklischer Fortsetzung: $x'' = x_1 + (b - a)$

Für Wartezeitberechnung am Intervallende gilt: $x_{n+1} = \min\{x', x''\}$

Takt:
$$\tau^{a,b} = \frac{1}{b-a}\sum_{i=0}^{n}\Delta_i$$

mit $\Delta_i = (x_{i+1} - x_i)^2$ für i = 1,…,n-1

sowie $\Delta_0 = (x_1 - a)^2$

und $\Delta_n = (x_{n+1} - x_n)^2 - (x_{n+1} - b)^2$

[7] PTV AG, VISUM Benutzerhandbuch (2006), S. 2-149

Das Ergebnis dieses Ansatzes weicht erheblich weniger vom wirklichen Takt ab als beim ersten Ansatz und liefert auch bei Fahrplänen mit aus der Taktlage verschobenen Fahrten ein besseres Ergebnis[8]. Bei erneuter Betrachtung des Beispieles mit einem 40-Minuten-Takt (Bspw. 5:55, 6:35, 7:15) ergibt sich für das Zeitintervall von 6:00 bis 7:00 Uhr ein 43,3-Minuten-Takt. Der mit diesem Verfahren ermittelte Takt bildet die Grundlage für den nächsten Schritt der Routensuche und -belastung.

3.2.2 Routensuche und -belastung

Zur Ermittlung der Routen zwischen den Verkehrszellen wird bei der taktfeinen Umlegung ein stochastisches Verfahren eingesetzt. „Die stochastischen Verfahren gehen davon aus, dass die Widerstände (z.B. Reisezeiten) des Verkehrsnetzes den Verkehrsteilnehmern nicht genau bekannt sind.“[9] Bei der klassischen Anwendung eines solchen Verfahrens in einem IV-Netz mit genau festgelegten Widerständen (Fahrzeiten etc.) wird die notwendige statistische Unschärfe durch das Ermitteln eines Zufallswertes in einem Intervall um den genau berechneten Widerstand mit Hilfe einer Verteilungsfunktion künstlich erzeugt. Anschließend wird ein Optimalroutensuchverfahren durchgeführt. Die Ermittlung des Zufallswertes und die Suche werden mehrfach wiederholt. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass „mit großer Wahrscheinlichkeit plausible Wege gefunden werden“[10]. Außerdem wird die subjektive Unsicherheit des Fahrgastes bei der Wahl der besten Route nachgebildet und nicht nur die formal beste Route belastet.

Bei der Anwendung im Zusammenhang mit dem taktfeinen Verfahren ist es von Vorteil, dass die statistische Unschärfe nicht künstlich erzeugt werden muss, sondern durch die bloße Information des Taktes ohne genaue Abfahrtszeiten bereits im Netzmodell gegeben ist. Die Wahrscheinlichkeit, welche Linie an einer Haltestelle zuerst abfährt, ist durch die Größe ihres Taktes im Verhältnis zu den Takten aller an dieser Stelle verkehrenden Linien festgelegt. Bei der Durchführung des Verfahrens wird an der Quellverkehrszelle begonnen, die Gesamtnachfrage einer Quell-Ziel-Relation zwischen allen dort zur Verfügung stehenden Abfahrtmöglichkeiten aufzuteilen. Die Aufteilung erfolgt entsprechend der Wahrscheinlichkeit, mit der eine Abfahrtmöglichkeit die Beste unter allen Abfahrtmöglichkeiten ist. Die Wahrscheinlichkeit kommt dadurch zustande, dass der Widerstand einer Route die variable Umsteigewartezeit beinhaltet. Sie ergibt sich aus dem Takt und variiert zwischen null für eine sofortige Abfahrt und der Taktzeit, welche die maximale Umsteigewartezeit ergibt. Auf allen nun belasteten Linien wird an jeder möglichen Umsteigehaltestelle ihre Belastung erneut nach dem selben Prinzip

[8] Vgl. PTV AG, VISUM Benutzerhandbuch (2006), S. 2-150
[9] Schnabel, W.; Lohse, D. (1997), S. 291
[10] Schnabel, W.; Lohse, D. (1997), S. 292

aufgeteilt. Dabei erfolgt jede vorgenommene Aufteilung unabhängig von dem zuvor zurückgelegten Teil der Route.[11]

Im zweiten Schritt werden rückwärts gehend von der Zielverkehrszelle alle Möglichkeiten ermittelt, sich von allen Haltestellen im Netz dieser Verkehrszelle zu nähern. Dabei dienen „die mittleren Widerstände der Entscheidungspunkte, für die bereits eine Aufteilung errechnet wurde […] sukzessiv zur Ermittlung der Aufteilung an weiter entfernt liegenden Entscheidungspunkten."[12] Es werden immer nur Routen belastet, die unter allen verfügbaren Routen eine positive Wahrscheinlichkeit besitzen, unter allen zur Verfügung stehenden Routen die Beste zu sein. D.h. wenn eine Route für den günstigen Fall, das bei allen Umsteigevorgängen immer sofort das Folgefahrzeug eintrifft, einen größeren Widerstand besitzt als andere Routen im ungünstigsten Fall, dass bei Umsteigevorgängen immer die maximale Wartezeit entsteht, wird erstere Route nicht belastet.

Um das Verfahren weiter zu verbessern ist es sinnvoll, bei gleichen Routen mit unterschiedlichen Gesamtreisezeiten nur jeweils die zeitlich kürzeste Route zu verwenden und die restlichen Routen zu verwerfen. Dieses Vorgehen wird als Dominanz bezeichnet. Zwei oder mehr Routen gelten dabei immer dann als gleich, wenn auf einer Quell-Ziel-Relation dieselbe Folge von Linien in derselben Reihenfolge benutzt wird und außerdem Start- und Zielhaltestelle gleich sind.[13] Dies kann vorkommen, wenn verschiedene Umsteigehaltestellen benutzt werden.

3.2.3 Modellierung von vertakteten Linien und Anschlüssen

Bei der Situation des Parallelverkehrs zweier oder mehr Linien auf einem Streckenabschnitt stellt sich bei der Anwendung des taktfeinen Verfahrens das Problem, dass die Attraktivität einer Fahrt über diese Strecke von der Vertaktung, d.h. von dem zeitlichen Versatz der Abfahrt der Linien, abhängig ist. Da diese Situation sowohl im Stadt- als auch im Regionalverkehr häufig vorzufinden ist, muss eine Lösung zur Berücksichtigung der Vertaktung gefunden werden. Verkehren beispielsweise zwei parallele Linien auf einer Teilstrecke jeweils in einem 20-Minuten-Takt, ist ihre Attraktivität bei einem Zeitversatz der Abfahrten von zehn Minuten maximal. Erfolgt die Abfahrt dicht hintereinander, im Extremfall sogar zeitgleich, ist die Attraktivität minimal. Da die mittlere Wartezeit Einfluss auf die Belastung der abgehenden Linien von einer Haltestelle hat, wirkt sich das Vernachlässigen einer Vertaktung unmittelbar auf das Ergebnis aus. Weil der Fahrplan im Netzmodell nicht berücksichtigt ist, bzw. gar nicht existiert, muss dieser Zusammenhang zusätzlich im Netz modelliert und bei der Routenwahl und -belastung berücksichtigt werden. Dazu wird im Netzmodell auf allen betreffenden Strecken eine

[11] Vgl. PTV AG, VISUM Benutzerhandbuch (2006), S. 2-151 ff.
[12] PTV AG, VISUM Benutzerhandbuch (2006), S. 2-152
[13] Vgl. PTV AG, VISUM Benutzerhandbuch (2006), S. 2-151 ff.

Koordinierung festgelegt. Sie drückt in Bezug auf zwei oder mehr Linien aus, dass ihre Abfahrten im gleichen Zeitabstand erfolgen. Nur unter dieser Voraussetzung erhält man für zwei vertaktete Linien das gleiche Umlegungsergebnis wie für eine Linie mit halbem Takt.

Ähnlich verhält sich die Situation bei aufeinander abgestimmten Anschlüssen. Im Modell wird als Umsteigewartezeit immer der halbe Takt zugrunde gelegt. In Netzen des öffentlichen Nahverkehrs werden Anschlüsse jedoch oft nicht dem Zufall überlassen, sondern das Eintreffen und Abfahren verschiedener Linien zum Zwecke der Reduzierung der Umsteigewartezeit aufeinander abgestimmt. Dies gilt insbesondere für den weit verbreiteten integralen Taktfahrplan, bei dem im gesamten Netz Anschlüsse an bestimmten Knoten aufeinander abgestimmt werden. Um auch dies bei der Modellierung zu berücksichtigen, können an den betreffenden Haltestellen Tabellen mit festen Umsteigewartezeiten zwischen allen dort verkehrenden Linien angelegt werden. Existiert eine solche Tabelle, ersetzt diese bei der Routensuche und -belastung immer den Standardwert, der sonst aus den Abfahrtszeiten der Folgelinie errechnet wird.

3.2.4 Bewertung und Einsatz des Verfahrens

Wie zu Anfang beschrieben, bildet das taktfeine Verfahren eine erheblich genauere Abbildung der Wirklichkeit im Modell als das verkehrssystemfeine Verfahren, ist aber im Vergleich zum fahrplanfeinen Verfahren eine stärkere Vereinfachung der Wirklichkeit. Im Modell wird nicht nur die beste Route zwischen zwei Verkehrszellen belastet, sondern mehrere Routen. Dies ist besonders bei Routen ähnlicher Qualität vorteilhaft, da sich in der Realität in dieser Situation die Fahrgäste auf ähnlich gute Routen verteilen als nur die allerbeste Route zu benutzen. Ob und wie stark sich die Vereinfachungen auf die Qualität des Ergebnisses auswirken ist u. a. Gegenstand der Untersuchungen in Kapitel 5.

Das Ergebnis bei Netzen mit großem Takt wird stärker von der Realität abweichen als bei Netzen mit dichterem Takt. Dies ist insbesondere darin begründet, dass bei großem Takt bedeutende Anschlüsse mit großem Umsteigeraufkommen – soweit möglich – aufeinander abgestimmt werden und die meisten Fahrgäste ihre Fahrt zuvor planen. So liegt die mittlere Umsteigezeit deutlich unter der mittleren Wartezeit bei im Modell unterstelltem gleich verteiltem (zufälligen) Eintreffen an einer Haltestelle. Ist der Takt hingegen netzweit sehr dicht, fahren die Fahrgäste überwiegend ohne vorherige Reiseplanung. In diesem Fall treffen die Fahrgäste tatsächlich näherungsweise gleich verteilt an der Haltestelle ein und die Annäherung im Modell kann gute Ergebnisse liefern. Durch eine aufwändige manuelle Modellierung kann dieser Fehler zwar auch in Netzen mit großem Takt reduziert werden, er steigt in komplexen Netzen aber schnell auf das

Maß einer vollständigen Fahrplaneinpflegung an. Gleiches gilt für die Modellierung von Taktkoordinierungen.

Besonders geeignet ist die taktfeine Umlegung zur Modellierung von Konzeptplanungen im Stadtverkehr. Zum einen entfällt der Arbeitsschritt der Fahrplanerstellung für die Planfälle und zum anderen werden kurze Rechenzeiten realisiert und der Zeitaufwand bei Modellierung zahlreicher Planfälle verringert. In städtischen Verkehrsnetzen ist der Takt darüber hinaus dicht genug, so dass auftretende Fehler durch die grobe Modellierung nicht zu groß werden. Außerdem werden wichtige Kenngrößen wie Umsteigehäufigkeit, Bedienungshäufigkeit und Umsteigezeit berechnet, wobei die Umsteigezeit bei Netzen mit großem Takt hier mit größerem Fehler behaftet ist.

3.3 Die fahrplanfeine Umlegung

Von den hier betrachteten Umlegungsverfahren bietet das fahrplanfeine Verfahren den höchsten Detaillierungsgrad. Es wird im Modell neben dem Linienweg für jede einzelne Fahrt ein minutengenauer Fahrplan mit Abfahrts- und Ankunftszeiten an jeder Haltestelle hinterlegt und bei der Umlegung berücksichtigt. Damit stehen im Modell alle Informationen zur Verfügung, die auch der Fahrgast zu seiner Reiseplanung nutzen kann und es ist möglich, alle Kenngrößen der ÖPNV-Charakteristik genau zu berechnen.

Im Gegensatz zu den zuvor betrachteten Verfahren der verkehrssystemfeinen Umlegung und der taktfeinen Umlegung können bei der fahrplanfeinen Umlegung für jede Route präzise Aussagen über die in der Wirklichkeit auftretenden Ein- und Umsteigewartezeiten getroffen werden, da der Fahrplan genau berücksichtigt wird. Die gesamte Fahrt kann im Modell mit allen Merkmalen rechnerisch präzise vorweggenommen werden. Dies ist die Voraussetzung, um das Verhalten eines Fahrgastes bei der Verbindungswahl möglichst realistisch abzubilden.

Bei der Behandlung der fahrplanfeinen Umlegung muss der Begriff der Verbindung vom Begriff der Route unterschieden werden. Bei einer Route handelt es sich um die „räumliche Ausprägung einer Ortsveränderung in einem Verkehrsnetz beschreiben (sic!) durch eine Folge von Knoten und Strecken“[14]. Die Verbindung hingegen beinhaltet darüber hinausgehend eine Information über die zeitliche Lage und ist somit eine Route ergänzt um die Angabe einer Abfahrtszeit. Diese Unterscheidung ist im ÖPNV notwendig, da im Gegensatz zum IV nicht alle Routen kontinuierlich zur Verfügung stehen, sondern an einen Fahrplan gebunden sind.

Das fahrplanfeine Umlegungsverfahren lässt sich in verschiedene, nacheinander ablaufende Schritte einteilen: Zunächst müssen für alle Beziehungen zwischen jeweils zwei Verkehrszellen Routen mit Hilfe eines Suchalgorithmus im Netzmodell ermittelt

[14] Friedrich, M. (2003): Verkehrsplanung II, S. 135

werden. Anschließend wird unter den gefundenen Routen eine Vorauswahl getroffen, um einerseits qualitativ stark unterlegene oder unsinnige Routen zu verwerfen und andererseits den Rechenaufwand in den folgenden Schritten zu reduzieren. Weiterhin ist es notwendig, die Attraktivität jeder gefundenen Route mit einem Widerstand zu charakterisieren. Dieser ist erforderlich, um das Aufkommen zwischen zwei Verkehrszellen im letzten Schritt, der Routenbelastung, zwischen allen zur Verfügung stehenden Routen angemessen aufzuteilen. Für den Fahrgast unattraktive Routen sollen dabei tendenziell geringer belastet werden als attraktive Routen, um die Routenwahl der Fahrgäste in der Realität im Modell realistisch nachzubilden. Als Grundlage dazu ist es notwendig, die Attraktivität jeder Route in Form des Routenwiderstandes möglichst realistisch zu bestimmen.

3.3.1 Verbindungssuche

Die Routensuchverfahren werden in die Gruppe der Optimalroutensuchverfahren (auch Bestwegverfahren genannt) und der Alternativroutensuchverfahren (auch Mehrwegverfahren genannt) unterschieden. Verfahren der ersteren Gruppe ermitteln dabei immer nur eine, nämlich die optimale (beste) Route zwischen zwei Verkehrszellen. Dies hat Nachteile insbesondere bei Beziehungen auf denen mehrere, ähnlich gute Routen existieren. „In der Realität werden für eine Verkehrsbeziehung […] bei entsprechendem Angebot im Netz auch mehrere Wege (Routen) durch die Verkehrsteilnehmer genutzt.“[15] Genau dies wird bei Optimalroutensuchverfahren nicht berücksichtigt. „In Stadtzentren […] stehen häufig für die Fahrt von A nach Z mehrere gleichgute Wege zur Auswahl. Der Optimalweg unterscheidet sich hier von Alternativwegen durch kleine Längendifferenzen, die nicht von allen Fahrgästen gleich beurteilt werden. In diesen Netzen führen Bestwegverfahren zu groben Fehlern.“[16] Die Gruppe der Alternativroutensuchverfahren ermittelt zur Behebung dieses Problems mehrere Routen für eine Verkehrsbeziehung. Die Gesamtbelastung dieser Verkehrsbeziehung wird dann auf die verschiedenen Routen unter Berücksichtig ihres Widerstandes (ihrer Attraktivität für die Verkehrsteilnehmer) aufgeteilt. Das Wahlverhalten der Fahrgäste wird im Modell so genauer abgebildet als mit den Bestwegverfahren.

3.3.1.1 Optimalroutensuchverfahren

Zunächst wird in der Gruppe der Optimalroutensuchverfahren auf das Verfahren der Kurzwegsuche für ein ÖPNV-Netz näher eingegangen. Im ÖPNV ist im Gegensatz zum MIV eine Berücksichtigung der Abfahrtszeiten notwenig. Bei der Kurzwegsuche wird

[15] Schnabel, W.; Lohse, D. (1997), S. 287
[16] Falkenhausen, H. von (1967), S. 4

zwischen zwei Verkehrszellen für jede mögliche Abfahrtszeit eines Verkehrsmittels an der Quellverkehrszelle eine eigene Suche ausgeführt, die die jeweils beste Verbindung zu allen Zielverkehrszellen zu diesem Zeitpunkt liefert. Es handelt sich hierbei um eine

mono- bzw. einkriterielle Suche. Als Kriterium für den besten Weg müssen alle Einflussgrößen zu einem Suchwiderstand zusammengefasst werden. Der Suchwiderstand setzt sich aus der Summe von Reisezeit [min] und dem Produkt aus Umsteigehäufigkeit [-] und Umsteigezuschlag [min] zusammen. Die Reisezeit wiederum setzt sich aus folgenden Zeiten zusammen:[17]

- Zugangszeit [min]
- Fahrzeit im Verkehrsmittel [min]
- Umsteigegehzeit [min]
- Umsteigewartezeit [min]
- Abgangszeit [min]

Im Gegensatz zum MIV ergibt sich als Ergebnis im ÖPNV nicht eine einzige beste Route, sondern eine ganze Reihe von besten Verbindungen mit unterschiedlicher Abfahrtszeit. Sie werden dem nächsten Schritt der Vorauswahl der Wege zugeführt.

Eine Verbesserung des Verfahrens ist durch eine sog. Rückwärtskorrektur der gefundenen Verbindungen möglich. Hierbei wird ausgehend von der Zielverkehrszelle rückwärts laufend geprüft, ob für jeden Teil einer Verbindung eine spätere Abfahrt auf der gleichen Route existiert. Dadurch werden ggf. Umsteigewartezeiten reduziert und für die gleiche Ankunftszeit eine spätere Abfahrtszeit ermittelt. Dies kann beispielsweise ein besseres Ergebnis für den Fall liefern, dass die erste Linie einer Verbindung im 10-Minuten-Takt verkehrt und die zweite Linie im 20-Minuten-Takt. Eine günstige Verbindung besteht hier immer nur für jede zweite Abfahrt der ersten Linie. Fraglich ist hierbei, inwiefern ein Fahrgast bei seiner Reiseplanung ebenso vorgeht und in der Realität tatsächlich nur die sinnvollen Verbindungen wählt. Bei Nutzung von zunehmend verbreiteten elektronischen Fahrplanauskunftssystemen ist dies gegeben, auch bei guter Kenntnis des ÖPNV-Angebots durch den Fahrgast wird die Rückwärtskorrektur zu einer Verbesserung der modellhaften Abbildung führen. Für den Fall einer Verbindung mit zahlreichen Umstiegen und vielen unterschiedlichen Takten der einzelnen Linien kann der Fahrgast ggf. die sinnvollste Abfahrtszeit der ersten Linie nicht ermitteln. Dieser Fall tritt insbesondere in städtischen Netzen jedoch selten auf, so dass die Anwendung der Rückwärtssuche insgesamt sinnvoll erscheint.

[17] Vgl. PTV AG, VISUM Benutzerhandbuch (2006), S. 2-161

Alternativ zur monokriteriellen Kurzwegsuche kann das Verfahren optional auf eine bikriterielle Suche erweitert werden. Da sich die Fahrgäste in ihrer Umsteigebereitschaft unterscheiden können, bietet es sich an, die Kriterien Umsteigehäufigkeit und Reisezeit schon bei der Suche getrennt zu berücksichtigen. In diesem Fall wird für jede mögliche Umsteigehäufigkeit eine reisezeitminimale Verbindung ermittelt. Bei Verbindungen, die bei unterschiedlichen Umsteigehäufigkeiten die gleiche Reisezeit besitzen, werden alle bis auf die der geringsten Umsteigehäufigkeit gelöscht. Sie sind grundsätzlich als unattraktiv einzustufen. Dieses Vorgehen bietet den Vorteil, dass in den folgenden Modellschritten im Detail berücksichtigt werden kann, wie sich Fahrgäste zwischen reisezeitminimalen- und umsteigehäufigkeitsminimalen Verbindungen aufteilen. Im Falle einer monokriteriellen Suche wird immer nur eine dieser Verbindungen belastet, es erfolgt keine Aufteilung. Da der Aspekt, ob bevorzugt kürzere umsteigeintensive oder längere direkte Verbindungen genutzt werden, eine wichtige Rolle spielt, ist eine bikriterielle Suche der monokriteriellen Suche vorzuziehen.

3.3.1.2 Alternativroutensuchverfahren

In der Gruppe der Alternativroutensuchverfahren wird die Branch&Bound-Suche betrachtet. Sie ermittelt für eine Verkehrsbeziehung stets mehrere attraktive Routen. Dabei wird von der Quellverkehrszelle aus ein sog. Suchbaum generiert, der alle sinnvollen Verbindungen zu jeder möglichen Zielverkehrszelle enthält. Dieser Suchbaum wird nacheinander für jede Quellverkehrszelle errechnet. Da es sich bei der Berechnung des Suchbaumes um ein mathematisch-algorithmisches Problem und damit um kein direktes Problem der Verkehrsplanung handelt, wird in dieser Diplomarbeit nicht weiter darauf eingegangen. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, werden bereits gefundene Teilverbindungen noch während der Rechnung mit anderen Verbindungen gleichen Zieles verglichen. Hierzu wird genau wie bei der Kurzwegsuche ein Suchwiderstand errechnet. Er besteht aus der Summe von Reisezeit [min], dem Produkt aus Umsteigehäufigkeit [-] und Umsteigezuschlag [min]. Die Reisezeit ist genau wie bei der Kurzwegsuche (siehe Kapitel 3.3.1.1) definiert. Eine Route wird bei Erfüllung einer von drei Bedingungen sofort verworfen, ohne sie bis zur Zielverkehrszelle zu vervollständigen. Dadurch entsteht ein Rechenzeitgewinn und Äste des Suchbaums mit unsinnigen Routen werden nicht weiter verlängert. Die Abbruchkriterien gleichen denen des anschließenden Schrittes der Vorauswahl der Wege nach der Suche und werden im folgenden Kapitel 3.3.2 betrachtet.

3.3.2 Vorauswahl der Verbindungen

Eine Vorauswahl der Wege, vor dem Schritt der Belastung, wird sowohl nach der Kurzwegsuche als auch nach der Branch&Bound-Suche durchgeführt. Ziel ist es, nur sinnvolle Verbindungen beizubehalten und zu belasten. Sehr schlechte und unsinnige

Verbindungen werden verworfen. Dies geschieht um Verbindungen, die ohnehin nicht von Fahrgästen genutzt werden nicht zu belasten und in den folgenden Schritten Rechenaufwandt einzusparen.

Die Ermittlung sehr schlechter und unsinniger Verbindungen wird nach den Kriterien Suchwiderstand, Reisezeit und Umsteigehäufigkeit durchgeführt. Dabei wird jede Verbindung zwischen zwei Verkehrszellen mit der je Kriterium besten Verbindung zwischen diesen Verkehrszellen verglichen. Es werden die folgenden formellen Kriterien nacheinander zur Anwendung gebracht:[18]

1. Suchwiderstand der Verbindung > a_1 · minimaler Suchwiderstand + b_1
2. Reisezeit der Verbindung > a_2 · minimale Reisezeit + b_2
3. Umsteigehäufigkeit der Verbindung > min. gefundene Umsteigehäufigkeit + b_3

Der Suchwiderstand wird aus dem jeweiligen Suchverfahren übernommen. Für jedes Kriterium kann ein Faktor (a_n) sowie ein Zuschlag (b_n) parametriert werden. Das zweite Kriterium kann als „Umweg“ bezeichnet werden. Lohse/Schnabel[19] geben als Orientierungswerte $a_2 = 1{,}40$; $b_2 = 0$ für Stadtstraßennetze und $a_2 = 1{,}25$; $b_2 = 0$ für Landstraßennetze an und gelangen zur Aussage, „dass bei insgesamt kürzeren Wegen – also im Stadtstraßennetz – relativ größere Umwege in Kauf genommen werden als bei langen Fahrten“. Diese Eigenschaft kann durch Werte > 0 für b_2 weiter präzisiert werden. Der Wert b_3 für die Anzahl der Umstiege ist stark von der Sensitivität der Fahrgäste bezüglich der Anzahl der Umstiege abhängig. Die Ermittlung sinnvoller Werte hierfür ist u. a. Gegenstand des Kapitels 5 dieser Diplomarbeit.

3.3.3 Berechnung des Verbindungswiderstandes

Nachdem Verbindungen für jede Quell-Ziel-Relation gesucht wurden und die Menge der gefunden Verbindungen auf solche Verbindungen, die sinnvoll sind und in der Realität genutzt werden können reduziert ist, stellt sich die Frage nach der Verteilung des Verkehrsstromes einer Quell-Ziel-Relation auf ihre Verbindungen. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass attraktivere („bessere“) Verbindungen häufiger von Fahrgästen ausgewählt werden als weniger attraktivere („schlechtere“) Verbindungen. Um dieses Verhalten in einem Modell abbilden zu können, ist es zunächst notwendig, die Attraktivität zu erfassen, um anschließend mathematische Modelle zur Aufteilung des Verkehrsstromes entwickeln zu können. In der Verkehrsmodellierung wird hierzu der Ansatz der Beschreibung jeder Verbindung durch einen Widerstand angewandt. Der Widerstand verhält sich dabei anti-proportional zur Attraktivität einer Verbindung, d.h. eine attraktive („gute“) Verbindung besitzt einen geringen Widerstand, eine unattraktive

[18] Vgl. PTV AG, VISUM Benutzerhandbuch (2006), S. 2-162
[19] Vgl. Schnabel, W.; Lohse, D. (1997), S. 289

(„schlechte“) Verbindung hingegen einen hohen Widerstand. Analog zur Elektrotechnik wirkt der Widerstand der Belastung einer Verbindung mit einem Fahrgaststrom entgegen. Ein hoher Widerstand führt zu einer geringen Belastung, ein niedriger Widerstand zu einer hohen Belastung.

Folglich ist die Ermittlung eines realistischen Widerstandes, der das Verhalten der Fahrgäste bzw. ihre Einschätzung der Qualität von alternativen Verbindungen wiedergibt von großer Bedeutung für das Modell. Dabei ist ein Kompromiss aus Einflussgrößen und zur Verfügung stehenden Daten bzw. dem Aufwand der Abbildung dieser Daten im Modell, zu treffen. Folgende Einflussgrößen sind vorstellbar:

a) Fahrzeit im Fahrzeug
b) Zugangszeit
c) Abgangszeit
d) Gehzeit (für Fußwege beim Umsteigen)
e) Startwartezeit
f) Umsteigewartezeit

} Reisezeit

g) Umsteigehäufigkeit
h) Betreiberwechsel
i) Fahrpreis
j) Zuschlag für Zwischenhalte
k) Komfort an den Haltestellen
l) Komfort der Fahrzeugausstattung
m) Zuverlässigkeit
n) Sitzplatzverfügbarkeit
o) Zeitliche Lage der Verbindung

„Die genaue mathematisch-statistische Erfassung […] ist äußerst schwierig. Nicht alle Merkmale sind objektiv meß- oder zählbar. Bei vielen kann man u. U. nur bestehende Zusammenhänge zu meß- oder zählbaren Faktoren statistisch oder korrelativ nachweisen.“[20]

Die Größen a), f), und g) können genau aus den Fahrplandaten der gefundenen Verbindung ermittelt werden. Zur Ermittlung der Größen b), c) und d) ist eine zusätzliche präzise Modellierung von Fußwegzeiten im Netzmodell erforderlich.

[20] Ueberschaer, M. (1969), S. 2

Die Größe e) kann durch verschiedene Verfahren angenähert werden: Es kann unterstellt werden, dass alle Fahrgäste den Fahrplan kennen und gezielt zur Abfahrtszeit zur Haltestelle gehen – in diesem Fall entsteht keine Startwartezeit. In Stadtverkehrsnetzen mit dichtem Takt ist dies unrealistisch, hier kann bei Unterstellung eines zufälligen Zugangs zur Haltestelle die Hälfte der mittleren Fahrzeugfolgezeit zum Ansatz gebracht werden. Alternativ kann eine Wurzelfunktion verwendet werden, die ausdrückt, dass die Fahrgäste bei niedriger Bedienungshäufigkeit eine bessere Fahrplankenntnis besitzt und ein größerer Teil der Fahrgäste gezielt zugehen[21]:

$$\text{Startwartezeit} = a \cdot \sqrt{\frac{\text{Umlegungszeitraum}}{\text{Bedienungshäufigkeit}}}$$

Mit a = 1,5 ergibt sich für den Widerstand der folgende Funktionsgraph (1) zum Vergleich ist der Widerstand bei gleichverteiltem Zugang ebenfalls dargestellt (2):

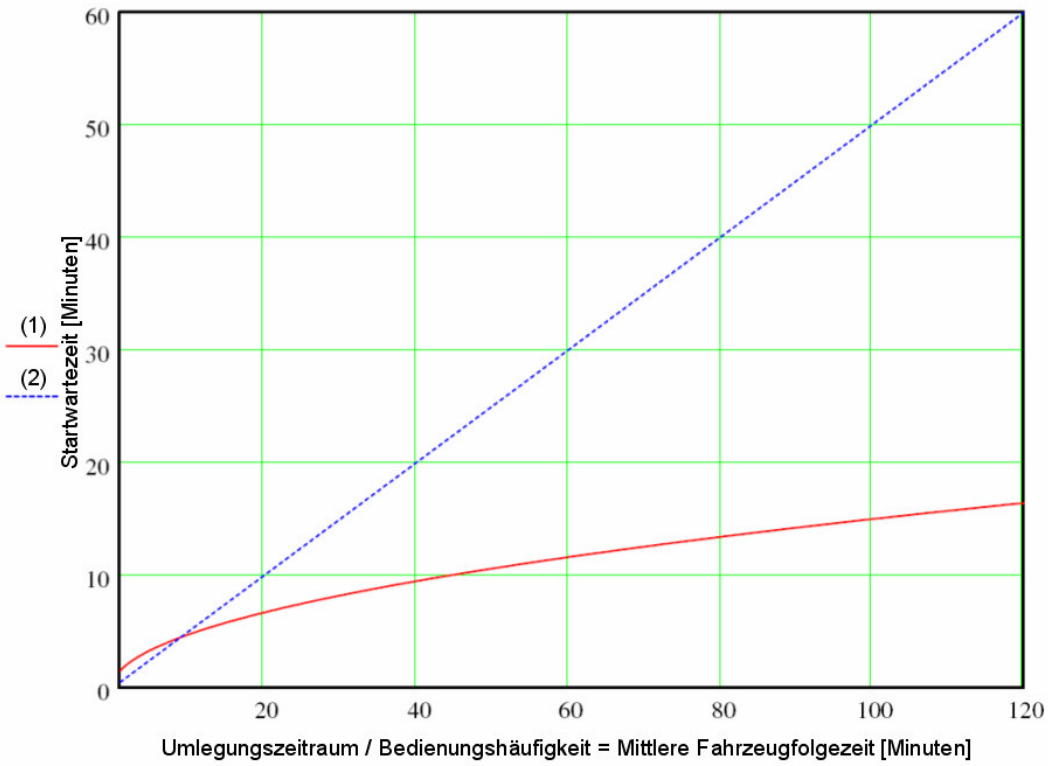


Abbildung 2: Funktionen der Startwartezeit (eigene Darstellung)

Es ist zu erkennen, dass bei Annahme der Wurzelfunktion bei geringen mittleren Fahrzeugfolgezeiten (< 10 Min.) ein ähnlicher Widerstand wie bei gleichverteiltem Zugang entsteht. Bei großen mittleren Fahrzeugfolgezeiten hingegen (> 10 Min. bis < 120 Min.) steigt der Widerstand etwa bis auf maximal ein Viertel des Vergleichswertes an. Da bei größeren Takten viele Fahrgäste geplant zur Haltestelle gehen, ein

[21] Vgl. PTV AG, VISUM Benutzerhandbuch (2006), S. 2-163

gewisser Teil aber trotzdem ungeplant zugeht, stellt die Wurzelfunktion eine plausible Näherung dar.

Die Größe h) kann durch Zuordnung jeder Linie zu einem Betreiber modelliert werden. Ein signifikanter Widerstand entsteht bei einem Betreiberwechsel nur außerhalb von Tarifverbünden, wenn bei Betreiberwechsel ein neuer Fahrschein zu lösen ist. Innerhalb von Tarifverbünden spielt der Betreiberwechsel i.d.R. keine Rolle bei der Verbindungsentscheidung eines Fahrgastes.

Der Fahrpreis i) ist für die Wahl einer Verbindung von großer Bedeutung, insbesondere bei längeren Fahrten durch mehrere Tarifgebiete können unterschiedliche Fahrpreise auftreten und die Verbindungswahl zumindest von einem besonders preissensitiven Teil der Fahrgäste wesentlich beeinflussen. Andererseits ist in vielen Tarifverbünden innerhalb eines Stadtgebietes für beliebige Verbindungen der gleiche Fahrpreis zu entrichten, so dass der Fahrpreis in diesem Fall keinen Einfluss auf die Verbindungswahl hat.

Häufige Zwischenhalte j) können eine Verbindung für den Fahrgast im Vergleich zu einer Verbindung mit wenigen Halten auf der gleichen Route subjektiv langsamer erscheinen lassen, als sie durch die objektive Fahrzeit ist. Diesem Effekt kann durch Vergabe eines Widerstandszuschlags für jeden Zwischenhalt Rechnung getragen werden.

Die Modellierung der Größen des Komforts k) und l) sind mit einer weiteren Detaillierung des Netzmodells verbunden. Es ist möglich für jede Haltestelle eine Attraktivität festzulegen, und dementsprechend bei Benutzung der Haltestelle den Widerstand daraufhin zu erhöhen oder zu senken. Dies ist u. U. sinnvoll, um Umsteigevorgänge auf attraktive Omnibusbahnhöfe zu ziehen und den Umstieg an einer unattraktiven Haltestelle z.B. direkt vor oder hinter dem Omnibusbahnhof zu vermeiden. Werden im Modell den Fahrten Fahrzeugtypen zugeordnet, können z.B. Fahrten mit modernen Niederflurfahrzeugen einen geringeren Widerstand erhalten, als solche, die mit veralteten Fahrzeugen bedient werden. Dies ist besonders für Netze mit besonders inhomogenem Fuhrpark sinnvoll zu sein. Als Orientierung zur Festlegung von Komfortstufen können hierbei die Wertetabellen der Standardisierten Bewertung[22] - ein Verfahren zur Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des ÖPNV - dienen.

Die Zuverlässigkeit m) ist meist nicht genau bekannt, denkbar ist aber in Ausnahmefällen eine Erhöhung des Widerstandes für bestimmte, häufig verspätete Linien. Die Daten müssen dazu manuell in das Netzmodell eingepflegt werden.

[22] Intraplan / Heimerl (2006), Anhang 1, S. 7 f., Tabelle 2-3 und Tabelle 2-4

Bei der auslastungsbedingten Sitzplatzverfügbarkeit n) stellt sich grundsätzlich das Problem, dass diese Größe als Eingangsgröße der Umlegung gleichzeitig eine Ausgangsgröße ist und damit vom Umlegungsergebnis abhängt. Da Auslastungseffekte im MIV von erheblicher Bedeutung sind, wurden speziell für diesen Bereich sog. Sukzessiv- und Lernverfahren entwickelt. „Bei dem Sukzessivverfahren wird die Verkehrsstrommatrix in mehrere Schichten aufgeteilt. […] Die Schichten werden der Reihe nach […] umgelegt und auf den Zustand des vorhergehenden Schritts aufgesetzt.“[23] Planungsziel bei ÖPNV-Netzen ist meist eine Vermeidung von extremen Auslastungen. Auf Grund der dadurch untergeordneten Bedeutung von Überlastungseffekten im ÖPNV und der hohen Komplexität ihrer Berücksichtigung im Modell werden sie in der Praxis häufig vernachlässigt und an dieser Stelle nicht näher betrachtet.

Da im ÖPNV die Verkehrsmittel im Gegensatz zum MIV nicht stetig verfügbar sind, sondern an einen Fahrplan gebunden sind, spielt die zeitliche Lage der Verbindungen o) eine wichtige Rolle. Erfolgt sie vor oder nach der Wunschzeit des Fahrgastes, kann dies ggf. den Zeitaufwand beim Erreichen eines Termins am Zielort erhöhen und damit die Attraktivität senken. Da in Modellen bzw. den darin enthaltenen Daten oft nicht hinreichend genau bekannt ist, zu welcher exakten Zeit welche Zahl von Fahrgästen eine Verbindung wünschen, ist nur eine grobe Annäherung möglich, um zumindest zeitlich weit entfernte Verbindungen negativ zu bewerten. Dazu werden bei der Erhebung Zeitintervalle für eine bestimmte Nachfrage festgelegt und der Widerstand aller im Modell außerhalb stattfindenden Fahrten dieses Zeitintervalls mit der Zeitdifferenz zum Beginn bzw. zum Ende des Intervalls erhöht. Bei Fahrgasterhebungen werden üblicherweise 60 Minuten-Intervalle gebildet.

Für alle diese Größen, deren Summe den Widerstand der Verbindung bildet, ist eine Gewichtung durch Festlegung eines jeweiligen Gewichtungsfaktors möglich. Die Ermittlung sinnvoller Gewichtungsfaktoren anhand mehrerer praktischer Beispiele ist ein Schwerpunkt in Kapitel 5.

3.3.4 Belastung der Verbindungen

Das Ziel der Umlegung ist es, das modellierte Netz mit Fahrgastfahrten zu belasten. Sobald zwischen zwei Verkehrszellen mehr als eine Verbindung besteht, ist dies nicht trivial. Bei Anwendung des Optimalroutensuchverfahrens wird zwar nur eine Verbindung für jeden Abfahrtszeitpunkt ermittelt, da jedoch meist Fahrtmöglichkeiten zu mehreren Zeitpunkten, teils dicht hintereinander bestehen, werden auch mit diesem Suchverfahren mehrere Verbindungen ermittelt. Die Alternativroutensuchverfahren liefern darüber hinaus für jeden Zeitpunkt mehrere Verbindungen. Daher muss der zwischen jeweils zwei Verkehrszellen bestehende Fahrgaststrom auf die zuvor ermit-

[23] Vgl. Schnabel, W.; Lohse, D. (1997), S. 312

telten sinnvollen Verbindungen aufgeteilt werden. Dies geschieht mit einem Aufteilungsmodell. Dabei handelt es sich um eine Funktion, die in Abhängigkeit des Widerstandes einer Verbindung einen Nutzen bestimmt. Anschließend wird der Fahrgaststrom proportional zum Anteil des Nutzens einer Verbindung am Gesamtnutzen aller Verbindungen verteilt.

Der Nutzen U_i einer Verbindung i ergibt sich als Funktion des Widerstandes $f(WID_i)$ dieser Verbindung. Es stehen verschiedene Funktionen zur Verfügung, die in der Vergangenheit entwickelt wurden. Die Funktionen Kirchhoff, Logit, Lohse und Box-Cox werden in Kapitel vier ausführlich beschrieben, auf ihre Eigenschaften hin untersucht, verglichen und bewertet.

Der Anteil des Fahrgaststromes p_i, mit dem eine Verbindung i belastet wird, ergibt sich zu:

$$p_i = \frac{U_i}{\sum_{i=1}^{n} U_i} = \frac{f(WID_i)}{\sum_{i=1}^{n} f(WID_i)}$$

Damit ist die Größe des Fahrgaststromes jeder Verbindung zwischen zwei Verkehrszellen bekannt. Der Vorgang wird für alle Kombinationen von Verkehrszellen durchgeführt, sofern zwischen ihnen ein von Null verschiedener Fahrgaststrom besteht. Für jede Verbindung ist im Netzmodell bekannt, auf welchen Strecken sie verläuft. Für jede Strecke im Netzmodell wird die Belastung aller über sie führenden Verbindungen summiert. Als Ergebnis des Umlegungsprozesses erhält man ein belastetes Netz. Damit lassen sich die zu Beginn genannten Fragen nach Belastungen von Netzquerschnitten beantworten. Bei entsprechender Modellierung im Netzmodell können auch Teilsummen der Belastungen gebildet werden um Fragen nach Linien- oder Haltestellenbelastungen zu beantworten. Außerdem bestehen nun Datengrundlagen um Auswertungen zur Qualität des Gesamtnetzes z.B. hinsichtlich Umsteigehäufigkeit, mittlere Reisegeschwindigkeit oder mittlere Umsteigewartezeit durchzuführen.

3.3.5 Eigenständigkeit der Verbindungen

Alle ermittelten Verbindungen, charakterisiert durch ihren Widerstand, werden bei Anwendung der gebräuchlichen Aufteilungsmodelle für ÖPNV-Netze grundsätzlich unabhängig voneinander behandelt. Effekte, die zu Wechselwirkungen der Verbindungen untereinander führen, werden nicht berücksichtigt. Es kann jedoch zu Fehlern führen, diese Effekte nicht zu berücksichtigen. Dies soll an folgendem Beispiel kurz aufgezeigt werden: Es bestehen zwischen zwei Verkehrszellen drei Verbindungen gleichen Widerstandes, die binnen einer Stunde zu den Minuten 00, 20 und 40 beginnen. Durch den identischen Widerstand wird der Fahrgaststrom von allen

Aufteilungsmodellen zu gleichen Teilen auf die drei Verbindungen aufgeteilt. Existiert nun eine vierte Verbindung, ebenfalls gleichen Widerstandes, die gleichzeitig mit der zweiten Verbindung zur Minute 20 besteht, wird wiederum unter allen nun vier Fahrten gleichmäßig aufgeteilt. Diese Annahme ist unrealistisch, da die Fahrgäste nicht durch das bloße gleichzeitige Abfahren zweier Busse zur Minute 20 zu dieser Zeit mit doppelter Häufigkeit einsteigen werden.

Durch die Definition der Eigenständigkeit wird dieses Problem in der Aufteilung berücksichtigt. Dazu werden die Verbindungen auf Ähnlichkeit hin untersucht. Zunächst wird eine Funktion $w_i(j)$ definiert, die den Einfluss einer Verbindung j auf die Verbindung i beschreibt:[24]

$$w_i(j) = \left(1 - \frac{x_i(j)}{s_x}\right) + \left(1 - c \cdot \min\left\{1, \frac{|y_i(j)|}{s_y}\right\}\right)$$

mit $$x_i(j) = \frac{|\text{Abfahrt } j - \text{Abfahrt } i| + |\text{Ankunft } j - \text{Ankunft } i|}{2}$$

$$y_i(j) = \text{Empf. Reisezeit } j - \text{Empf. Reisezeit } i$$

$c \in [0,1]$ Einflussparameter der Empfundenen Reisezeit[25]

$s_x = 2 \cdot$ mittlere Wartezeit eines zufällig zugehenden Fahrgastes zwischen der ersten und der letzten Abfahrt

$$s_y = \begin{cases} d_1 \cdot \text{DERZ} & \text{falls } y_i \geq 0 \\ d_2 \cdot \text{DERZ} & \text{falls } y_i < 0 \end{cases}$$

DERZ = Durchschnittliche Empfundene Reisezeit[25] im Umlegungszeitraum

Die Größen c, d_1 und d_2 dienen zur Parametrierung und sind manuell vor der Berechnung festzulegen. Nach der Berechung von $w_i(j)$ jeder Verbindung i mit jeder Verbindung j werden alle Verbindungen i durch einen Parameter der Eigenständigkeit EIG_i charakterisiert. Er ergibt sich aus den Einflüssen aller Verbindungen j auf die Verbindung i:

$$EIG_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^{n} w_i(j)}$$

[24] Vgl. PTV AG, VISUM Benutzerhandbuch (2006), S. 2-141 ff.
[25] Die Empfundene Reisezeit entspricht in VISUM dem Widerstand einer Verbindung ohne Berücksichtigung des Fahrpreises und der zeitlichen Lage der Verbindung (siehe dazu auch Kapitel 3.3.3)

Da auch jede Verbindung mit sich selbst verglichen wird, ergibt sich bei vollständiger Unabhängigkeit von anderen Verbindungen für die Eigenständigkeit ein Wert von $EIG_i = 1$. Für Verbindungen mit Abhängigkeiten zu anderen Verbindungen ergibt sich ein Wert $0 < EIG_i < 1$. Bei k identischen Verbindungen i ergibt sich gemäß Definition ein Wert der Eigenständigkeit von $EIG_{i...k} = 1 / k$. Um nun eine um die Eigenständigkeit korrigierte Aufteilung des Fahrgaststroms unter allen Verbindungen durchführen zu können, wird der Anteil aus dem Aufteilungsmodell U_i mit dem Parameter der Eigenständigkeit EIG_i multipliziert. Der Anteil p_i einer Verbindung i unter Berücksichtigung der Eigenständigkeit ergibt sich wie folgt:

$$p_i = \frac{U_i \cdot EIG_i}{\sum_{j=1}^{n} U_j \cdot EIG_j}$$

Am eingangs betrachteten Beispiel ergibt sich nach Anwendung der Eigenständigkeit eine Belastung der Verbindungen zu den Minuten 00 und 40 mit jeweils 1/3 des Fahrgaststromes, die zwei gleichzeitigen Verbindungen zur Minute 20 werden mit jeweils 1/6 des Fahrgaststromes belastet. Dies führt zu dem gewünschten Ergebnis, dass nun bei angenommenem gleichverteilten Zugang der Fahrgäste eine korrekte Aufteilung im Modell erfolgt.

3.3.6 Bewertung und Einsatz des Verfahrens

Das fahrplanfeine Verfahren wird auf Grund des hohen Detaillierungsgrades im Modell voraussichtlich die besten Ergebnisse im Vergleich mit den anderen beiden Verfahren liefern. Bei der Berechnung wird jede Fahrplanfahrt einzeln berücksichtigt. Voraussetzung zur Anwendung ist, dass genaue Fahrplandaten aller Verkehrslinien vollständig vorliegen. Da heute bei den meisten Verkehrsbetrieben aktuelle Fahrplandaten in digitaler Form vorgehalten werden, ist eine Berücksichtigung bei der Umlegung mit geringem Aufwand möglich. Daher ist das fahrplanfeine Verfahren unter dieser Voraussetzung den anderen, zuvor vorgestellten Verfahren überlegen.

Bei den Untersuchungen in dieser Arbeit ist insbesondere festzustellen, wie sich die Rechenzeiten von fahrplanfeinem und taktfeinem Verfahren verhalten. Stellt sich heraus, dass das taktfeine Verfahren auf Grund seiner geringeren Detaillierung erheblich schneller als das fahrplanfeine Verfahren durchzuführen ist, ist im Einzelfall abzuwägen, ob es bei bestimmten Anforderungen an eine Umlegung doch dem fahrplanfeinen Verfahren vorzuziehen ist.

Besonders geeignet ist das fahrplanfeine Verfahren demnach für Planungsprojekte, in denen ein Fahrplan für das Bestandsnetz vorliegt und die Wirkung für einen Planfall mit Veränderungen einzelner Linien festgestellt werden soll. Außerdem ist es zweckmäßig

für Projekte, in denen ein Fahrplan für einen Planfall bereits vollständig ausgearbeitet vorliegt. Denkbar ist auch die Kombination beider Verfahren in einem Projekt. Das taktfeine Verfahren kann im ersten Schritt der Vorplanung für mehrere Planfälle eingesetzt werden um mit geringem Modellierungsaufwand eine Abschätzung der Netzbelastung zu erhalten, um die beste Variante wählen zu können. Anschließend kann das fahrplanfeine Verfahren für eine ausgewählte und im Detail ausgearbeitete Variante angewendet werden, um eine genaue Umlegung für die Feinplanung zu erhalten.

4 Aufteilungsmodelle für die fahrplanfeine Umlegung

Die Aufteilungsmodelle spielen bei einer Umlegung neben der Ermittlung des Widerstandes der Verbindungen die bedeutendste Rolle. Sie bestimmen, welche Verbindungen einen hohen bzw. geringen Anteil am Fahrgaststrom zwischen zwei Verkehrszellen erhalten. Dabei gilt es, die Empfindlichkeit bzw. das Verhalten der Fahrgäste bei der Entscheidung für attraktive oder weniger attraktive Verbindungen möglichst realistisch abzubilden. Das Aufteilungsmodell liefert in Abhängigkeit des Widerstandes einer Verbindung den empfundenen Nutzen der Fahrgäste. Dieser Nutzen wirkt sich unmittelbar proportional auf die Aufteilung des Fahrgaststromes aus (siehe Kapitel 3.3.4). „Die Aufteilungsregeln gehen von der Annahme aus, dass zwischen den Widerständen […] der Wege (Anm. d. Autors: gemeint Routen) und der Wahrscheinlichkeit ihrer Benutzung ein unmittelbarer Zusammenhang besteht.“[26] Dieser Zusammenhang wird durch eine mathematische Funktion beschrieben.

Im Folgenden werden verschiedene, für den ÖPNV besonders relevante Funktionen beschrieben, analysiert und abschließend miteinander verglichen und bewertet.

4.1 Kirchhoff

Das Kirchhoff-Modell bildet den einfachsten Ansatz zur Aufteilung von Fahrgaststrømen auf Verbindungen mit verschiedenen Widerständen. Es ist analog zum Kirchhoff'schen Gesetz der Elektrotechnik aufgebaut, welches beschreibt, wie sich elektrischer Strom in einem Netzwerk von elektrischen Widerständen aufteilt. Die Bewertungsfunktion des Nutzens U_i einer Verkehrsverbindung i in Abhängigkeit ihres Widerstandes WID_i lautet:

$$U_i = (WID_i)^{\beta}$$

Für den Anteil p_i einer Verbindung i am Gesamtstrom ergibt sich:

$$p_i = \frac{(WID_i)^{-\beta}}{\sum_{j=1}^{n} (WID_j)^{-\beta}}$$

In der Elektrotechnik ist der Parameter $\beta = 1$. Es gilt die Maschenregel nach Kirchhoff: „In jedem in sich geschlossenen Stromkreis im Leiternetz verhalten sich die Stromstärken umgekehrt proportional zu den Widerständen.“[27] Bei der Anwendung in der Verkehrswissenschaft muss dieser Parameter β modifiziert werden. „Wenn daher bei einer Anwendung der Kirchhoff'schen Regeln auf die Straßenverkehrstechnik $\beta \neq 1$ gesetzt wird, so geschieht diese Modifizierung einerseits, um derartige netzspezifische

[26] Schnabel, W.; Lohse, D. (1997), S. 294
[27] Ueberschaer, M. (1969), S. 22

Faktoren zu erfassen, andererseits, um das andersgeartete Verhalten der Menschen in einem Straßenverkehrsnetz gegenüber den Elektronen in einem Leitersystem auszudrücken."[28]

Zur besseren Analyse dieses Zusammenhanges wird die Funktion am Beispiel von zwei Verbindungen in Abhängigkeit ihres Widerstandsverhältnisses WID_2/WID_1 als Kurvenschar für unterschiedliche Werte des Parameters β dargestellt:

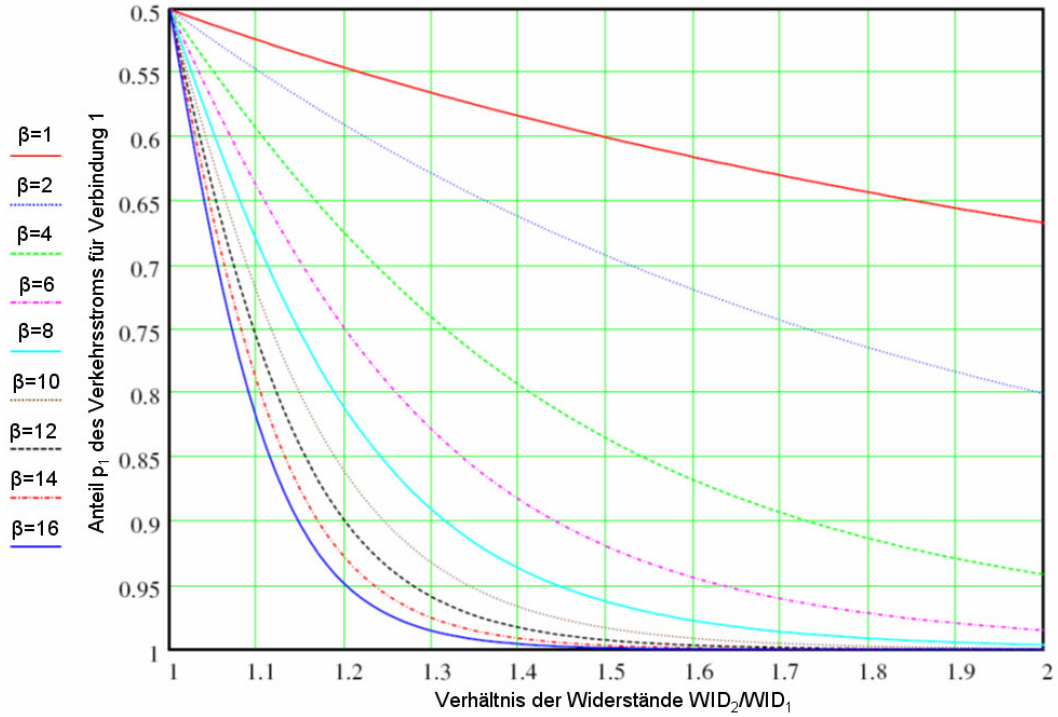


Abbildung 3: Verkehrsaufteilung auf zwei Verbindungen mit der Kirchhoff-Funktion in Abhängigkeit des Quotienten ihrer Widerstände (eigene Darstellung)

Die Sensitivität der Fahrgäste gegenüber Verbindungen mit höherem Widerstand wird im Diagramm durch die Steigung repräsentiert. Sie ist bei allen Kurven negativ, je größer ihr Betrag ist, desto größer ist auch die Sensitivität der Fahrgäste. Es ist zu erkennen, dass mit steigendem Parameter β eine größere Sensitivität der Fahrgäste eintritt. D.h. mit einem großen Wert für β wird eine hohe Empfindlichkeit der Fahrgäste gegenüber unattraktiveren Verbindungen zum Ausdruck gebracht. Bei einem Parameter von β = 2 wird eine Verbindung mit 1,5-fachem Widerstand noch mit 31% des Verkehrsstromes belastet, bei β = 8 tritt eine Belastung von 4% auf. Bei kleinen Werten für β werden von den meisten Fahrgästen also große Widerstandsunterschiede ohne Reaktion in Kauf genommen. Auf Basis von empirischen Untersuchungen empfehlen Schnabel und Lohse[29] für Stadtstraßennetze Werte von β = 6 bis 8 und für Landstraßennetze von β = 12 bis 16. In der Realität ist offenbar zu beobachten, dass die Empfind-

[28] Ueberschaer, M. (1969), S. 45
[29] Vgl. Schnabel, W.; Lohse, D. (1997), S. 295

lichkeit bei langen Strecken und großen absoluten Widerstandsdifferenzen höher ist als bei kurzen Strecken mit geringeren absoluten Widerstandsdifferenzen.

Daraus ergibt sich das Problem, dass der Parameter β je nach Entfernung der betrachteten Verkehrszellen angepasst werden muss, um gute Ergebnisse zu erhalten. Eine allgemeingültige Parametrierung, die unabhängig von der Entfernung der Verkehrszellen gute Ergebnisse liefert, ist nicht möglich[30]. Das Problem resultiert daraus, dass bei der Kirchhoff-Funktion für die Aufteilung allein das Verhältnis der Widerstände zueinander ausschlaggebend ist. Daher erfolgt (unter der vereinfachten Annahme Widerstand = Reisezeit) bei zwei Strecken von 40 und 80 Minuten die gleiche Aufteilung des Fahrgaststromes wie bei zwei Strecken von vier und acht Minuten Länge. Dies ist unrealistisch, da ein Fahrgast eine Zeitdifferenz von vier Minuten eher ignoriert als einen Zeitunterschied von 40 Minuten. Die Auswirkungen dieses Problems können etwas reduziert werden, indem bei der Vorauswahl der Verbindungen (vgl. Kapitel 3.3.2) sehr straffe Kriterien gesetzt werden, um Verbindungen mit großem Verhältnis der Widerstände sofort zu verwerfen und in die Belastung mit der Kirchhoff-Funktion gar nicht mit einzubeziehen.

Alternativ dazu werden weitere Modelle vorgestellt, bei denen dieses Problem gar nicht oder nur in eingeschränkter Form auftritt.

4.2 Logit

Das Logit-Modell basiert auf einer stochastischen Wahrscheinlichkeitsverteilung, der sog. Gumbel-Verteilung. Damit wird zum Ausdruck gebracht, dass verschiedene Personen einer Fahrgastgruppe den Nutzen verschiedener Verbindungen subjektiv leicht unterschiedlich einschätzen. Subjektiv betrachtet wählt jede Person zwar den für sich besten Weg mit dem geringsten Widerstand, objektiv gesehen tritt aber auf Grund der unterschiedlichen Einschätzungen eine Streuung um den Weg des geringsten Widerstandes ein.[31] Eine genaue Herleitung des Logit-Modells ist z.B. bei Wermuth[32] zu finden.

Durch die stochastische Streuung kommt es im Gegensatz zum Kirchhoff-Modell nicht auf das Verhältnis der Widerstände zueinander an, sondern auf ihre Differenz. In der stochastischen Verteilung wird der absolute Abstand der Widerstände zueinander berücksichtigt, ihre absolute Größe ist unrelevant. Damit wird dem Problem bei Kirchhoff begegnet, dass bei kurzen Wegen bereits sehr kurze Umwege stark ins Gewicht fallen. Der mathematische Ansatz für den Nutzen U_i in Abhängigkeit vom Widerstand WID_i im Logit-Modell lautet[33]:

[30] Vgl. Schnabel, W.; Lohse, D. (1997), S. 296 f.
[31] Vgl. Friedrich, M. (2003): Verkehrsplanung I
[32] Vgl. Wermuth, M. (1994)
[33] Vgl. PTV AG, VISUM Benutzerhandbuch (2006), S. 2-137 f.

$$U_i = e^{-\beta \cdot WID_i}$$

Damit ergibt sich für den Anteil p_i einer Verbindung i am Gesamtstrom:

$$p_i = \frac{e^{-\beta \cdot WID_i}}{\sum_{j=1}^{n} e^{-\beta \cdot WID_i}}$$

Durch die Bildung des Quotienten der Exponentialfunktionen ist nun die Differenz der Widerstände maßgebend. Zur besseren Analyse dieses Zusammenhanges wird die Funktion am Beispiel von zwei Verbindungen in Abhängigkeit der Differenz ihrer Widerstände $WID_2 - WID_1$ als Kurvenschar für unterschiedliche Werte des Parameters β dargestellt:

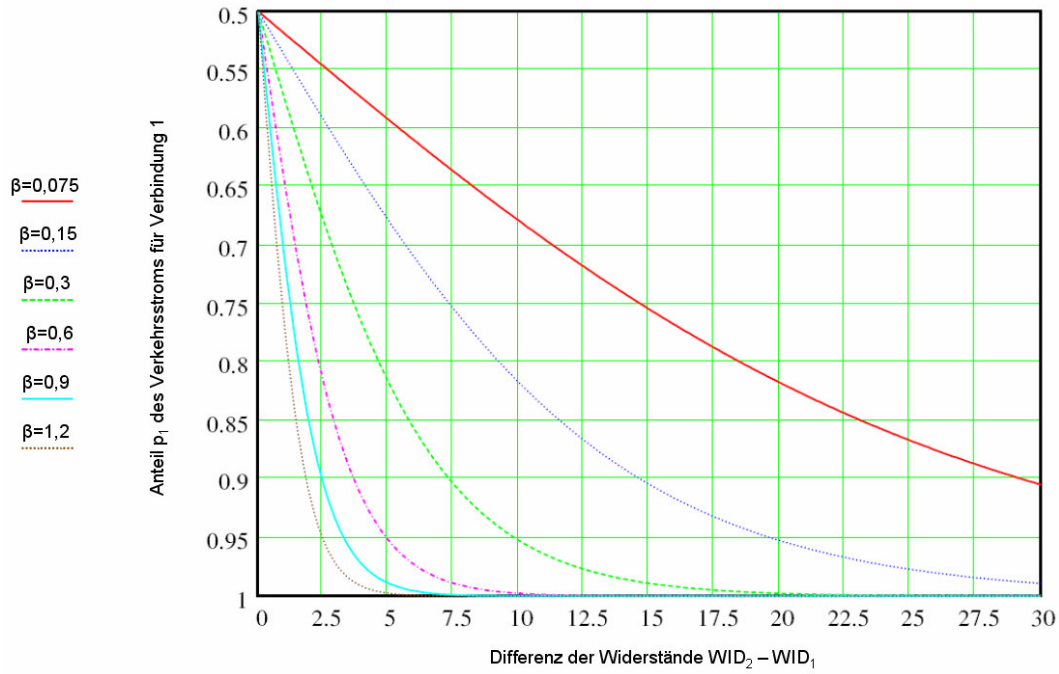


Abbildung 4: Verkehrsaufteilung auf zwei Verbindungen mit der Logit-Funktion in Abhängigkeit der Differenz ihrer Widerstände (eigene Darstellung)

In Abbildung 4 ist zu erkennen, wie die beispielhafte Aufteilung eines Verkehrsstromes auf zwei Verbindungen in Abhängigkeit der Differenz ihrer Widerstände für verschiedene Werte des Parameters β erfolgt. Dabei ist es beim Logit-Modell unerheblich für die Aufteilung, ob zwei Verbindungen mit den Widerständen fünf und zehn oder 95 und 100 betrachtet werden. Mit steigendem Wert des Parameters β nimmt die Sensitivität der Fahrgäste gegenüber Verbindungen mit größeren Widerständen zu, d.h. gute Verbindungen werden von den Fahrgästen stärker benutzt. Im Gegensatz zum Kirchhoff-Modell ist aber nun die Aufteilung in Abhängigkeit des Verhältnisses der Widerstände je nach Größe der absoluten Widerstände unterschiedlich. Dies soll an den folgenden beiden Funktionsgraphen veranschaulicht werden:

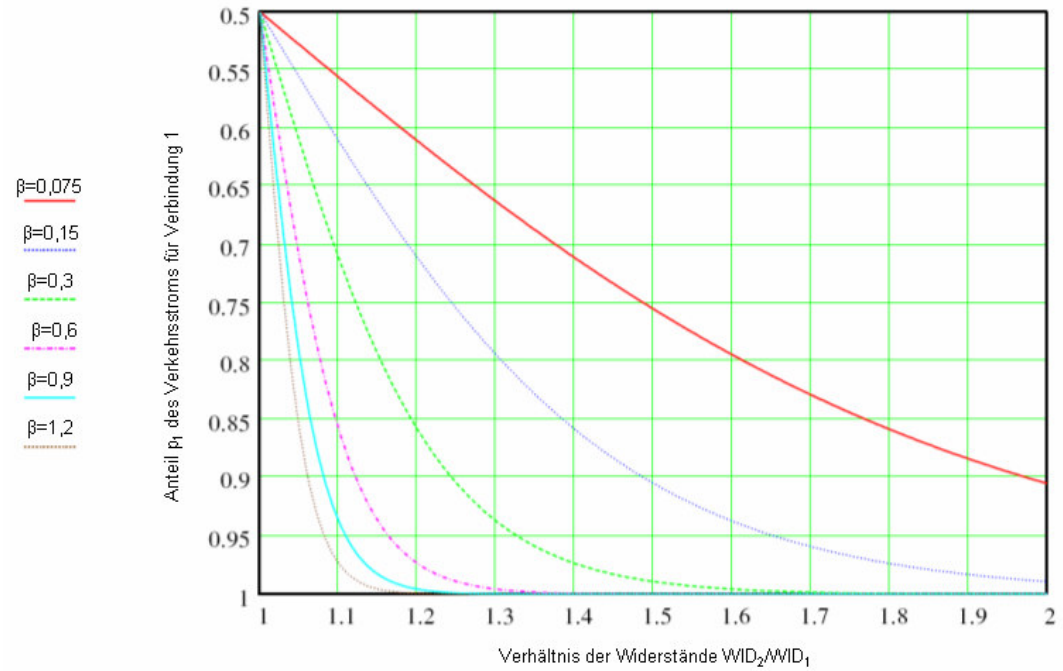


Abbildung 5: Verkehrsaufteilung auf zwei Verbindungen mit der Logit-Funktion in Abhängigkeit des Quotienten ihrer Widerstände für **WID_1 = 30** (eigene Darstellung)

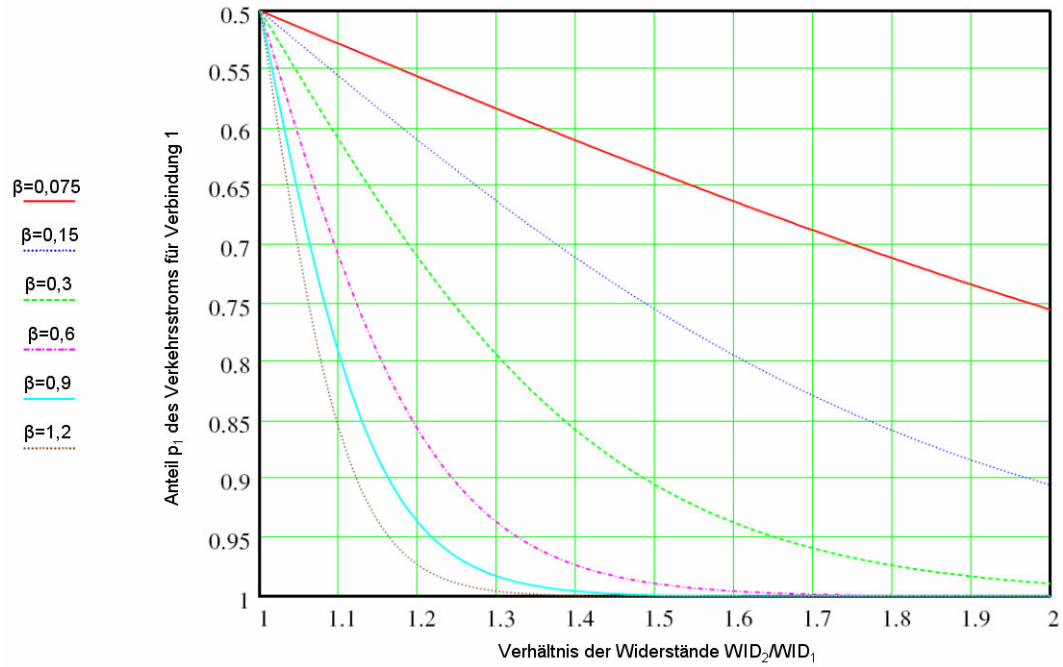


Abbildung 6: Verkehrsaufteilung auf zwei Verbindungen mit der Logit-Funktion in Abhängigkeit des Quotienten ihrer Widerstände für **WID_1 = 15** (eigene Darstellung)

An der Kurve für den kleinsten Wert des Parameters β = 0,075 ist besonders gut zu erkennen, dass bei einer Halbierung der Absolut-Werte für die Widerstände, die Sensitivität der Fahrgäste für Umwege bei kleinen absoluten Widerständen (Abbildung 6) erheblich geringer ist als bei größeren absoluten Widerständen (Abbildung 5). Dies erscheint realistischer als das Verhalten im Kirchhoff-Modell. In ersterem Fall

entscheiden sich bei einem Widerstandsverhältnis von 2 rund 90% der Fahrgäste für den kurzen Weg, in letzterem Fall, bei einem Widerstandsverhältnis von ebenfalls 2, entscheiden sich jedoch nur drei Viertel für den kurzen Weg – immerhin 25% wählen den doppelt so langen Umweg.

Damit bilden die Aufteilungsmodelle Kirchhoff und Logit zwei Extremfälle. Bei Kirchhoff ist nur das Verhältnis der Widerstände zueinander bedeutend, bei Logit hingegen nur ihre Differenz. Beide Verhaltensweisen scheinen zur Aufteilung von Fahrgastströmen nicht optimal. Daher wird mit Hilfe der Box-Cox-Transformation versucht, beide Charakteristiken miteinander zu kombinieren, um sich einem optimalen Verhalten weiter anzunähern, da die Fahrgäste in der Realität ein differenzierteres Wahlverhalten zeigen.

4.3 Box-Cox

Bei dem Box-Cox-Modell handelt es sich um eine Kombination von Kirchhoff-Modell und Logit-Modell. Die Verbindung dieser beiden Modelle wird durch Anwendung der Box-Cox-Transformation, einem mathematischen Standard-Modell aus der Statistik, erreicht. Sie ist definiert als:

$$b^{(\tau)}(x) = \begin{cases} \dfrac{x^{\tau} - 1}{\tau} & \text{für} \quad \tau \neq 0 \\ \log(x) & \text{für} \quad \tau = 0 \end{cases}$$

Diese Transformation wird nun auf den Widerstand WID_i im Logit-Modell angewandt, für den Nutzen U_i einer Verbindung i erhält man damit[34]:

$$U_i = e^{-\beta \cdot b^{(\tau)}(WID_i)}$$

Der Nutzen ist damit neben dem Parameter β zusätzlich abhängig vom Transformationsparameter τ. Durch die Anwendung der Box-Cox-Transformation ist eine zusätzliche Möglichkeit gegeben, das Aufteilungsmodell genauer an das tatsächliche Verhalten der Fahrgäste anzupassen. Für die Aufteilung von Fahrgastströmen kann damit eine höhere Qualität erreicht werden.

Für den Anteil p_i einer Verbindung i am Gesamtstrom ergibt sich:

$$p_i = \frac{e^{-\beta \cdot b^{(\tau)}(WID_i)}}{\sum_{j=1}^{n} e^{-\beta \cdot b^{(\tau)}(WID_j)}}$$

Der Einfluss des Transformationsparameters τ soll zunächst anhand zweier Sonderfälle betrachtet werden:

► Für $\tau = 1$ ergibt sich eine mit dem Logit-Modell identische Aufteilung.

► Für $\tau = 0$ ergibt sich eine mit dem Kirchhoff-Modell identische Aufteilung.

Im Intervall $0 < \tau < 1$ erfolgt eine Aufteilung die zwischen denen des Kirchhoff- und Logit-Modells liegt. Dies soll im folgenden Funktionsgraphen veranschaulicht werden. Der Parameter β bleibt zunächst unverändert (konstant = 1), da er für die einzelnen Modelle Logit und Kirchhoff (siehe Kapitel 4.1 und 4.2) bereits eingehend betrachtet wurde.

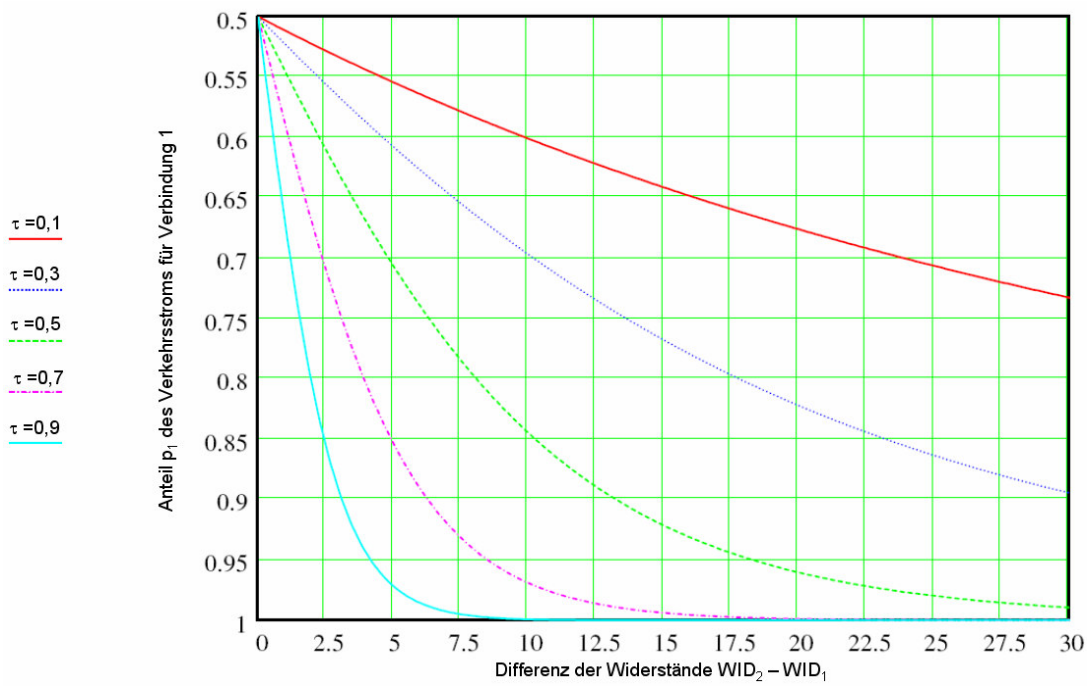


Abbildung 7: Verkehrsaufteilung auf zwei Verbindungen mit dem Box-Cox-Modell in Abhängigkeit des Quotienten ihrer Widerstände für **$WID_1 = 30$** und $\beta = 1$ (eigene Darstellung)

Für kleine Werte (nahe null) des Transformationsparameters τ nähert sich das Verhalten der Funktion jenem des Kirchhoff-Modells an, d.h. das Aufteilungsverhältnis ist vom Verhältnis der Widerstände zueinander bestimmt. Für große Werte (nahe eins) erfolgt eine Annäherung an das Logit-Modell, nun ist die Differenz bestimmend für die Aufteilung. Dazwischen erfolgt eine Kombination beider Modelle. Dies soll durch einen Vergleich mit dem Funktionsgraphen bei verdoppelten absoluten Widerständen (konstantes Verhältnis) gezeigt werden.

[34] Vgl. PTV AG, VISUM Benutzerhandbuch (2006), S. 2-138 f.

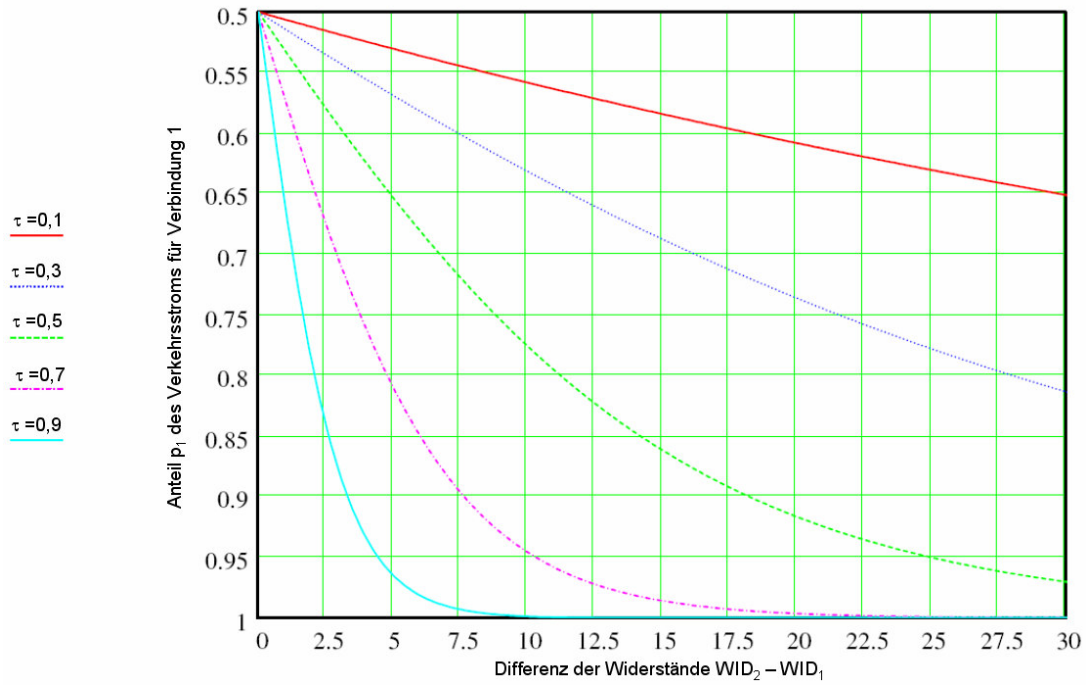


Abbildung 8: Verkehrsaufteilung auf zwei Verbindungen mit dem Box-Cox-Modell in Abhängigkeit des Quotienten ihrer Widerstände für **$WID_1 = 60$** und $\beta = 1$ (eigene Darstellung)

Für die unterschiedlichen Kurven lässt sich erkennen, dass für große Werte für τ (nahe eins) nur sehr geringe Unterschiede bei einer Änderung der absoluten Höhe der Widerstände (Abbildung 7) eintreten. Dies entspricht genau der Charakteristik der Logit-Funktion. Am anderen Rand (τ nahe null) ist der Unterschied dagegen signifikant. Dies entspricht wiederum dem Verhalten der Kirchhoff-Funktion.

Das Logit-Modell kann dementsprechend der Theorie nach eingesetzt werden, um grundsätzlich das Verbindungswahlverhalten in Abhängigkeit der Differenz der Widerstände abzubilden. Zusätzlich kann aber berücksichtigt werden, dass ein gewisser Umweg bei langen Wegen weniger stark ins Gewicht fällt als bei kurzen Wegen. Ein mittelgroßer Wert für τ scheint dabei angemessen. Zusätzlich kann dabei über den Parameter β die Empfindlichkeit der Fahrgäste gesteuert werden, um das reale Verhalten möglichst gut im Modell abzubilden. Zur Ermittlung geeigneter Dimensionierungen der beiden Parameter werden in Kapitel 5 empirische Untersuchungen durchgeführt.

4.4 Lohse

Das Modell nach Lohse verfolgt im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Modellen einen anderen Ansatz. Der Widerstand jeder Verbindung wird zum Widerstand der besten Verbindung, jener mit dem geringsten Widerstand, ins Verhältnis gesetzt. Somit erfolgt in diesem Aufteilungsmodell eine Bewertung der relativen Abweichung vom Optimum. Im Lohse-Modell ist der Nutzen U_i einer Verbindung i definiert als:

$$U_i = e^{-\left[\beta\left(\frac{WID_i}{WID_{min}}-1\right)\right]^2}$$

Der Parameter β dient zur Modellierung der Widerstandssensitivität der Fahrgäste. Für den Anteil p_i einer Verbindung i am Gesamtstrom ergibt sich:

$$p_i = \frac{e^{-\left[\beta\left(\frac{WID_i}{WID_{min}}-1\right)\right]^2}}{\sum_{j=1}^{n} e^{-\left[\beta\left(\frac{WID_i}{WID_{min}}-1\right)\right]^2}}$$

Zusätzlich zur Betrachtung der relativen Abweichung zur widerstandsminimalen Verbindung fällt auf, dass der Exponent quadriert wird. Ohne diese Quadrierung entstünde der Nachteil, „dass bei nur geringen Widerstandsabweichungen vom alternativen Weg schon relativ große Änderungen des Verkehrsanteils auftreten. Tatsächlich haben geringe Widerstandsunterschiede nur eine schwache Auswirkung auf die Verkehrsaufteilung. Die [...] Aufteilungsregel vermeidet diesen Nachteil, da sie bei sehr geringen Widerstandsverhältnissen der alternativen Route einen nahezu horizontalen Verlauf der Kurve aufweist.“[35] Da der Parameter β ebenfalls quadriert wird, ist bei der Wahl eines Wertes zu beachten, dass dies kompensiert werden muss. Um beispielhaft einen Vergleich zum Kirchhoff-Modell zu ermöglichen, muss für β jeweils die Wurzel der bei Kirchhoff verwendeten Werte eingesetzt werden, um ähnlich steile Kurvenverläufe zu erhalten.

[35] Schnabel, W.; Lohse, D. (1997), S. 296

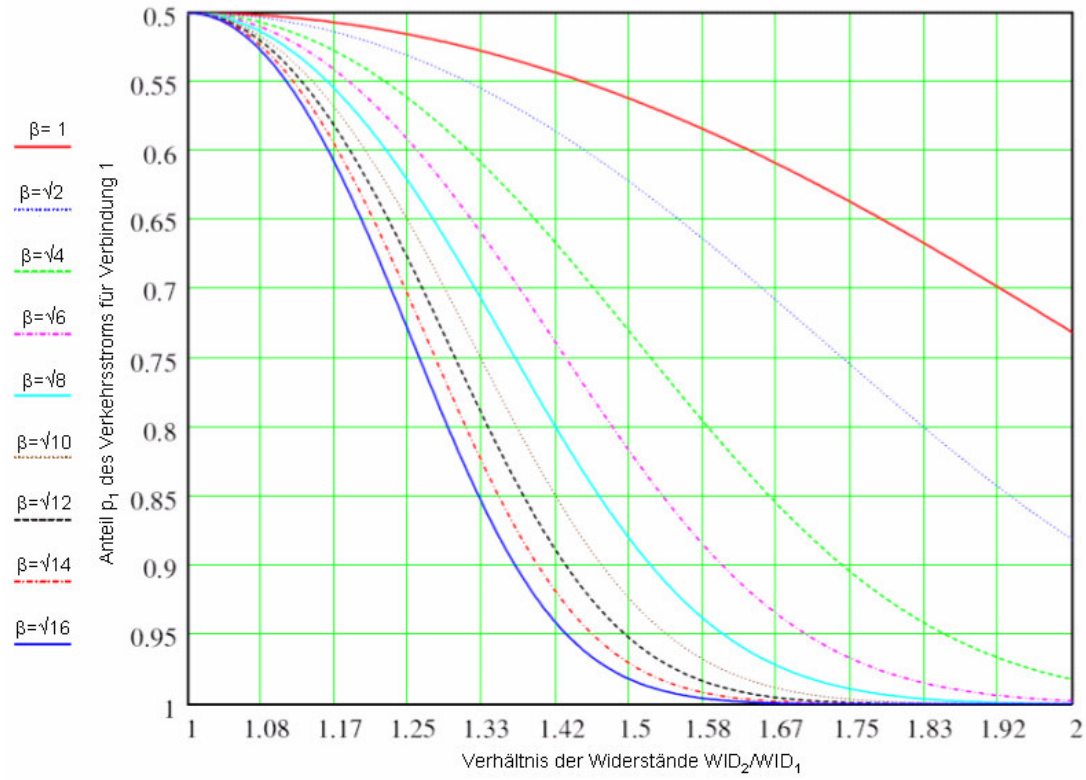


Abbildung 9: Verkehrsaufteilung auf zwei Verbindungen mit dem Lohse-Modell in Abhängigkeit des Quotienten ihrer Widerstände für $\mathbf{WID_1 = WID_{min} = 30}$ (eigene Darstellung)

In Abbildung 9 ist im Vergleich zu Abbildung 2 (Kirchhoff-Modell) gut zu erkennen, dass die Sensitivität der Fahrgäste, dargestellt durch den Betrag der Steigung, im Bereich der kleinen Verhältnisse nahe eins und der großen Verhältnisse nahe 1,5 erheblich kleiner ist als im mittleren Bereich dazwischen. Es wird damit im Modell abgebildet, dass kleine Umwege eher akzeptiert werden als mittelgroße Umwege. Außerdem ist es bei ohnehin großen Umwegen zweitrangig, ob diese etwas größer oder etwas kleiner ausfallen. Bewertet man diese grundlegende Überlegung, ist das Lohse-Modell geeignet, um im Modell eine realitätsnahe Abbildung zu schaffen.

4.5 Vergleich der Aufteilungsmodelle

Die in den Kapiteln 4.1 bis 4.4 beschriebenen Aufteilungsmodelle Kirchhoff, Logit, Box-Cox und Lohse werden zunächst kurz zusammengefasst und anschließend miteinander verglichen. Hierzu werden an ausgewählten Beispielen Aufteilungen nach den vier Modellen gegenübergestellt und bewertet.

- **Kirchhoff:** Die Aufteilung erfolgt nach dem Verhältnis der Verbindungswiderstände zueinander. Es besteht das Problem, dass bei sehr kurzen Verbindungen bereits kleine Umwege sehr stark ins Gewicht fallen.

- **Logit:** Die Aufteilung erfolgt nach der Differenz der Verbindungswiderstände. Die Aufteilung ist bei kurzen und langen Verbindungen gleich, obwohl Fahrgäste in der Realität ein differenziertes Wahlverhalten zeigen.
- **Box-Cox:** Die Charakteristika von Kirchhoff und Logit werden durch Box-Cox-Transformation miteinander kombiniert. Durch den Transformationsparameter τ kann beeinflusst werden, ob die Kirchhoff- oder Logit-Charakteristik stärkeren Einfluss nimmt.
- **Lohse:** Die Aufteilung erfolgt nach der relativen Abweichung vom Optimum. Durch zusätzliche Quadrierung des Exponenten wird ein realistischeres Verhalten bei kleinen und großen Umwegen erreicht.

An mehreren ausgewählten, sehr einfachen Beispielen soll die Wirkung dieser vier Modelle verdeutlicht und verglichen werden. Ein Fahrgaststrom wird hierzu immer auf zwei Verbindungen unterschiedlichen Widerstandes aufgeteilt. Für die Parameter der einzelnen Aufteilungsmodelle werden beispielhaft Werte angenommen, die Tabelle 15 in Anhang A entnommen werden können:

i	WID_i	p_i Kirchhoff	p_i Logit	p_i Box-Cox	p_i Lohse
1	**5**	**0,98**	**0,82**	**0,86**	**1,00**
2	**10**	**0,02**	**0,18**	**0,14**	**0,00**

Tabelle 3: Aufteilungsmodelle Beispiel I (Parametrierung siehe Anhang A)

i	WID_i	p_i Kirchhoff	p_i Logit	p_i Box-Cox	p_i Lohse
1	**50**	**0,98**	**1,00**	**1,00**	**1,00**
2	**100**	**0,02**	**0,00**	**0,00**	**0,00**

Tabelle 4: Aufteilungsmodelle Beispiel II (Parametrierung siehe Anhang A)

Zunächst kann festgestellt werden, dass nach Kirchhoff in beiden Beispielen eine identische Aufteilung erfolgt. Das Verhältnis der Widerstände beträgt in beiden Fällen 2. Im Beispiel II kann davon ausgegangen werden, dass kein Fahrgast die längere Verbindung wählt und mit Kirchhoff ein leicht verfälschtes Ergebnis entsteht. Alle anderen Modelle erfüllen diese Annahme jedoch. Im Beispiel I ist anzunehmen, dass ein (geringerer) Teil der Fahrgäste auf Grund der geringen Differenz von fünf trotzdem die ungünstigere Verbindung wählt. Hier liefern besonders Logit und Box-Cox ein gutes Ergebnis. Es soll ein drittes Beispiel betrachtet werden:

i	WID_i	p_i Kirchhoff	p_i Logit	p_i Box-Cox	p_i Lohse
1	**105**	**0,57**	**0,82**	**0,62**	**0,50**
2	**110**	**0,43**	**0,18**	**0,38**	**0,50**

Tabelle 5: Aufteilungsmodelle Beispiel III (Parametrierung siehe Anhang A)

Es handelt sich nun um zwei lange Verbindungen mit geringer Differenz. Es ist anzunehmen, dass sich die Fahrgäste hier auf beide Verbindungen annähernd gleichmäßig aufteilen mit Tendenz zur kürzeren Verbindung. Da die Differenz gleich jener in Beispiel I ist, liefert Logit das gleiche Ergebnis, welches jedoch die etwas längere Variante unangemessen stark benachteiligt. Kirchhoff und Box-Cox liefern hier gute Ergebnisse. Um die Aussagen weiter präzisieren zu können, insbesondere zum Lohse-Modell, sollen abschließend zwei weitere Beispiele betrachtet werden:

i	WID_i	p_i Kirchhoff	p_i Logit	p_i Box-Cox	p_i Lohse
1	20	0,92	0,95	0,88	0,82
2	30	0,08	0,05	0,12	0,18

Tabelle 6: Aufteilungsmodelle Beispiel IV (Parametrierung siehe Anhang A)

i	WID_i	p_i Kirchhoff	p_i Logit	p_i Box-Cox	p_i Lohse
1	120	0,62	0,95	0,71	0,51
2	130	0,38	0,05	0,29	0,49

Tabelle 7: Aufteilungsmodelle Beispiel V (Parametrierung siehe Anhang A)

Im Beispiel IV liegen alle Ergebnisse dicht beieinander und sind zufrieden stellend. Lohse zeigt erstmals von einer Extrem- oder Gleichverteilung abweichende Werte. Ob sich in Beispiel V in der Realität eher eine annähernde Gleichverteilung (Lohse) oder eine deutliche Tendenz zu einer Verbindung (Kirchhoff, Box-Cox) besteht, ist hier nicht abschätzbar. Die Logit-Aufteilung ist stark auf die etwas kürzere Verbindung ausgerichtet.

Resümierend kann die Hypothese aufgestellt werden, dass die Aufteilungsmodelle Box-Cox und Lohse für ein nicht näher spezifiziertes Verkehrsnetz die besten Ergebnisse liefern. Die Modelle Kirchhoff und Logit sind in einigen Fällen unterlegen und werden zu einem Gesamtergebnis geringerer Qualität führen. Die Überprüfung dieser Hypothese und eine detaillierte Untersuchung für verschiedene Parameter der Aufteilungsmodelle ist Bestandteil des Kapitels 5.

5 Wirkungsanalyse in Referenznetzen

5.1 Vorgehen

Zur Analyse der Wirkung von verschiedenen Umlegungsverfahren und unterschiedlichen Parametrierungen werden diese mit Hilfe der Verkehrsplanungs- und -analysesoftware VISUM der PTV AG auf zwei Referenznetze verschiedener Struktur angewandt und ausgewertet. Diese Software bietet die Möglichkeit alle Aufgaben des Prozesses der Verkehrsumlegung von der Netzerstellung bis zur Ergebnisanalyse vollständig durchzuführen. Die Datengrundlage bilden fertig modellierte VISUM-Netze, sie bestehen aus Strecken, Knoten und Verkehrszellen und enthalten darüber hinaus auch das Angebot aller ÖPNV-Systeme in Form von Linienwegen und Fahrplandaten. Die Nachfrage wird in Form von Quell-Ziel-Matrizen in VISUM eingelesen. Auf dieser Datengrundlage bietet das Programm die Möglichkeit, Routen zwischen Verkehrszellen zu suchen und die Fahrgastströme auf diese Routen mit unterschiedlichen Methoden umzulegen. Außerdem sind umfangreiche grafische, tabellarische und statistische Auswertungsmöglichkeiten in die Software implementiert. Näheres zu den verwendeten Softwareversionen ist in Anhang G zu finden.

Zunächst wird in Kapitel 5.3 ein Konzept zur systematisierten und standardisierten Auswertung von Umlegungsergebnissen erstellt und geeignete Vergleichskriterien definiert, um die Qualität einer Umlegung zu beurteilen und verschiedene Umlegungen miteinander vergleichen zu können. Insbesondere dient als Vergleich die Direktumlegung der Referenznetze. Hierbei handelt es sich um ein VISUM-Netz, das genau mit den zuvor bei einer Fahrgasterhebung ermittelten Wegen auf den real gewählten Routen der Fahrgäste belastet ist. Es stellt die Realität dar und ist als Vergleichsreferenz geeignet. Die Direktumlegung steht für einen repräsentativen Wochentag (Montag - Freitag) zur Verfügung. Als Datengrundlage für die modellhaften Umlegungen dienen aus den Erhebungsdaten erzeugte stundenfeine Quell-Ziel-Matrizen. Sie enthalten, getrennt für jede Stunde, die Anzahl der Wege auf allen Quell-Ziel-Beziehungen zwischen allen Verkehrszellen.

Die fahrplanfeine Umlegung wird auf Grund der in Kapitel 3 festgestellten, zu erwartenden hohen Qualität der Ergebnisse besonders detailliert untersucht. In Kapitel 5.4 werden alle zu untersuchenden Verkehrsaufteilungsmodelle und Parameter für die fahrplanfeine Umlegung festgelegt. Da nach der Untersuchung der Umlegungsverfahren in Kapitel 3 die Hypothese aufgestellt wurde, dass die taktfeine Umlegung auf Grund des geringeren Detaillierungsgrades schlechtere Ergebnisse als die fahrplanfeine Umlegung liefert, werden diese beiden Umlegungsverfahren nach Abschluss der Untersuchung der fahrplanfeinen Umlegung verglichen. Damit kann eine Aussage zur Größenordnung der Abweichung zwischen diesen beiden Umlegungsverfahren getroffen werden.

Bei der Wahl des Vorgehens der Untersuchung ist zu berücksichtigen, dass die Rechenzeit der Auswertungen auf modernen Arbeitsplatzrechnern[36] je nach Netzgröße und Parametrierung für die fahrplanfeine Umlegung zwischen zwei und zwölf Stunden liegt. Daher ist es zwingend notwendig, die Zahl der zu analysierenden Varianten zu begrenzen. Es ist im Rahmen dieser Diplomarbeit aus Gründen der Rechenzeit nicht möglich, eine Kombination aller denkbaren Parametrierungen untereinander zu untersuchen und die Beste Variante zu ermitteln. Deswegen ist es erforderlich, ein strukturiertes Vorgehen zu entwickeln und den Einfluss jedes Parameters getrennt von den übrigen zu untersuchen und auszuwerten. Für jeden Parameter werden zunächst Standardwerte festgelegt und anschließend für jeden Parameter einzeln unter Veränderung eines Wertes mehrere Umlegungen berechnet. Dazu wird ein Intervall sinnvoller Werte festgelegt und drei bis vier über das Intervall gleichmäßig verteilte Werte zu den Berechnungen herangezogen. Die Standardwerte werden nun vor der Analyse des nächsten Parameters um den jeweils besten Wert der zuvor bereits analysierten Parameter angepasst. Parameter von denen ein großer Einfluss zu erwarten ist werden zuerst untersucht. Dieses hierarchische Vorgehen ermöglicht eine Reduzierung der Anzahl Umlegungsrechnungen und damit der Gesamtrechenzeit, außerdem kann zum einen jeder Parameter auf seine individuelle Wirkung hin untersucht werden, zum anderen wird sukzessive eine gute Einstellung für das jeweilige Referenznetz insgesamt gefunden. Dabei ist zu beachten, dass es sich um eine gute, aber nicht um die beste Lösung handelt, da nicht alle möglichen Kombinationen von Parametereinstellungen untersucht werden können und für jeden Parameter nur ausgewählte Werte mit einem gewissen Abstand zueinander untersucht werden.

5.2 Beschreibung der Referenznetze

Als Referenznetze zur Durchführung der Wirkungsanalyse werden das der Stadt Oberhausen und jenes der Metropolregion Rhein-Neckar gewählt. Beide Netze erscheinen auf Grund ihrer polyzentrischen Struktur und ihrer dichten Besiedlung geeignet, da zwischen vielen Verkehrszellen mehrere sinnvolle, aber teils sehr unterschiedliche, Routen existieren, die die Umlegungsverfahren vor eine Herausforderung stellen und interessante Untersuchungsmöglichkeiten bieten. So kann auf Grund der zahlreichen Wahlmöglichkeiten zwischen verschiedenen Routen überprüft werden, ob die Umlegungsmodelle das Wahlverhalten der Fahrgäste realistisch abbilden. Es stehen in beiden Netzen mit Bus, Straßenbahn und Regionalzug verschiedene Verkehrsmittel zur Verfügung, so dass die Modelle auch auf die Berücksichtigung des sog. Schienenbonus hin untersucht werden können. „Als Schienenbonus wird das Phänomen bezeichnet, dass schienengebundene Verkehrsmittel stärker akzeptiert und entsprechend mehr

[36] Ausstattung: Taktfrequenz Prozessor 2 GHz, Arbeitsspeicher 2,4 GB

nachgefragt werden als straßengebundene Verkehrsmittel."[37] Diese Eigenschaft müssen die Umlegungsverfahren abbilden.

5.2.1 Stadt Oberhausen

Die Stadt Oberhausen ist eine kreisfreie Stadt im westlichen Ruhrgebiet im Bundesland Nordrhein-Westfalen. Oberhausen verfügt über rund 220.000 Einwohner auf einer Fläche von 77 Quadratkilometern. Die Stadt verfügt über ein dichtes ÖPNV-Netz (siehe Anhang B). Hauptachse bildet in Nord-Süd-Richtung die sog. Oberhausener ÖPNV-Trasse, hierbei handelt es sich um eine Nahverkehrstrasse, die sowohl von Straßenbahnen als auch von Linienbussen befahren werden kann. Die Trasse ist weitgehend planfrei geführt und verläuft vom Hauptbahnhof über das Zentrum „Neue Mitte" bis in den Stadtteil Sterkrade. Damit werden von ihr alle drei großen Stadtzentren Oberhausens miteinander verbunden. In südlicher Richtung führt die einzige Straßenbahnlinie Oberhausens weiter bis ins benachbarte Mülheim an der Ruhr. Darüber hinaus ist Oberhausen in das S-Bahn-Netz Rhein-Ruhr eingebunden und verfügt über S-Bahn-Linien und Regionalzüge in Richtung Duisburg, Mülheim an der Ruhr, Essen, Bottrop und Dinslaken. Die Feinerschließung innerhalb der Stadt wird von einem dichten Busliniennetz übernommen.

Die Straßenbahnlinie sowie fünf Haupt-Buslinien (als CE - CityExpress - gekennzeichnet) verkehren Montag bis Freitag tagsüber alle zehn Minuten. Weitere Buslinien ergänzen das Angebot meist mit einem 20 Minuten-Takt. Auf der ÖPNV-Trasse ergibt sich durch vertaktete Parallelführung mehrerer Linien zwischen Sterkrade und der Neuen Mitte ein Drei- bis Vier-Minuten-Takt, zwischen der Neuen Mitte und dem Hauptbahnhof sogar ein Zwei Minuten-Takt. Vom Hauptbahnhof aus verkehren stündlich vier Zugpaare über Sterkrade weiter in Richtung Dinslaken, darüber hinaus in Richtung Bottrop drei Zugpaare, in Richtung Mülheim an der Ruhr ebenfalls drei Zugpaare, in Richtung Essen Hbf drei Zugpaare, in Richtung Essen-Altenessen zwei Zugpaare und in Richtung Duisburg sechs Zugpaare.

Im VISUM-Netz mit Fahrplanstand 2003 sind neben allen ÖPNV-Linien im Stadtgebiet Oberhausen auch alle für ein- und ausbrechende Verkehre relevante Linien in den Nachbarstädten enthalten. Das Netz besteht aus insgesamt 2.677 Haltestellen, die von 194 Linien mit 15.072 Fahrten bedient werden. Insgesamt sind für einen Wochentag rund 118.000 Fahrgastfahrten gezählt worden. Es sind die Wege aller Fahrgäste, die die Verkehrsmittel Bus oder Straßenbahn genutzt haben vollständig erhoben, auch wenn ein Teilweg im SPNV stattfand. Fahrgäste, die ausschließlich den SPNV genutzt haben, sind nicht erhoben worden. Die Verkehrszellenstruktur ist haltestellenfein, für jede Haltestelle existiert eine eigene Verkehrszelle, von der die Nachfrage zu jeder anderen Haltestelle bzw. Verkehrszelle bekannt ist.

[37] Schulz, M.; Meinhold C. (2003)

5.2.2 Region Rhein-Neckar

In der Region Rhein-Neckar dient das Gebiet des Verkehrsverbundes Rhein-Neckar (VRN) als Untersuchungsraum (siehe Anhang B). Es liegt in den Bundesländern Hessen, Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg. Als wichtige Großstädte liegen Mannheim, Ludwigshafen, Heidelberg und Kaiserslautern im VRN. Im gesamten Gebiet leben 3,02 Mio. Menschen auf 9.967 Quadratkilometern. Die Hauptverkehrsachse bildet die Relation Ludwigshafen – Mannheim – Heidelberg. Wobei die Städte Ludwigshafen (165.000 Einwohner) und Mannheim (310.000 Einwohner) direkt aneinander angrenzen, aber durch den Rhein getrennt sind. Eine Bahnstrecke und zwei Straßenbahnstrecken über verschiedene Rheinbrücken bilden die wichtigen Verbindungen für den ÖPNV. Zwischen Mannheim und Heidelberg (145.000 Einwohner) gibt es neben der Bahnstrecke eine Überland-Straßenbahnstrecke, die die Stadtnetze der Straßenbahnbetriebe beider Städte direkt miteinander verbindet. Mit dieser Linie ist, im Gegensatz zum SPNV, eine umsteigefreie Direktverbindung von Stadtzentrum zu Stadtzentrum möglich. Der gesamte Raum ist durch zahlreiche Bahnstrecken erschlossen, wichtige Verbindungen außerhalb des VRN verlaufen nach Darmstadt, Frankfurt am Main, Worms, Saarbrücken, Karlsruhe, Heilbronn und Würzburg.

Das Angebot ist im Regionalverkehr auf der Schiene durch einen 60 Minuten-Grundtakt gekennzeichnet, der auf den Einfallachsen nach Ludwigshafen, Mannheim und Heidelberg zu einem 30 Minuten-Takt verdichtet wird. Zwischen diesen Städten werden auf der Hauptachse fünf, in der Hauptverkehrszeit acht Zugpaare pro Stunde angeboten. Die Straßenbahnlinie zwischen Mannheim und Heidelberg verkehrt, wie auch die meisten innerstädtischen Straßenbahnlinien, in einem durchgehenden Zehn-Minuten-Takt. Die Straßenbahnen erschließen in den genannten Städten alle größeren Stadtteile und wichtigen Achsen. Ergänzt wird das Schienennetz durch zahlreiche Buslinien, die in den Großstädten überwiegend im 20- oder 30-Minuten-Takt und im Regionalverkehr meist in einem 60-Minuten-Takt verkehren.

Das VISUM-Netz hat den Fahrplanstand 2002/2003 und beinhaltet alle Linien des ÖPNV im gesamten VRN-Gebiet. Das Netz besteht aus 8.806 Haltestellen, welche von 420 Linien mit 26.206 Fahrten wochentäglich bedient werden. Für einen Wochentag sind insgesamt 736.500 Fahrgäste gezählt worden. Das Gebiet ist vollständig erhoben, die Verkehrszellenstruktur ist genau wie im Netz Oberhausen haltestellenfein.

5.3 Vergleichskonzept

Das Vergleichskonzept dient dazu, Ergebnisse von verschiedenen Umlegungen untereinander und mit der Direktumlegung zu vergleichen und die Qualität der Umlegung objektiv zu beurteilen. Hierzu werden zunächst Untersuchungsgrößen abgeleitet, die aus den Ergebnissen einer Umlegung gewonnen werden können. Anschließend wird

eine Bewertung und Gewichtung der Größen durchgeführt, so dass sich eine Zielgröße für die Gesamtqualität ergibt.

5.3.1 Untersuchungsgrößen

Bei den Untersuchungsgrößen handelt es sich ausschließlich um solche Größen, die unabhängig von einzelnen Strecken oder Relationen sind und für das gesamte Netz allgemeine Gültigkeit besitzen. Es werden zum einen typische Größen der Charakteristik des ÖPNV gewählt, um zu prüfen, ob die Umlegungsergebnisse diese Charakteristik realitätsnah nachbilden. Zum anderen werden statistische Größen der Korrelation zwischen Umlegung und Direkumlegung herangezogen, um eine Aussage über die Qualität der Abbildung der Netzbelastung zu erhalten.

- **Mittlere Umsteigehäufigkeit [-]:** Liefert den arithmetischen Mittelwert der Anzahl Umsteigevorgänge der Fahrgäste und berechnet sich als Quotient aus der Summe aller Umsteigevorgänge und der Anzahl der durchgeführten Wege im Gesamtnetz. Die Größe liefert eine Aussage darüber, ob das Umsteigeverhalten in der Umlegung realistisch abgebildet ist. Von der VISUM-Umlegungsstatistik[38] wird sie direkt ausgegeben.

- **Mittlere Reiseweite [km]:** Gibt den arithmetischen Mittelwert der Reiseweiten der Wege im Gesamtnetz an und berechnet sich als Quotient aus der Summe der Reiseweiten aller Fahrgäste und der Anzahl der durchgeführten Wege. Die Größe sagt aus, ob die Umwegesensitivität der Fahrgäste richtig abgebildet ist. Sie wird von der VISUM-Umlegungsstatistik direkt ausgegeben.

- **Anteil [%] der Verkehrsleistung [Pkm] je Verkehrsmittel:** Liefert die Summe der zurückgelegten Entfernung aller Fahrgäste aufgeteilt auf die Verkehrsmittel Bus, Straßenbahn und SPNV. Sie kann der VISUM-Liste[39] „Verkehrssysteme“ entnommen werden. Daraus wird der Anteil der Personenkilometer jedes Verkehrsmittels an den gesamten Personenkilometern errechnet. So kann insbesondere eine Aussage getroffen werden, ob die Aufteilung auf die verschiedenen Verkehrsmittel korrekt abgebildet wird (Schienenbonus, siehe auch Kapitel 5.2).

- **Korrelationskoeffizient [-]:** Ist ein statistisches Maß für den linearen Zusammenhang zwischen den Werten der Direktumlegung und der VISUM-Umlegung. Bei vollständiger Korrelation ist der Wert eins, liegt keine Korrelation vor, ist der Wert gleich null.[40] Die Größe wird in VISUM mit dem Verfahren „Umlegungsanalyse“[41] errechnet.

[38] Siehe hierzu auch PTV AG, VISUM Benutzerhandbuch (2006), S. 10-17 ff.
[39] Siehe hierzu auch PTV AG, VISUM Benutzerhandbuch (2006), S. 10-2 ff.
[40] Vgl. Precht, M.; Kraft, R.; Bachmaier, M. (1999): S. 47 f.
[41] Siehe hierzu auch PTV AG, VISUM Benutzerhandbuch (2006), S. 7-10 ff.

- **Mittlerer absoluter Fehler der Streckenbelastung [km]:** Liefert den arithmetischen Mittelwert des Betrags der absoluten Abweichung der Belastung aller Strecken und errechnet sich als Quotient aus der Summe der Beträge der absoluten Abweichung von Belastung der Direktumlegung und Belastung der VISUM-Umlegung jeder Strecke sowie der Anzahl aller Strecken. Diese Größe ist das wichtigste Maß für die Qualität der Netzbelastung einer Umlegung. Datenquelle ist die VISUM-Umlegungsanalyse.
- **Mittlerer relativer Fehler der Streckenbelastung [%]:** Liefert den arithmetischen Mittelwert der relativen Abweichungen der Belastung aller Strecken. Die Berechnung erfolgt analog zum mittleren absoluten Fehler, mit dem Unterschied, dass zuvor die Abweichung der Streckenbelastung zur absoluten Streckenbelastung der Direktumlegung ins Verhältnis gesetzt wird. Der Wert ist wichtig, da bei gering belasteten Strecken eine kleine absolute Abweichung bei der Größe „Mittlerer absoluter Fehler" wenig ins Gewicht fällt. Auf der Strecke bedeutet sie trotzdem einen großen relativen Fehler und muss daher berücksichtigt werden. Der Wert wird von der VISUM-Umlegungsanalyse in Prozent ausgegeben.
- **Standardabweichung der Streckenbelastung [km]:** Ist ein statistisches Maß für die Streuung und gibt an, wie stark die Abweichung der Belastung der einzelnen Strecken um die mittlere Abweichung aller Strecken gestreut sind.[42] D.h. die Standardabweichung ist groß, wenn einige Strecken mit besonders großer Abweichung belastet sind, aber die Mehrheit der Strecken geringe Fehler aufweist. Daher ist diese Größe eine sinnvolle Ergänzung zur mittleren absoluten Abweichung, weil diese in diesem Fall klein ist. Die Standardabweichung errechnet sich als:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}$$

mit x_i = Abweichung des beobachteten Wertes

$\bar{x}$ = Arithmetischer Mittelwert der Abweichungen aller beobachteten Werte

Bei idealer Übereinstimmung der Umlegung mit der Direktumlegung ist der Wert gleich null. Die Größe wird in VISUM mit dem Verfahren „Umlegungsanalyse" errechnet.

5.3.2 Teilnetz- und Relationsbetrachtung

Zusätzlich zur Beurteilung der Umlegungsqualität des Gesamtnetzes wird auf den Hauptstrecken zwischen den wichtigen Zentren eine zusätzliche Betrachtung durchgeführt. Zum einen ist das Wegeaufkommen hier besonders hoch und somit von über

[42] Vgl. Precht, M.; Kraft, R.; Bachmaier, M. (1999): S. 22 f.

geordneter Wichtigkeit, zum anderen bestehen mehrere sinnvolle Routen mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln, zwischen denen die Aufteilung genauer betrachtet werden soll.

5.3.3 Bewertung und Gewichtung

Um zu einer objektiven Aussage über die Qualität von Umlegungsergebnissen zu gelangen, muss jede der in Kapitel 5.3.1 gewählten Untersuchungsgrößen zunächst einzeln bewertet werden. Im Anschluss werden Gewichtungsfaktoren festgelegt und die gewichteten Bewertungen zu einem Gesamtergebnis zusammengefasst. Dieses Ergebnis erlaubt einen Vergleich von verschiedenen Umlegungen untereinander.

Zur Bewertung einer Größe wird eine Bewertungsfunktion definiert, um den Wert der Größe in eine Bewertung zu überführen. Es wird eine lineare Funktion angenommen, die durch zwei Wertepaare definiert wird. Für jede Größe wird ein Zielwert (Bestwert) festgelegt, bei dem die Funktion die Bewertung eins liefert. Zudem wird ein Mindestwert definiert, bei dem die Bewertung null vergeben wird. Alle weiteren Wertepaare (Untersuchungsgröße, Bewertung) werden durch die Funktion definiert. Der Wert einer Größe für die Höchstwertung eins ergibt sich aus einer völligen Übereinstimmung mit dem Referenzwert der Direktumlegung. Die Bewertung null ergibt sich aus der praktischen Überlegung, ab welchem Fehler ein Wert so stark abweicht, dass er zu Planungszwecken nicht mehr zu verwenden ist.

Es wird anschließend eine Gewichtung vorgenommen, um jeder Größe einen angemessenen Stellenwert im Gesamtergebnis einzuräumen. Dazu werden die Größen in drei Gruppen eingeteilt:

1. ÖPNV-Charakteristik: Mittlere Umsteigehäufigkeit, Mittlere Reiseweite
2. Aufteilung Verkehrsleistung: Anteil Bus, Anteil Straßenbahn, Anteil SPNV
3. Streckenbelastung: Korrelationskoeffizient, Mittlerer absoluter Fehler, Mittlerer relativer Fehler, Standardabweichung

Jede dieser drei Gruppen wird gleichstark gewichtet (Faktor 10) und alle Größen innerhalb einer Gruppe werden ebenfalls gleichstark gewichtet. Damit ergibt sich der Gewichtungsfaktor einer einzelnen Größe als Quotient aus dem Gruppenfaktor 10 und der Anzahl der Größen innerhalb der Gruppe.

Als Grundlage für die Bewertung ergeben sich damit die folgenden Größen:

Bewertungsgröße a	Bewertung $f(a_1) = 1$	Bewertung $f(a_0) = 0$	Gewichtungsfaktor
Mittlere Umsteigehäufigkeit [-]	Wert Direktumlegung	$a_1 \pm 0{,}25$	5
Mittlere Reiseweite [km]	Wert Direktumlegung	$a_1 \pm 1$ km	5
Verkehrsleistung Bus [%]	Wert Direktumlegung	$a_1 \pm 5$ Prozentpkte.	3,33
Verkehrsleistung Straßenbahn [%]	Wert Direktumlegung	$a_1 \pm 5$ Prozentpkte.	3,33
Verkehrsleistung SPNV [%]	Wert Direktumlegung	$a_1 \pm 5$ Prozentpkte.	3,33
Korrelationskoeffizient [-]	1	0,1	2,5
Mittlerer absoluter Fehler [Wege]	0	100	2,5
Mittlerer relativer Fehler [%]	0	20 %	2,5
Standardabweichung [km]	0	200	2,5

Tabelle 8: Basisgrößen des Bewertungssystems

Das Gesamtergebnis einer Bewertung ist die Summe aller mit ihrem jeweiligen Gewichtungsfaktor multiplizierten Bewertungen. Es ist nun möglich, hiermit verschiedene Umlegungen zu vergleichen. Ein größerer Wert stellt dabei eine höhere Qualität dar. Bei völliger Übereinstimmung mit der Direktumlegung ergibt sich der theoretische Höchstwert von 30 Punkten.

5.3.4 Sensitivitätsanalyse

Vor der Anwendung des Bewertungssystems wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss von allen nicht objektiven Parametern auf das Ergebnis zu untersuchen.[43] Ein willkürliches Zustandekommen von Ergebnissen soll hierdurch ausgeschlossen werden. „Ziel dieses Schritts ist es herauszufinden, ob das Ergebnis robust gegenüber Veränderungen von subjektiven Komponenten (z. B. Gewichte) oder von Annahmen ist, die sich […] ändern können […].“[44] Das Augenmerk gilt hier den Gewichtungsfaktoren und dem Eichwert der Bewertungsfunktion $f(a_0) = 0$ (siehe Tabelle 8), da diese beiden Werte jeder Bewertungsgröße auf Grund von Annahmen und Erfahrungswerten zugewiesen wurde.

Zur Sensitivitätsanalyse werden die Varianten null bis sechs des Referenznetzes Oberhausen herangezogen. Alle Daten liegen in einem Tabellenkalkulationsprogramm vor, so dass eine Veränderung einzelner Parameter, die in die Berechnung der Bewertung einfließen, problemlos verändert werden können. Dies geschieht durch mehrfache willkürliche Änderung der o.g. Parameter in Tabelle 8. Die Werte $f(a_0) = 0$ für die Eichung der Bewertungsfunktion werden verdoppelt sowie halbiert, für die Gewichtung wird zum einen eine Gleichgewichtung aller Größen angenommen und zum anderen eine verdoppelte Gewichtung jedes der drei Blöcke von Bewertungsgrößen.

[43] Vgl. Koormann, F. (1997)
[44] Scholles, F. (2006)

Die detaillierten Ergebnisse für alle gewählten Varianten sind in Anhang B zu finden. Die absolute Höhe der Punkte (siehe Tabelle 16) variiert zwar erheblich, das relative Verhältnis der Punkte der Varianten untereinander variiert jedoch kaum. Die wesentliche Kernaussage über die Qualität der Varianten zueinander und zur Direktumlegung bleibt damit erhalten. Die Rangfolge der besten drei Varianten ist in allen Fällen identisch (siehe Tabelle 17), bei den übrigen Rängen treten nur vereinzelt Änderungen auf. Daher kann festgestellt werden, dass selbst erhebliche Veränderungen der auf Annahmen basierenden Größen im Bewertungsverfahren auf die Ermittlung der besten Variante als Hauptaufgabe des Vergleichskonzeptes keinen Einfluss haben. Durch die Sensitivitäts-analyse ist somit festzustellen, dass eine Verfälschung der Ergebnisse auf Grund von Annahmen im Bewertungsverfahren nicht zu erwarten ist.

5.4 Untersuchungsparameter der fahrplanfeinen Umlegung

Bei der Analyse des fahrplanfeinen Verfahrens stehen die folgenden Parameter, sortiert nach Verfahrensschritten, zur Verfügung und sollen untersucht werden:

5.4.1 Suche und Vorauswahl

- ► Kurzwegsuche (siehe auch Kapitel 3.3.1.1)
- ► Branch&Bound-Suche (siehe auch Kapitel 3.3.1.2)

Es stehen in VISUM jeweils drei Parameter zur Verfügung, die Einfluss darauf haben, ob eine gefundene Verbindung beibehalten oder verworfen wird. Dies sind der Faktor des Suchwiderstandes, ein konstanter Zuschlag auf den Suchwiderstand und die Anzahl zusätzlicher Umsteigevorgänge gegenüber dem Weg mit minimalen Umstiegen (siehe auch Kapitel 3.3.2). Es werden drei Varianten je Suchverfahren untersucht, die von großen Parametern (auch schlechte Verbindungen werden beibehalten) bis zu kleinen Parametern (schlechte Verbindungen werden gelöscht) reichen. Bei der Kurzwegsuche besteht darüber hinaus die Möglichkeit der Rückwärtskorrektur und der bikriteriellen Suche. Sie werden immer durchgeführt, da beide Optionen als sehr sinnvoll anzusehen sind und keine negative Wirkung auf das Ergebnis zu erwarten ist. Es werden die folgenden Varianten zur Berechnung und Analyse festgelegt:

Parameter / Variante	**B1**	**B2**	**B3**	**K1**	**K2**	**K3**
Suchverfahren	Branch & Bound	Branch & Bound	Branch & Bound	Kurzweg	Kurzweg	Kurzweg
Faktor Suchwiderstand	2	1,67	1,33	2	1,67	1,33
Zuschlag Suchwiderstand	12	8	4	12	8	4
Anz. zusätzliche Umstiege	3	2	1	3	2	1

Tabelle 9: Varianten der Untersuchungsparameter der Suchverfahren

Die Bandbreite der Werte für die einzelnen Parameter ergibt sich aus der Überlegung nach sinnvollen Maximal- und Minimalwerten: Ist der Suchwiderstand einer Verbindung mehr als doppelt so groß oder muss mehr als vier mal häufiger umgestiegen werden, wird sich kein Fahrgast für eine derart schlechte Verbindung entscheiden. Somit ist es nicht sinnvoll über diese Kriterien hinaus Verbindungen zu ermitteln und dem Aufteilungsmodell zuzuführen. Wird an der anderen Grenze die Suche so stark eingeschränkt, dass nur der beste oder sehr ähnliche Verbindungen gesucht werden, macht die spätere Anwendung von Aufteilungsmodellen keinen Sinn, da nicht genügend Wahlmöglichkeiten zwischen besseren und schlechteren Routen bestehen, auf die der Fahrgaststrom aufgeteilt werden kann.

5.4.2 Widerstand

Bei der Abbildung des Widerstandes im Modell werden die drei folgenden wichtigen Parameter analysiert:

- Faktor Verkehrssystemspezifischer Widerstand
- Faktor Umsteigehäufigkeit
- Faktor Umsteigewartezeit

Weitere Einflussgrößen wie Gehzeiten, Startwartezeit, Komfort und Zuverlässigkeit sind in den Referenznetzen nicht modelliert und damit unbekannt. Fahrpreis und Betreiberwechsel werden ebenfalls vernachlässigt, da sie in Verkehrsverbünden keine signifikante Rolle spielen (Preise bei allen Verkehrsunternehmen identisch) und nahezu keinen Einfluss auf die Verbindungswahl der Fahrgäste haben. Die zeitliche Verfügbarkeit wird auf Grund der stundengenauen Erhebungsdaten nur eingeschränkt berücksichtigt: Innerhalb einer Stunde stehen keine Informationen über eine genaue Wunschabfahrtszeit der Fahrgäste zur Verfügung, alle Verbindungen werden hier als gleichwertig angesehen. Der Widerstand von Verbindungen, die vor oder hinter dem Stundenintervall der Fahrgastfahrt liegen, wird um die Differenz zwischen Abfahrtszeit und Intervallgrenze erhöht (siehe auch Kapitel 3.3.3). Dieses Vorgehen wird als sinnvoll eingestuft, so dass es bei allen Umlegungsrechnungen in der gesamten Analyse immer angewandt wird. Die folgenden Varianten werden zur Berechnung und Analyse festgelegt:

- Faktor Verkehrssystemspezifischer Widerstand:

Verkehrssystem / Variante	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**
Straßenbahn	1	1	1	1	1
Bus	1	1	1,2	1,5	1,5
SPNV	2	3	3	3	5

Tabelle 10: Varianten der Untersuchungsparameter des Verkehrssystemspezifischen Widerstands

Die aus dem Fahrplan ermittelte Fahrzeit wird vor Ermittlung des Verbindungswiderstandes differenziert nach Verkehrssystemen mit dem jeweiligen Faktor multipliziert.

Zur Wahl der Parameter des Verkehrssystemspezifischen Widerstandes ist das Folgende anzumerken: In den Direktumlegungsdaten der Stadt Oberhausen ist auffällig, dass der SPNV für Fahrten innerhalb der Stadt wenig genutzt wird. Paradoxer Weise wird eine Fahrt über die langsamere ÖPNV-Trasse einer Fahrt mit der nahezu parallelen SPNV-Verbindung meist vorgezogen. Deswegen wird im Fall des SPNV ein „Schienenmalus“ vergeben, um dieses Verhalten in den Umlegungsrechnungen darzustellen. Im Vergleich von Straßenbahn und Bus ist das Verhalten wie zu erwarten – die Straßenbahn wird bevorzugt genutzt und erhält im Netz einen „Schienenbonus“. Die festgelegten Werte der Varianten basieren auf Erfahrungen aus dem Projekt, bei dem für das Netz Oberhausen bereits Umlegungen durchgeführt worden sind.

► Faktor Umsteigehäufigkeit: 4 Min. / 8 Min. / 12 Min. / 16 Min.

Bezüglich der Sensitivität bei Umsteigevorgängen sind in der Literatur Werte von zwei Minuten als Visum-Standardwert bis zu 20 Minuten in einer Studie der ETH Zürich[45] zu finden. Da die Extremwerte von zwei und 20 Minuten für den Autor schwer vorstellbar sind und die Erfahrungswerte der PTV etwa bei zehn Minuten liegen, werden vier Werte in einem Intervall von vier bis 16 Minuten gewählt.

► Faktor Umsteigewartezeit: 1 / 2

Hier stellt sich insbesondere die Frage, ob die Wartezeit bei Umsteigevorgängen genau wie die Fahrzeit wahrgenommen oder durch das monotone Warten subjektiv länger empfunden wird und dadurch einen stärkeren Einfluss auf das Wahlverhalten hat.

5.4.3 Aufteilungsmodell

Es werden alle vier in VISUM verfügbaren Aufteilungsmodelle untersucht. Für jedes Aufteilungsmodell sind unterschiedliche Parametrierungen zu analysieren.

► Kirchhoff: $\beta = 4$ / $\beta = 8$ / $\beta = 12$ / $\beta = 16$

Für das Kirchhoff-Modell empfehlen Schnabel und Lohse[46] für den Parameter β Werte zwischen 6 und 8 für Stadtstraßennetze, für Landstraßennetze Werte von 12 bis 16. Die Parameter für die Varianten werden in Anlehnung hieran festgelegt. Der VISUM-Standardwert liegt bei $\beta = 4$.

► Logit: $\beta = 0{,}075$ / $\beta = 0{,}15$ / $\beta = 0{,}3$ / $\beta = 0{,}9$

Die Werte sind so gewählt, dass sich eine ähnliche Sensitivität ergibt, wie mit den bei Kirchhoff gewählten Werten (siehe Abbildungen 3, 5, 6). Außerdem liegen sie im Bereich des VISUM-Standardwertes von $\beta = 0{,}25$.

► Box-Cox: $\tau = 0{,}75$ / $\tau = 0{,}5$ / $\tau = 0{,}25$ (alle mit $\beta = 1$)

► Box-Cox: $\beta = 0{,}25$ / $\beta = 1$ / $\beta = 4$ (alle mit $\tau = 0{,}5$)

[45] Vgl. Vrtic, M., K.W. Axhausen, R.Maggi und F. Rossera (2003)
[46] Vgl. Schnabel, W.; Lohse, D. (1997), S. 295

Die Extremwerte für die Box-Cox-Transformation $\tau = 0$ und $\tau = 1$ brauchen an dieser Stelle nicht untersucht werden, da sich hierbei die Kirchhoff- bzw. die Logit-Aufteilung ergeben (siehe Kapitel 4.3). Zunächst bleibt der Parameter β konstant und τ wird verändert, anschließend bleibt τ konstant und β wird verändert. Auf die Analyse weiterer Kombinationen muss verzichtet werden, da sich sonst ein erheblicher Rechenaufwand ergibt. Der VISUM-Standardwert ist $\tau = 0{,}5$ und $\beta = 1$.

- Lohse: $\beta = 1$ / $\beta = \sqrt{4}$ / $\beta = \sqrt{8}$ / $\beta = \sqrt{12}$ / $\beta = \sqrt{16}$

Da der Parameter in die Lohse-Formel quadriert eingeht, werden - analog zu den Kirchhoff-Werten - jeweils die Wurzel der Werte gewählt. Der VISUM-Standardwert liegt bei $\beta = \sqrt{16} = 4$.

Insgesamt ergeben sich für die Aufteilungsmodelle 18 zu untersuchende Varianten.

5.4.4 Untersuchungsbasis

Zusätzlich zu den klassischen Parametern der Suche und Vorauswahl, des Widerstandes und des Aufteilungsmodells werden zwei weitere optionale Operationen, die die Software VISUM anbietet, auf ihren Nutzen hin überprüft.

- Ganglinienintervalle feiner aufrastern: 20 Minuten, 10 Minuten, ohne Aufrastern

Bei Aktivierung dieser Option wird die Summe der Wege jeder Quell-Ziel-Beziehung innerhalb eines Zeitintervalls auf kleinere Intervalle aufgeteilt. Es wird dabei eine Gleichverteilung angenommen. Bei Fahrgasterhebungen wird gewöhnlich nur stundengenau erhoben. Dies hat den Nachteil, dass nicht bekannt ist, wann genau innerhalb einer Stunde ein Fahrgast gefahren ist. Bei der Umlegung in VISUM werden die Fahrgäste innerhalb einer Stunde gemäß Widerstand und Aufteilungsmodell auf alle zur Verfügung stehenden Verbindungen aufgeteilt. Der Nachteil hierbei ist, dass eine einzige Verbindung mit geringem Widerstand einen Großteil der Fahrgäste auf sich zieht. In der Realität ist die Verbindung aber nur für jene Fahrgäste attraktiv, deren Wunschabfahrtszeit sehr nahe an der Abfahrtszeit dieser Verbindung liegt. Durch die feine Aufrasterung wird die Verbindung für Fahrgäste, die auf ein anderes Intervall außerhalb des nun kurzen Intervalls der Verbindung geringen Widerstandes gleich verteilt wurden, unattraktiver. Dies geschieht indem der Verbindungswiderstand um die Zeitdifferenz zwischen Abfahrtszeit der Verbindung und Intervallgrenze des Intervalls der der Fahrgastfahrt erhöht wird (siehe Kapitel 3.3.3). Es werden drei Varianten für mögliche Aufrasterungen untersucht, die in der Größenordnung des Taktes der häufig verkehrenden Linien liegen. Eine weitere Aufrasterung scheint nicht sinnvoll, da dann nicht mehr in jedem Intervall eine Fahrt der getakteten Linien liegt und Verbindungen dieser Linien in einigen Zeitscheiben gegenüber selten verkehrenden Linien, die ggf. unattraktiver sind, aber nun allein in einem Zeitintervall liegen, nun schlechter bewertet würden.

- Eigenständigkeit

Die Eigenständigkeit wurde bereits in Kapitel 3.3.5 erläutert. Sie ist als sinnvoll einzustufen und wird zunächst bei allen Umlegungen eingeschaltet. Um Ihre Vorteilhaftigkeit zu bestätigen wird eine Variante ohne Eigenständigkeit berechnet und ausgewertet.

5.5 Analyse der fahrplanfeinen Umlegung

5.5.1 Vorbereitung

Zu Beginn der Analyse muss zunächst eine Reihenfolge festgelegt werden, in der die einzelnen Parameter untersucht werden. Außerdem muss ein Ausgangswert für jeden Parameter gewählt werden, mit dem die Analyse des ersten Parameters begonnen wird. Diese grundsätzlichen Überlegungen vor Beginn sind notwendig, da die Ausgangsparametrierung der Umlegung nach jedem Analyseschritt um den für einen Parameter gefundenen besten Wert verändert wird. Die Analyse ist damit ein iterativer Prozess, in dem die einzelnen Schritte nicht völlig unabhängig voneinander erfolgen. Dies ist darin begründet, dass die Anzahl der zu berechnenden Umlegungen aus Gründen der Rechenzeit eng begrenzt ist und insbesondere als Ergebnis neben Aussagen zu einzelnen Parametern auch eine gute Gesamtparametrierung ermittelt werden soll. Letzteres wäre mit einer völlig unabhängigen Untersuchung der Parameter und der Vorgabe der Begrenzung der Variantenanzahl nicht möglich. Aus diesen Gründen spielt die Reihenfolge der Analyse der einzelnen Parameter eine Rolle. Bei ihrer Festlegung wird so vorgegangen, dass zu Beginn jene Parameter analysiert werden, von denen ein besonders großer Einfluss auf das Ergebnis erwartet wird. Zur Feinabstimmung werden jene Parameter, von denen ein geringerer Einfluss zu erwarten ist, zum Ende des Prozesses analysiert.

Bei der Fahrgasterhebung von Oberhausen ist auffällig, dass der SPNV innerhalb des Stadtgebietes trotz guten Angebotes wenig belastet ist und im Gegenzug die Busse und Straßenbahnen auf der ÖPNV-Trasse aber auch im übrigen Stadtgebiet stärker als angenommen belastet ist. Dies ist eine Folge der unvollständigen Erhebung ohne reine SPNV-Fahrten ohne Vor- oder Nachlauf im übrigen Stadtverkehr und der besonderen Attraktivität und subjektiv sehr positiv wahrgenommenen Reisezeit der ÖPNV-Trasse. Es ist zu erwarten, dass dies bei Umlegungen im Modell zu erheblichen Fehlern führt, da dieses Verhalten atypisch ist. Aus diesem Grund wird zu allererst der Parameter „Faktor Verkehrssystemspezifischer Widerstand“ untersucht. Mit ihm kann der Widerstand von SPNV-Fahrten systematisch erhöht werden und so das Modell an das beobachtete Verhalten angepasst werden. Wird dieser Schritt nicht bereits zu Beginn durchgeführt, sind schlechte Ergebnisse bei den weiteren Rechungen zu erwarten. Für das Rhein-Neckar-Netz wird aus Gründen der Vergleichbarkeit bei allen Analyseschritten die gleiche Reihenfolge gewählt.

Im zweiten und dritten Schritt werden Suche und Vorauswahl sowie die Aufteilungsmodelle untersucht. Hierbei handelt es sich um zwei grundlegende Bestandteile des gesamten Umlegungsverfahrens, die auf Grund ihrer Wichtigkeit und der vermuteten wesentlichen Wirkung auf das Ergebnis zu Anfang untersucht werden sollen. Im vierten und fünften Schritt folgen die Einflussgrößen auf den Widerstand, hier erfolgt mit den Größen „Faktor Umsteigewartezeit“ und „Faktor Umsteigehäufigkeit“ die Modellierung der Umsteigesensitivität der Fahrgäste. In den beiden abschließenden Schritten sollen die VISUM-Optionen „Ganglinien feiner aufrastern“ und „Eigenständigkeit“ auf ihre Wirksamkeit hin überprüft werden. Als Ausgangswerte für die Parameter werden Werte gewählt, die etwa in der Mitte des Untersuchungsintervalls liegen und aus der Literatur sowie aus Erfahrungen der PTV abgeleitet sind (siehe Kapitel 5.4). Der folgenden Tabelle können diese Werte und auch die beschriebene Reihenfolge entnommen werden:

Schritt	Parameter	Ausgangswert
1	Faktor verkehrssystemspezifischer Widerstand	Strab = Bus = SPNV = 1
2	Suche und Vorauswahl	Branch & Bound Nr. 1 (siehe Tabelle 9)
3	Aufteilungsmodell	Kirchhoff mit β = 8
4	Faktor Umsteigehäufigkeit	8 Min.
5	Faktor Umsteigewartezeit	2
6	Ganglinienintervall feiner aufrastern	Nein
7	Eigenständigkeit	Ja

Tabelle 11: Übersicht der Analysereihenfolge und Ausgangswerte der zu untersuchenden Parameter

5.5.2 Auswertung

Alle zur Auswertung herangezogenen Ergebnisse der Umlegungsrechungen sind in ausführlicher Form detailliert für jede Untersuchungsgröße in den Ergebnistabellen in Anhang C enthalten. Im Folgenden werden alle relevanten Aussagen, die sich aus diesen Daten gewinnen lassen, dargestellt.

Zu Beginn erfolgt die Analyse des Parameters „Faktor verkehrssystemspezifischer Widerstand“. Dieser Parameter wird auf Grund der in Kapitel 5.4 genannten Auffälligkeiten der Erhebungsdaten im Netz Oberhausen zu Anfang betrachtet. Es wurden hierzu die Varianten 1 bis 6 berechnet. Wie zu erwarten ist, führt Variante 1 mit den Ausgangswerten, bei denen alle Verkehrsysteme den gleichen Widerstand erhalten, im Netz Oberhausen nicht zum besten Ergebnis. Für Oberhausen erweist sich Variante 3 mit einem für den SPNV um Faktor drei erhöhten Widerstand (siehe Tabelle 10) als am besten geeignet. Eine weitere Differenzierung der Widerstände von Bus und Straßenbahn führt zu keinen weiteren Verbesserungen. Im Netz Rhein-Neckar treten in den Erhebungswerten keine Besonderheiten bezüglich des Wahlverhaltens zwischen SPNV und Bus bzw. Straßenbahn auf. Erwartungsgemäß erweist sich hier die Parametrierung

der Variante 1 ohne veränderte Gewichtung als geeignet. In beiden Netzen ist zu beobachten, dass eine Veränderung der Faktoren unmittelbar Auswirkungen auf die Verteilung der Personenkilometer zwischen den unterschiedlichen Verkehrssystemen hat. Wird der Widerstand eines Verkehrsträgers erhöht, sinkt sein Anteil an den Personenkilometern und jener der anderen Verkehrssysteme steigt an. Im Rhein-Neckar-Netz beispielsweise sinkt der Pkm-Anteil des SPNV bei Veränderung des spezifischen Widerstandes des SPNV von 1 auf 2 von 61,1% auf 59,5 % ab. Wird der Widerstand von 2 auf 3 erhöht, sinkt der Anteil erneut um 1,6 Prozentpunkte auf 57,9 % ab (Vgl. Varianten 1, 2 und 3).

Neben dieser Globalbetrachtung werden in Oberhausen die ÖPNV-Trasse und die parallel verlaufende SPNV-Trasse auf Grund ihrer besonderen Wichtigkeit im Netz zusätzlich gesondert betrachtet. Hier ist festzustellen, dass die ÖPNV-Trasse grundsätzlich zu gering belastet ist und die SPNV-Trasse zu stark. Die geringsten Abweichungen ergeben sich hier für Variante 6 mit einem „Schienenmalus“ von Faktor 5 und nicht für Variante 3, die für das Gesamtnetz die Beste ist. Dies ist auf die besondere Rolle dieser Relation und das hohe Ansehen der ÖPNV-Trasse durch die Fahrgäste zurückzuführen. Die Abweichung von ÖPNV- und SPNV-Trasse liegt in Variante 3 im Mittel bei 8,3% und damit deutlich unter dem mittleren relativen Fehler im Gesamtnetz von 13,9%. Für die weiteren Analyseschritte werden die Ergebnisse von Variante 3 als Grundlage verwendet, da hier das maßgebliche Gesamtnetz am besten abschneidet und in dieser Betrachtung auch die zusätzlich betrachteten Strecken – genau wie alle übrigen Strecken - berücksichtigt sind. In der Region Rhein-Neckar werden die SPNV-Strecke und die parallel verlaufende Straßenbahnstrecke betrachtet. Hier verhalten sich die Abweichungen wie das Gesamtergebnis. Sowohl der mittlere relative Fehler des Gesamtnetzes (9,7%) als auch jener der gesondert betrachteten Strecken (6,3%) ist etwas geringer als im Netz Oberhausen. Im Rhein-Neckar-Netz wird Variante 1 für die weiteren Berechnungen gewählt.

Im zweiten Schritt der Analyse ist die Suche und Vorauswahl der Verbindungen Untersuchungsgegenstand. Während der Umlegungsrechnungen hat sich herausgestellt, dass die Kurzwegsuche erheblich mehr Zeit in Anspruch nimmt als die Branch&Bound-Suche. Die Suchzeit ist maßgebend für die Gesamtrechenzeit. Die übrigen Schritte nehmen erheblich weniger Zeit in Anspruch. Benötigt die Branch&Bound-Suche im Netz Oberhausen nur eine Stunde und 45 Minuten, dauert eine Kurzwegsuche 13 Stunden. Der Zeitaufwand liegt hier etwa bei Faktor 7,5. Da das Rhein-Neckar-Netz erheblich größer ist als jenes von Oberhausen beträgt hier die Umlegungszeit bei der Branch&-Bound-Suche bereits neun Stunden und 45 Minuten. Überschlägig würde die Kurzwegsuche hier 73 Stunden benötigen. Rechnungen die mehr als 14 Stunden erfordern und somit nicht über Nacht erfolgen können, sind für den praktischen Einsatz in der Planung nicht geeignet. Bei der ersten durchgeführten Kurzwegsuche für Oberhausen stellt sich ein schlechteres Ergebnis (14,5 Punkte gemäß Bewertungssystem) als bei der besten

Branch&Bound-Suche (15,5 Punkte) ein. Da die Kurzwegsuche sowohl schlechtere Ergebnisse liefert, als auch zu einem nicht praktikablen Rechenaufwand führt, wird die Kurzwegsuche nicht weiter untersucht. Die Branch&Bound-Suche ist ohne Einschränkungen zu empfehlen, die Kurzwegsuche erweist sich als nicht tauglich.

Innerhalb des Verfahrens der Branch&Bound-Suche wird die Auswirkung der Parameter zur Einschränkung der Menge der gefunden Verbindungen untersucht. Hierzu sind drei Varianten definiert worden (siehe Tabelle 9). In beiden Netzen zeigt sich ein signifikanter Rückgang der Qualität der Umlegung bei zunehmender Einschränkung der Verbindungssuche. Zwischen den beiden Extrem-Varianten, bei denen einmal Verbindungen mit doppeltem Suchwiderstand und bis zu drei zusätzlichen Umstiegen beibehalten werden und einmal Verbindungen mit bis zu 1,3-fachem Suchwiderstand und maximal einem zusätzlichen Umstieg, ergibt sich in Oberhausen eine Differenz von 1,0 Punkten und im Netz Rhein-Neckar von 1,5 Punkten. Damit ist die Konfiguration B1 (siehe Tabelle 9) unabhängig für beide Untersuchungsnetze am besten geeignet. Mit Konfiguration B3 werden in Oberhausen mit insgesamt 317 000 Verbindungen 14% weniger als mit Konfiguration B1 belastet. Im Netz Rhein-Neckar beträgt der Unterschied dieser Konfigurationen 21%. Es ist zu empfehlen, die Suche und Vorauswahl nicht besonders stark einzuschränken und dem nächsten Schritt der Verkehrsaufteilung auch Wege mit doppeltem Suchwiderstand und bis zu drei zusätzlichen Umsteigevorgängen zuzuführen. Hier kann durch die Aufteilungsmodelle eine bessere Entscheidung für oder gegen die Belastung von Verbindungen getroffen werden.

Der dritte Schritt umfasst die Untersuchung der Aufteilungsmodelle. Zunächst wird das klassische Kirchhoff-Modell betrachtet. Hier zeigt sich, dass der VISUM-Standardwert von $\beta = 4$ in beiden Referenznetzen schlecht abschneidet. Der in der Literatur angegebene Wert von acht bis zwölf liefert bessere Ergebnisse. Für Oberhausen erweist sich ein Wert von acht als geeignet, für Rhein-Neckar ein Wert von zwölf. Bei größeren Werten wird das Ergebnis genau wie bei kleineren Werten schlechter. Die Literaturwerte werden damit bestätigt. Auch der Trend, dass bei ländlicher Ausprägung ein höherer Wert geeignet ist, kann bestätigt werden.

Die Anwendung des Logit-Modells führt für Oberhausen gegenüber Kirchhoff zu einer weiteren Verbesserung eines vollen Wertungspunktes (von 15,7 auf 16,7). Im Rhein-Neckar-Netz tritt keine Verbesserung ein. Für den Parameter β erweist sich ein Wert von 0,15 als geeignet. Er führt auch im Rhein-Neckar-Netz innerhalb der Logit-Analyse zum besten Ergebnis.

Für das Box-Cox-Modell ist sowohl der Parameter β als auch der Parameter τ zu untersuchen. Für beide Netze lassen sich hiermit, im Vergleich zu dem zuvor jeweils als bestes ermitteltes Verfahren, keine Verbesserungen erzielen, wobei im Netz Rhein-Neckar Variante 21 ($\beta = 1$ und $\tau = 0{,}25$) die gleiche Wertung wie Kirchhoff erhält und die Unterschiede aller einzelnen untersuchten Größen hier nicht signifikant voneinander

abweichen. Bei der Betrachtung der verschiedenen Varianten innerhalb des Box-Cox-Modells ergibt sich für Oberhausen mit Variante 19 ($\beta = 1$ und $\tau = 0{,}5$) das beste Ergebnis. Im Netz Rhein-Neckar schneidet Variante 21 ($\beta = 1$ und $\tau = 0{,}25$) am besten ab. Variante 19 liefert aber ebenfalls ein gutes Ergebnis, es ist nur 1/10 Punkt schlechter als jenes von Variante 21. Insgesamt kann für das Modell zusammengefasst werden, dass es mit dem Sensitivitätsparameter $\beta = 1$ und dem Transformationsparameter $\tau = 0{,}5$ gute Ergebnisse liefert, was im Übrigen auch der VISUM-Standardeinstellung entspricht.

Unter Anwendung des Lohse-Modells lassen sich für Oberhausen keine weiteren Verbesserungen erreichen. Für das Rhein-Neckar-Netz lässt sich jedoch mit diesem Modell das beste Ergebnis unter allen vier Aufteilungsmodellen erzielen. Dies gelingt mit einem Wert von zwei für den Parameter β. Für das Netz Oberhausen liefert der Wert $\beta = 4$ das beste Ergebnis innerhalb der Umlegungen mit dem Lohse-Modell. Dieses liegt aber mit 15,6 Punkten hinter dem Ergebnis des Logit-Modells von 16,7 Punkten. Insgesamt wird im Netz Oberhausen mit dem Logit-Modell mit $\beta = 0{,}15$ das beste Gesamtergebnis erzielt, im Netz Rhein-Neckar hingegen mit dem Lohse-Modell mit $\beta = 2$.

Bei der Betrachtung aller vier Aufteilungsmodelle ist festzustellen, dass die Ergebnisse um einen (Rhein-Neckar) bis zwei Punkte (Oberhausen) variieren. Betrachtet man die einzelnen Untersuchungsgrößen, liegen die Änderungen zwischen den Varianten in einem kleinen Bereich. Der mittlere absolute Fehler schwankt im Netz Oberhausen zwischen 54,7 und 60,4 und im Rhein-Neckar-Netz 43,1 und 46,6. Dies ist eine geringe Bandbreite. Sie ist zwar im Rahmen der Untersuchung im signifikanten Bereich, ist aber als gering einzuschätzen, besonders in Anbetracht der erheblichen Änderungen der Parameter.

Es ist zu beobachten, dass die mittlere Umsteigehäufigkeit und die mittlere Reiseweite bei ansteigendem Sensitivitätsparameter, wie zu erwarten ist, abnehmen. Es werden mit steigendem Parameter zunehmend kürzere Verbindungen mit weniger Umstiegen belastet. Die Bandbreite der Änderungen dieser beiden Werte ist in den Untersuchungsintervallen bei allen Aufteilungsmodellen ähnlich.

Das gute Ergebnis des Logit-Modells in Oberhausen kann darauf zurück geführt werden, dass es sich in Oberhausen im Vergleich zu der Region Rhein-Neckar um ein kleines Netz mit kurzen Reisezeiten handelt. Die mittlere Reisezeit beträgt in Oberhausen zirka 15 Minuten, in der Region Rhein-Neckar hingegen 20 Minuten, was auf die große Ausdehnung des Netzes mit Vermischung von Stadt- und Regionalverkehr zurückzuführen ist. Das Logit-Modell ist durch die Berücksichtigung der absoluten Widerstandsdifferenz charakterisiert und liefert bereits bei kleinen Differenzen von wenigen Minuten Unterschiede in der Fahrgastaufteilung. Da sich in Oberhausen die Verkehre in der Realität sehr stark auf die ÖPNV-Trasse konzentrieren, führt Logit hier zu einer realitätsnahen Abbildung. Bei größeren Reisezeiten, wie sie im Regionalver-

kehr des VRN-Netzes auftreten, wirken sich kleine Widerstandsunterschiede geringer auf das Verhalten der Fahrgäste aus, was das Logit-Modell wiederum schlecht abbildet. Hier bildet das Kirchhoff-Modell mit seiner Betrachtung der Widerstandsverhältnisse die realistischere Abbildung. Dieser Zusammenhang wird von den Untersuchungsergebnissen bestätigt, da das Kirchhoff-Modell im Netz Rhein-Neckar bessere Ergebnisse als das Logit-Modell liefert. Das Box-Cox-Modell bietet zwar eine Kombination der Eigenschaften von Kirchhoff und Logit, die Ergebnisse liegen aber auch jeweils nur in der Mitte zwischen den Werten von Kirchhoff und Logit.

Für rein städtische Netze mit einer Struktur wie Oberhausen ist damit das Logit-Modell zu empfehlen, für gemischt städtische und regionale Netze, wie die Region Rhein-Neckar, hingegen das Kirchhoff-Modell. Dies bestätigt auch die theoretischen Überlegungen in Kapitel 4, dass das Kirchhoff-Modell für kurze Wege, wie sie in Oberhausen gehäuft vorkommen, ungeeignet ist und das Logit-Modell hier eine bessere Aufteilung erzeugt. Bei Kenntnis der Raumstruktur ist von einer generellen Nutzung der Box-Cox Aufteilung abzuraten. Ist die Raumstruktur nicht bekannt oder nicht einzuschätzen, kann das Box-Cox-Modell eine Alternative sein, um eine falsche Anwendung des Kirchhoff- oder Logit-Modells zu vermeiden. Eine geringere Qualität des Ergebnisses muss dann in Kauf genommen werden. Im Netz Rhein-Neckar zeigen die Analyseergebnisse, dass sich die Umlegungsqualität durch Anwendung des Modells von Lohse noch über jene durch das Kirchhoff-Modell erreichte Qualität steigern lässt. Das Lohse-Modell bewertet die relative Abweichung zur optimalen Verbindung und führt insbesondere bei einer Mischung von großen und kleinen Entfernungen, wie sie in der Region Rhein-Neckar auftreten, zu einer verbesserten Aufteilung. Kleine Unterschiede spielen hier keine wesentliche Rolle. Das Lohse-Modell trägt dem Rechnung, indem längere Verbindungen, die sich nicht besonders stark unterscheiden, nahezu gleich verteilt belastet werden (vgl. Tabelle 7). Hinzu kommt, dass kleine Unterschiede bei kurzen Wegen genau wie kleine Unterschiede bei langen Wegen abgeschwächte Auswirkungen auf die Aufteilung haben. Dies ist in Abbildung 9 durch den zunächst zunehmenden Betrag der Steigung, der bei großen Widerstandsunterschieden aber wieder abnimmt, besonders gut zu erkennen. Dies entspricht dem Fahrgastverhalten im Regionalverkehr, ist in rein städtischen Gebieten aber kontraproduktiv. So erreicht das Lohse-Modell in der Analyse für das Netz Oberhausen keine guten Ergebnisse, belegt aber für die Region Rhein-Neckar den besten Platz.

Im vierten und fünften Schritt wird die Anpassung des Modells an die Umsteigesensitivität der Fahrgäste vorgenommen. Die Ergebnisse der Rechungen hierzu zeigen, dass die Werte für das untersuchte Intervall des Faktors Umsteigehäufigkeit gut gewählt wurden, da der bester Wert für Oberhausen mit acht Minuten und der beste Wert für die Region Rhein-Neckar mit zwölf Minuten in der Mitte der untersuchten Werte liegen. Die Werte von vier und 16 Minuten führen in beiden Netzen zu schlechten Ergebnissen. Der Wert der VISUM-Standardeinstellung von zehn Minuten ist gut gewählt. Zusätzlich

hierzu wird der Faktor Umsteigewartezeit untersucht. Hier zeigt sich ein differenziertes Bild: Für Oberhausen wird der Faktor zwei als bester Wert ermittelt, für die Region Rhein-Neckar hingegen der Faktor 1. Mit einer Auswirkung von nur 1/10 Punkt auf das Gesamtergebnis ist die Wirkung aber sehr gering und auch geringer als die Wirkung des Faktors Umsteigehäufigkeit, der einen Einfluss von 0,3 bis 0,7 Punkten besitzt. In städtischen Netzen mit kürzeren Fahrzeiten spielt die Umsteigewartezeit eine größere Rolle im Empfinden der Fahrgäste, die Umsteigehäufigkeit aber eine geringere. Bei insgesamt kurzer Fahrzeit in der Stadt wird eine Umsteigewartezeit eher als unangenehm empfunden als bei längeren Fahrzeiten in gemischt strukturierten Netzen wie der Region Rhein-Neckar, wo sie eher akzeptiert wird. Im vermischt strukturierten Netz wird der Umsteigevorgang selbst aber negativer bewertet. So ist hier das Ausmaß des Schadens bei verpasstem Anschluss meist erheblich größer als im dicht getakteten Stadtverkehr. Die Ergebnisse sind insgesamt plausibel und nachvollziehbar.

Nun werden im fahrplanfeinen Verfahren in den Schritten sechs und sieben die VISUM-Optionen „Ganglinienintervall feiner aufrastern“ und „Eigenständigkeit“ untersucht. Beim feineren Aufrastern der Ganglinienintervalle (siehe Kapitel 5.4.4) führt im Netz Rhein-Neckar eine Aufrasterung auf 20-Minuten-Intervalle zu einer Verbesserung des Umlegungsergebnisses, eine Aufrasterung auf 10-Minuten-Intervalle führt zwar zu einem besseren Ergebnis als keine Aufrasterung, ist jedoch etwas schlechter als die 20-Minuten-Aufrasterung. Im Netz Oberhausen ergibt sich für die 20-Minuten-Aufrasterung kein signifikanter Unterschied zur Umlegungsqualität ohne Aufrasterung. Die Aufrasterung auf ein 10-Minuten-Intervall führt auch hier zu einer Verschlechterung. Das bessere Abschneiden der 20-Minuten-Aufrasterung gegenüber der feineren 10-Minuten-Aufrasterung ist damit zu erklären, dass in beiden Netzen ein Teil der Linien in einem 20-Minuten-Takt verkehren. Dies führt dazu, dass die Fahrten solcher Linien in den Rastern einer 10-Minuten-Rasterung, in denen sie nicht stattfinden mit einem höheren Widerstand belegt werden und andere, ggf. schlechtere, Fahrten bevorzugt belastet werden, was in der Realität nicht geschieht. Bei einem 20-Minuten-Raster liegt von allen Linien, die im 20-Minuten-Takt oder häufiger verkehren, in jedem Intervall eine Fahrt, so dass eine neutrale Bewertung gegenüber Linien mit einem 10-Minuten-Takt erfolgt. Seitens der Fahrgäste werden Linien im 20-Minuten-Takt demnach nicht pauschal schlechter bewertet als solche mit einem 10-Minuten-Takt. Eine schlechtere Bewertung noch seltener verkehrenden Linien ist wiederum angemessen und auch in regionalen Netzen nicht von Nachteil. Da in Oberhausen nur wenige Linien selten verkehren, entsteht ohne Aufrastern kein großer Nachteil. Eine sinnvolle Einstellung der Rasterung steht mit dem Takt der Linien eines Netzes im Zusammenhang. Für städtische und vermischt strukturierte Netze, in denen neben einem 10-Minuten-Takt auch ein 20-Minuten-Takt und seltener verkehrende Linien bestehen, ist eine Aufrasterung auf 20-Minuten-Intervalle zu empfehlen.

Die abschließende Untersuchung der Eigenständigkeit (siehe Kapitel 3.3.5) ergibt, dass ein Abschalten dieser Option im Rhein-Neckar Netz zu einer leichten Verschlechterung des Ergebnisses führt, im Netz Oberhausen ist der Unterschied nicht signifikant. Es kann demnach empfohlen werden, die Eigenständigkeit gemäß der VISUM-Standardeinstellung einzuschalten.

Auf die Betrachtung der ausgewählten Strecken zwischen Mannheim und Heidelberg sowie Oberhausen-Sterkrade und Oberhausen Hauptbahnhof wurde nicht für jede Variante im Einzelnen eingegangen, da sie sich ihrer Tendenz nach bei allen Untersuchungen genau wie die Gesamtbewertung verhalten. Für die jeweils beste Variante beider Netze ist in Anhang E die Differenz der Netzbelastung von fahrplanfeiner Umlegung und Direktumlegung dargestellt.

Für das Netz Oberhausen erreicht die insgesamt beste Variante 14 in der Gesamtwertung 16,7 von 30 möglichen Punkten. Der absolute mittlere Fehler liegt bei 54,9 Fahrgästen/Strecke und der mittlere relative Fehler bei 13,8%. Die Abweichungen von der Direktumlegung sind deutlich. Die beste Variante für das Netz der Region Rhein-Neckar (Variante 32) erreicht 18,8 Punkten. Der absolute mittlere Fehler liegt bei 40,4 Fahrgästen/Strecke und der mittlere relative Fehler bei 8,9%. Das Ergebnis ist deutlich besser als das von Oberhausen und unabhängig davon mit einem mittleren relativen Fehler unter 10% als gut zu beurteilen. Der größere Fehler des Netzes Oberhausen ist damit zu erklären, dass in der zur Bewertung und zum Vergleich herangezogen Direktumlegung reine SPNV-Fahrten ohne Vor- oder Nachlauf im Bus- oder Straßenbahnverkehr nicht erhoben worden sind und eine Kompensation dieser Abweichungen durch Anpassung der Umlegung aufwändig ist. Bei der Untersuchung wurden nur globale Größen verändert, die sich auf das gesamte Netz gleichmäßig auswirken. Mit einer Anpassung von Widerständen einzelner SPNV-Strecken im Netz ist es möglich, den Fehler stärker zu kompensieren und bessere Ergebnisse zu erzielen. Hierauf wurde zum einen auf Grund des zusätzlichen Aufwands verzichtet. Zum anderen, da diese individuelle Anpassung ohnehin nicht auf andere Netze übertragbar ist und somit keine weiteren verwertbaren Aussagen zur Erreichung des Zieles dieser Arbeit beiträgt.

5.6 Untersuchung der taktfeinen Umlegung

Für das taktfeine Umlegungsverfahren stehen auf Grund seiner Charakteristik weniger Möglichkeiten der Parametrierung als bei der fahrplanfeinen Umlegung zur Verfügung. Außerdem soll ein Vergleich zwischen taktfeinem und fahrplanfeinem Verfahren angestellt werden. Daher wird eine zweckmäßige Parametrierung aus der theoretischen Abhandlung des taktfeinen Verfahrens (siehe Kapitel 3.2), den Ergebnissen der fahrplanfeinen Umlegung und Erfahrungen der PTV abgeleitet.

5.6.1 Suche

Koordinierungen von Linien oder Anschlüssen sind im Modell nicht explizit als solche modelliert und können daher auch nicht berücksichtigt werden (siehe Kapitel 3.2.3). Da bei der taktfeinen Umlegung Suche und Aufteilung gleichzeitig stattfinden, ist es möglich, die Laufzeit der Suche zu verkürzen, indem diese für Wege mit sehr geringer Belastung abgebrochen wird. Die VISUM-Standardkonfiguration sieht einen Abbruch bei einer Belastung einer Route von weniger als 1/1000 der Gesamtbelastung zwischen zwei Verkehrszellen vor. Der Wert erscheint sinnvoll und wird beibehalten. Außerdem werden dominierte Routen gelöscht (siehe Kapitel 3.2.2).

5.6.2 Widerstand

Beim Widerstand werden analog zum fahrplanfeinen Verfahren die gleichen Parameter berücksichtigt:

- Faktor Verkehrssystemspezifischer Widerstand
- Faktor Umsteigehäufigkeit
- Faktor Umsteigewartezeit

Es wird jeweils derjenige Wert gewählt, der bei der fahrplanfeinen Umlegung das beste Ergebnis liefert, um eine Vergleichbarkeit herzustellen und einen erneuten aufwändigen Iterationsprozess zu vermeiden. Es ist anzunehmen, dass die Widerstandsgrößen unabhängig vom Verfahren sind, da sie das Verhalten der Fahrgäste darstellen und dieses unabhängig vom Verfahren ist. So ist zu erwarten, dass jene Parametrierung, die in der fahrplanfeinen Umlegung das Fahrgastverhalten gut abbildet auch in der taktfeinen Umlegung zu guten Ergebnissen führt.

Parameter	Wert Netz Oberhausen	Wert Netz Rhein-Neckar
Faktor Verkehrssystemspez. Widerstand	Bus = Strab = 1 / SPNV = 3	Bus = Strab = SPNV
Faktor Umsteigehäufigkeit	2	1
Faktor Umsteigewartezeit	8	12

Tabelle 12: Parametrierung der Widerstände für die taktfeine Umlegung

5.6.3 Untersuchungsbasis

Zusätzlich zu Suche und Widerstand bietet VISUM bei der taktfeinen Umlegung an, den mittleren Takt einer Linie auf zwei unterschiedliche Weisen aus dem Fahrplan zu berechnen (siehe Kapitel 3.2.1). Bei dieser Untersuchung wird der verbesserte Ansatz „Zeitintervall aus mittlerer Wartezeit gemäß Fahrplan“[47] zur Anwendung gebracht. Der Takt wird immer für eine volle Stunde berechnet, da auch die Erhebungsdaten in dieser Rasterung vorliegen.

5.7 Analyse und Auswertung der taktfeinen Umlegung

Für das Netz Oberhausen erreicht die taktfeine Umlegung in der Gesamtwertung 12,5 Punkte. Das Ergebnis bleibt hinter der besten Variante der fahrplanfeinen Umlegung mit 16,7 Punkten (Variante 14) zurück, liefert jedoch ein besseres Ergebnis als die schlechteste Variante der fahrplanfeinen Umlegung mit 11,9 Punkten (Variante 5). Auf Grund der vereinfachten Berücksichtigung des ÖPNV-Angebotes im Vergleich zum exakten fahrplanfeinen Verfahren wurde ein solches Ergebnis erwartet. Der mittlere absolute Fehler liegt bei der taktfeinen Umlegung bei 63,2 Fahrgästen und bei der besten ermittelten fahrplanfeinen Umlegung bei 54,9 Fahrgästen. Der mittlere relative Fehler bleibt mit 15,9% hinter dem Wert der fahrplanfeinen Umlegung von 13,8% zurück. In Anhang E ist die Differenz der Streckenbelastungen von taktfeiner Umlegung und Direktumlegung im Netz dargestellt. Es ist festzustellen, dass Bus- und Straßenbahnlinien zu stark belastet werden und der SPNV mit der S-Bahn zu schwach belastet wird. Besonders deutlich wird dies bei den ausbrechenden Verkehren in Richtung Essen und Mülheim. Zwei im Südosten verkehrende Buslinien von Oberhausen Hbf und von der „Neuen Mitte“ in Richtung Essen sind mit rund 400 Fahrgästen zu stark belastet, auch die Straßenbahnlinie nach Mülheim ist mit etwa 300 Fahrgästen zu viel belastet. Die S-Bahn-Verbindung in Richtung Süden und Südosten ist hingegen mit rund 1000 Fahrgästen zu wenig belastet. Im fahrplanfeinen Verfahren ist die Abweichung auf diesen Strecken etwa halb so groß. Die genaue Charakterisierung jeder Verbindung mit einem Widerstand mit der anschließenden Anwendung eines Aufteilungsmodells ist offensichtlich in der Lage das Streben des Fahrgastes nach schnellen und direkten Verbindungen erheblich besser darzustellen. Trotzdem sind die Ergebnisse der taktfeinen Umlegung insgesamt besser und näher an denen der fahrplanfeinen Umlegung als erwartet.

Außerdem ist festzustellen, dass die Rechenzeit der taktfeinen Umlegung bei stundenfeiner Aufrasterung im Netz Oberhausen etwa zwölf Mal höher ist als bei der fahrplanfeinen Umlegung. Die Hypothese, dass die taktfeine Umlegung auf Grund ihrer vereinfachten Berücksichtigung der Realität schneller berechnet werden kann, ist damit widerlegt. Die Rechenzeit ist im Gegensatz zum fahrplanfeinen Verfahren nicht von der Anzahl der Fahrten abhängig, sondern von der Anzahl der Fahrzeitprofile. In einem Fahrzeitprofil werden Fahrten gleicher Route und gleicher Fahrzeit zusammengefasst. Sind sehr viele Fahrten in wenigen Fahrzeitprofilen zusammengefasst, ist die Rechenzeit kürzer, als wenn jeweils wenige Fahrten zu einem Fahrzeitprofil gehören und die Anzahl der Fahrzeitprofile entsprechend hoch ist. Aus jedem Fahrzeitprofil wird der mittlere Takt bestimmt. Anschließend werden alle Fahrzeitprofile bei der Routensuche und -belastung vom Algorithmus berücksichtigt. Dabei ist es für die Rechenzeit unerheblich, wie viele Fahrten ein Fahrzeitprofil enthält. Der Zeitaufwand der Berechnung kann reduziert werden, indem die Anzahl der Zeitintervalle reduziert wird. Die Suchzeit

[47] Siehe hierzu auch PTV AG, VISUM Benutzerhandbuch (2006), S. 7-179 f.

verhält sich nahezu proportional zur Anzahl der Zeitscheiben. Durch eine sinnvolle Wahl von Zeitscheiben entsprechend der Verkehrszeiten des ÖPNV-Angebots kann beispielsweise mit sechs statt 24 Zeitintervallen die Rechenzeit auf ein Viertel reduziert werden. Überschlägig sind das für Oberhausen rund fünfeinhalb Stunden, was eine praktische Anwendung des Verfahrens ermöglicht. Vom vollständigen Verzicht auf Zeitscheiben wird dringend abgeraten, da eine zusätzliche Umlegungsrechnung im Netz Oberhausen für diesen Fall ein derart schlechtes Ergebnis geliefert hat, dass eine sinnvolle Auswertung mit dem Bewertungsverfahren nicht mehr möglich war. Für viele Bewertungsgrößen haben sich hier sogar negative Bewertungen ergeben. Bei der Betrachtung der Ergebnisse von fahrplanfeiner Umlegung, taktfeiner Umlegung mit Zeitscheiben und taktfeiner Umlegung ohne Zeitscheiben im Korrelationsdiagramm der VISUM-Umlegungsanalyse (siehe Anhang F) ist der Unterschied deutlich erkennbar. Bei vollständiger Korrelation liegen alle Punkte auf der Diagonalen, die zunehmende Größe der Wolke zeigt eine abnehmende Korrelation und damit ein Sinken der Qualität des Umlegungsergebnisses. Während der Unterschied zwischen dem fahrplanfeinen Verfahren und dem taktfeinen Verfahren mit Zeitscheiben gerade im erkennbaren Bereich liegt, ist der Unterschied zum taktfeinen Verfahren ohne Zeitscheiben deutlich zu erkennen. Das Ergebnis des taktfeinen Verfahrens ohne Zeitscheiben ist erheblich schlechter. Von einer Verwendung in Planungsprojekten ist abzuraten.

Im vermischt ländlich und städtisch geprägten Netz der Region Rhein-Neckar verlief die Durchführung der taktfeinen Umlegung erfolglos. Der Rechenaufwand war zu groß und der Arbeitsspeicher von 2,4 GB reichte nicht aus, um eine Umlegungsrechnung auszuführen. Dies ist darauf zurück zu führen, dass in ländlichen Räumen viele Linien mehrere Fahrwege, z.B. zur zeitweisen Bedienung von Schulen enthalten, und damit eine Vielzahl verschiedener Fahrzeitprofile existieren. Durch das insgesamt im Vergleich zu städtischen Räumen eher geringe Fahrtenangebot enthält jedes Fahrzeitprofil nur wenige Fahrten. Im Rhein-Neckar-Netz führt diese Tatsache zusammen mit der insgesamt großen Netzgröße zu einer Datenstruktur, die von VISUM auf einem gewöhnlichen Arbeitsplatzrechner nicht mehr bewältigt werden kann. Beim fahrplanfeinen Verfahren wird jede Fahrt mit genauer Abfahrtszeit einzeln berücksichtigt, so dass die Anzahl der Fahrzeitprofile hier nicht relevant ist. Für Fahrzeitprofile mit vereinzelten Fahrten ist es ohnehin nicht sinnvoll einen Takt zu berechnen. Im Rhein-Neckar-Netz beinhaltet ein Fahrzeitprofil im Mittel knapp vier Fahrten. In den Großstädten gibt es Fahrzeitprofile mit bis zu 100 Fahrten, etliche Fahrzeitprofile im Regionalverkehr besitzen hingegen nur eine einzige Fahrt. Durch die Berechnung eines mittleren Taktes aus in der Realität einzelnen, ungetakteten Fahrten ist außerdem ein größerer Fehler als in Netzen mit vollständigem Taktverkehr, wie der Stadt Oberhausen, zu erwarten. Auf Grund dieser Struktur ist das taktfeine Verfahren nicht zu empfehlen. Einzig eine fahrplanfeine Umlegung ist unter diesen Bedingungen sinnvoll und obendrein schneller zu berechnen.

Die taktfeine Umlegung liefert im Netz Oberhausen eine akzeptable Annäherung an das Ergebnis der fahrplanfeinen Umlegung und die Direktumlegung. Für ländliche Netze mit Linien ohne Taktverkehr führt sie zu einem erheblich größeren Rechenaufwand als das fahrplanfeine Verfahren. Sie kann die fahrplanfeine Umlegung nicht ersetzten, stellt aber eine sinnvolle Erweiterung der Planungswerkzeuge dar. Liegen für ein Netz keine Fahrplandaten vor, ist das taktfeine Verfahren zu empfehlen. Sind Fahrplandaten verfügbar sollte jedoch immer die fahrplanfeine Umlegung angewandt werden, um hochwertigere Ergebnisse bei geringerer Rechenzeit zu erhalten.

6 Empfehlung eines Vorgehens für vergleichbare Umlegungen

Aus den Ergebnissen der Wirkungsanalyse wird ein Vorgehen zur Durchführung von Umlegungen in konkreten Verkehrsplanungsprojekten abgeleitet. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Ergebnisse nur eine Aussagekraft in einem begrenzten Umfang besitzen. Aus Gründen der Praktikabilität der Untersuchungen konnten in dieser Arbeit nur zwei Referenznetze untersucht werden und auch die Anzahl der Untersuchungsschritte wurden für jedes Netz auf 33 Umlegungsrechnungen eingeschränkt. Dadurch ist die Stichprobe grundsätzlich zu gering, um eindeutige Ergebnisse zu erhalten und eine eindeutig beste Umlegungsparametrierung zu ermitteln. Darüber hinaus ist die Raumstruktur als wesentliches Merkmal eines Untersuchungsgebiets von Bedeutung und wird in der Praxis in jedem Untersuchungsgebiet variieren. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Untersuchungsräume ist deswegen eingeschränkt.

Trotzdem sind Tendenzen klar hervorgetreten und eine Unterscheidung zwischen sinnvollen und nicht sinnvollen Einstellungen von Parametern ist möglich. Das Ziel dieser Arbeit, eine Empfehlung für eine sinnvolle Parametrierung zu geben, wird erreicht. Bei den Ergebnissen dieser Arbeit ist auf Grund der verschiedenen Raumstruktur der Referenznetze zwischen einem städtischen Raum und einem sowohl städtisch als auch ländlich geprägten Raum zu unterscheiden. Bei der Betrachtung der Ergebnisse wird zwischen diesen beiden Strukturtypen differenziert. Empfehlungen können sich nur auf gleichartige Gebiete beziehen, da im Rahmen dieser Diplomarbeit auf Grund des geringen Stichprobenumfangs keine hinreichend genaue Aussage über die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andersartige Gebiete getroffen werden kann.

Durch den schematisch wissenschaftlichen Aufbau der VISUM-Software und der getrennten Abbildung der formalen Schritte der Verkehrsumlegung sind die gewonnenen Ergebnisse nicht auf die Anwendung in dieser Software beschränkt, sonder können auch auf andere Software übertragen werden.

Soll in einem Netz eine Umlegung durchgeführt werden, ist zunächst festzustellen, wie der betreffende Raum strukturiert ist und eingeordnet werden kann. Außerdem muss überprüft werden, ob Fahrplandaten im Netz vorhanden sind oder mit vertretbarem Aufwand eingepflegt bzw. aus anderen Systemen übernommen werden können. Sind Fahrplandaten verfügbar, können genauere Rechenergebnisse bei geringerer Rechenzeit realisiert werden. Ohne Fahrplandaten sind Abschätzungen von Netzbelastungen möglich, genaue Ergebnisse können aber nicht erzielt werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit haben gezeigt, dass mit dem taktfeinen Verfahren ohne Fahrplandaten bei der Netzbelastung mit einer mittleren relativen Abweichung von günstigstenfalls 15% zu rechnen ist. Wenn Fahrplandaten verfügbar sind, ist das fahr-

planfeine Umlegungsverfahren auszuwählen. Nur hiermit lassen sich Ergebnisse mit einer mittleren relativen Abweichung von unter 10% erzielen. Das taktfeine Umlegungsverfahren, welches mit Daten zu Linienwegen und mittlerem Takt je Verkehrszeit auskommt und keine Fahrplandaten benötigt, ist nur für überschlägige Planungen zu empfehlen. Es ist insbesondere dann sinnvoll anzuwenden, wenn beispielsweise für verschiedene Planfälle im „ersten Wurf“ ein Ergebnis abgeschätzt werden soll und auf die aufwändige Erstellung eines Fahrplans verzichtet werden kann.

Soll das fahrplanfeine Verfahren durchgeführt werden, ist eine erste Umlegungsrechnung mit der folgenden Parametrierung, differenziert nach städtischen Netzen und vermischt städtisch und ländlich geprägten Netzen, zu empfehlen:

VISUM-Menü / Parameter	**städtische Struktur**	**vermischte Struktur**
Suche: Suchverfahren	Branch&Bound	Branch&Bound
Suche / Vorauswahl: Faktor Verbindung verwerfen	2	2
Suche / Vorauswahl: Zuschlag Verbindung verwerfen	12min	12min
Suche / Vorauswahl: Zusätzliche Umstiege	3	3
Widerstand: Zeitzuschlag für Umstieg	8min	12min
Widerstand: Faktor Umsteigewartezeit	2	1
Wahl: Aufteilungsmodell	Logit	Lohse
Wahl: Sensitivitätsparameter β	0,15	2
Wahl: Eigenständigkeit verwenden	Ja	Ja
Basis: Ganglinienintervalle feiner aufrastern	Ja, 20min	Ja, 20min

Tabelle 13: Empfohlene Parametrierung für fahrplanfeine Umlegungen

Die Werte in der Tabelle haben für die Referenznetze Oberhausen und Region Rhein-Neckar unter allen Untersuchungsvarianten die besten Umlegungsergebnisse geliefert. Auf ähnliche Netze übertragen kann eine Umlegung mit den Werten der Tabelle ein erstes Ergebnis bringen. Dieses wird zunächst eine gute Annäherung liefern, jedoch keinesfalls ein Optimum darstellen. Hierzu sind individuelle Einflüsse und Unterschiede zu den Referenznetzen zu groß und zu einflussreich. Soll ein gutes Umlegungsergebnis berechnet werden, ist es notwendig, weitere Umlegungsrechnungen unter Änderung bestimmter Parameter durchzuführen und deren Ergebnisse miteinander zu vergleichen. Dies ist notwendig, um die Umlegungsparameter an der Direktumlegung zu eichen und anschließend in Umlegungen für Planfälle gute Ergebnisse zu erzielen. Um den hierdurch entstehenden Aufwand zu begrenzen, sind Veränderungen des Parameters „Faktor Umsteigehäufigkeit“ und des Sensitivitätsparameters β des Aufteilungsmodells als wirkungsvollste Handlungen zu empfehlen. In Netzen vermischt städtischer und ländlicher Struktur kann das Lohse-Aufteilungsmodell versuchsweise durch das Kirchhoff-Modell ersetzt werden. Für ersteren Parameter sind Werte zwischen sechs und 14 Minuten gemäß den Ergebnissen dieser Arbeit geeignet. Der Wert dient dazu,

die Sensitivität der Fahrgäste auf Umsteigevorgänge korrekt abzubilden. Die Größe des Sensitivitätsparameters hängt vom jeweiligen Aufteilungsmodell ab. Er bildet die Sensitivität der Fahrgäste gegenüber Umwegfahrten ab. Die folgende Tabelle gibt darüber hinaus einen Überblick der Werte, die für jedes untersuchte Aufteilungsmodell die besten Ergebnisse geliefert haben und in welchem Bereich insgesamt sinnvolle Ergebnisse möglich sind:

Aufteilungsmodell	**Bester Wert in der Analyse**	**Intervall sinnvoller Werte**
Kirchhoff	$\beta = 8$	$\beta = 4 \ldots 12$
Logit	$\beta = 0{,}15$	$\beta = 0{,}075 \ldots 0{,}3$
Box-Cox	$\beta = 1$ / $\tau = 0{,}5$	$\beta = 0{,}25 \ldots 4$ / $\tau = 0{,}25 \ldots 0{,}75$
Lohse	$\beta = 2$	$\beta = 1 \ldots 4$

Tabelle 14: Empfohlene Parametrierung der Aufteilungsmodelle

Um den Aufwand einer, wie in dieser Arbeit durchgeführten, besonderen Bewertung einer Vielzahl von Größen zu vermeiden, ist besonders die Betrachtung der Größen Umsteigehäufigkeit und mittlere relative Abweichung sowie mittlere absolute Abweichung der Streckenbelastung anzuraten. Zur Ermittlung letztgenannter Größen muss eine VISUM-Umlegungsanalyse berechnet werden, was jedoch nur wenige Minuten Zeit in Anspruch nimmt und bei der Einschätzung der Qualität einer Umlegung hilfreich ist.

Für die taktfeine Umlegung empfiehlt es sich, die Parameter des Widerstandes in der gleichen Größenordnung wie jene des fahrplanfeinen Verfahrens zu wählen. Da dieses Verfahren ohnehin eine Annäherung bildet, ist eine exakte Parametrierung hier von geringerer Bedeutung als bei der präzisen fahrplanfeinen Umlegung.

7 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit werden verschiedene Verfahren zur Durchführung der Verkehrsumlegung im ÖPNV als ein Bestandteil des Vier-Stufen-Modells der Verkehrsplanung untersucht. Analysiert werden Ergebnisse von Verkehrsumlegungen, die mit der Verkehrsplanungs- und Analysesoftware VISUM der PTV AG durchgeführt wurden. Aus den Ergebnissen konnten sinnvolle Suchverfahren, Aufteilungsmodelle und deren Parametrierungen ermittelt und für die Anwendung in zukünftigen Projekten der Verkehrsplanung im ÖPNV empfohlen werden. In diesen Projekten ist es mit den Ergebnissen dieser Diplomarbeit möglich, mit geringerem Zeitaufwand hochwertige Umlegungsergebnisse als Planungsgrundlage zu erhalten.

Der Einsatz von modernen Arbeitsplatzrechnern ermöglicht es, Umlegungen für Netze in beachtlicher Größe von mehreren tausend Verkehrszellen innerhalb weniger Stunden zu berechnen und schnell gute Ergebnisse zu erhalten. Trotzdem ist festzustellen, dass einige Rechenverfahren, wie die taktfeine Umlegung, ab einer gewissen Netzgröße an ihre Grenzen stoßen. Die Weiterentwicklung der EDV-Systeme und die schnell steigende Rechenleistung werden es ermöglichen, in Zukunft auch mit rechenintensiven Verfahren sehr große Netze in kurzer Zeit zu berechnen. Daraus ergeben sich weiter reichende Möglichkeiten, die Qualität von Umlegungsergebnissen weiter zu steigern und auch rechenaufwändige neue Werkzeuge in das Portfolio des Verkehrsplaners aufzunehmen. Eine genauere Untersuchung des – je nach Netzstruktur – rechenaufwändigen taktfeinen Umlegungsverfahrens kann für Planungsprojekte interessant sein. Die Präzisierung von Ergebnissen durch ein Iterationsverfahren in mehreren Netzen, wie es in dieser Arbeit für das fahrplanfeine Verfahren durchgeführt wurde, ist wünschenswert.

Neben dem Einfluss des Verfahrens und der Parametrierung sei an dieser Stelle auch auf die Qualität und den Detaillierungsgrad des Netzes hingewiesen. Selbst bei einer optimalen Einstellung der Globalparameter des Gesamtnetzes weisen die Umlegungsergebnisse eine gewisse Abweichung gegenüber der Realität auf. Um diesen Fehler weiter zu reduzieren, ist es nötig, einzelne strecken- oder verkehrszellenspezifische Einstellungen im Netz vorzunehmen. Dies ist im Gegensatz zur Wahl der Globalparameter mit einem erheblichen Aufwand verbunden, sollte aber – je nach Anforderung an die Genauigkeit des Ergebnisses – nicht vernachlässigt werden.

Die weitere Arbeit besteht in Zukunft darin, die Empfehlungen für Umlegungsverfahren und insbesondere deren Parametrierung in weiteren Untersuchungen in anderen Netzen ähnlicher Struktur zu präzisieren und den Stichprobenumfang zu erhöhen. Mit den so erzeugten Daten ist es möglich, eine allgemeine Gültigkeit der in dieser Arbeit ermittelten Aussagen zu bestätigen. Dabei ist der Bereich der Parametrierung, in dem sinnvolle Ergebnisse erzielt werden können, nun abgesteckt. Zukünftige Auswertungen können für die Parameter mit kleineren Untersuchungsintervallen arbeiten. Es lässt sich

so bei gleichem Aufwand durch einen geringeren Abstand der Parameter in den Umlegungsrechnungen eine genauere Aussage zu den optimalen Werten der Parameter treffen. Da mit dem fahrplanfeinen Verfahren die genauesten Ergebnisse erzielt werden können, ist besonders eine weitere Untersuchung dieses Verfahrens zu empfehlen.

Außerdem ist es anzustreben, die Untersuchung auf Netze mit rein regionaler Struktur auszudehnen, um auch für diese Netze Empfehlungen geben zu können. Das ist besonders für Projekte zur Erstellung von Nahverkehrsplänen in überwiegend ländlich geprägten Landkreisen ohne Großstädte interessant.

Literaturverzeichnis

Falkenhausen, H. von (1967): Ein stochastisches Modell zur Verkehrsumlegung, in: Bundesministerium für Verkehr (Hrsg): Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 1969-58, Bonn, 1967

Friedrich, M. (2003): Multimodal Transportation Planning, Institut für Straßen- und Verkehrswesen Universität Stuttgart, Vorlesungsmaterial WS2003/04

Friedrich, M. (2003): Verkehrsplanung I, Institut für Straßen- und Verkehrswesen Universität Stuttgart, Vorlesungsmaterial WS2003/04

Friedrich, M. (2003): Verkehrsplanung II, Institut für Straßen- und Verkehrswesen Universität Stuttgart, Vorlesungsmaterial WS2003/04

Koormann, F. (1997): Nichtvisuelle Analysemöglichkeiten, Universität Osnabrück, Fachbereich Mathematik/Informatik, http://www.usf.uos.de/~fkoorman/diplom/arbeit/node76.html, Stand: 16.01.1997

Lätzsch, L. (1997): Die Wirkungsweise deterministischer und stochastischer Modelle zur Umlegung des individuellen Kraftfahrzeugverkehrs bei Straßennetzberechnungen, in: Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr TU Dresden (Hrsg.): Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, Heft 4/1997, Dresden 1997

PTV AG (2006): VISUM Benutzerhandbuch, Version 9.5, Karlsruhe, 2006

Schaechterle, K.; Braun, J. (1977): Vergleichende Untersuchung vorhandener Verfahren für Verkehrsumlegungen unter Verwendung elektronischer Rechenanlagen, in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundesministers für Verkehr und der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e.V. (Hrsg.), Heft 222, Bonn 1977

Schiller, C. (2004): Integration des ruhenden Verkehrs in die Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung, in: Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr TU Dresden (Hrsg.): Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, Heft 8/2004, Dresden 1997

Schnabel, W.; Lohse, D. (1997): Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung, 2., neu bearbeitete Auflage, Berlin, 1997

Scholles, F. (2006): Die Nutzwertanalyse und ihre Weiterentwicklung, Institut für Umweltplanung, Abt. Landesplanung und Raumforschung, Universität Hannover, http://www.laum.uni-hannover.de/ilr/lehre/Ptm/Ptm_BewNwa.htm, Stand: 28.06.2006

Schulz, M.; Meinhold C. (2003): Quantifizierung des Schienenbonus, in: Der Nahverkehr, Heft 6/2003 , 21. Jahrgang (2003), S. 26

Intraplan / **Heimerl (2006):** Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des ÖPNV und Folgekostenrechnung - Version 2006 – Verfahrensanleitung, Berlin, 2006

Treiber, M. (2007): Grundlagen der Theoretischen Verkehrsplanung, Institur für Wirtschaft und Verkehr, Technische Universität Dresden, Skript zur Vorlesung SS2007

Ueberschaer, M. (1969): Die Aufteilung der Verkehrsströme auf verschiedene Fahrtwege (Routen) in Stadtstraßennetzen aufgrund der Straßen- und Verkehrsbedingungen beim morgendlichen Berufspendelverkehr, in: Bundesministerium für Verkehr (Hrsg): Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 1969-44, Bonn, 1969

Vrtic, M., K.W. Axhausen, R.Maggi und F. Rossera (2003): Verifizierung von Prognosemethoden im Personenverkehr, im Auftrag der SBB und dem Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), IVT, ETH Zürich und USI Lugano, Zürich und Lugano, 2003

Wermuth, M. (1994): Modellvorstellungen zur Prognose. In Steierwald, G., Künne, H.-D. (Hrsg): Straßenverkehrsplanung – Grundlagen - Methoden – Ziele, Springer Verlag, Berlin 1994

Anhang A: Tabelle Vergleich der Aufteilungsmodelle

Modell	Parameter β	Parameter τ
Kirchhoff	6	-
Logit	0,3	-
Box-Cox	1	0,5
Lohse	√6	-

Tabelle 15: Parametrierung der Aufteilungsmodelle zur Erstellung der Vergleichstabellen

Anhang B: Tabellen zur Sensitivitätsanalyse

Versuchsschritt	Pkte. V0	Pkte. V1	Pkte. V2	Pkte. V3	Pkte. V4	Pkte. V5
Verwendete Parametrierung	**13,3**	**14,6**	**15,5**	**13,6**	**11,9**	**13,1**
Verdopplung $f(a_0) = 0$	16,9	17,6	18,0	17,0	16,2	16,8
Halbierung $f(a_0) = 0$	5,6	8,3	10,1	6,2	2,8	5,3
Gleichgewichtung	16,8	18,3	19,3	16,8	14,3	15,7
Doppelte Gewichtung Block 1	20,9	22,1	22,9	21,1	19,7	20,9
Doppelte Gewichtung Block 2	18,6	21,3	23,2	19,2	15,6	18,1
Doppelte Gewichtung Block 3	13,8	15,1	16,0	14,0	12,3	13,5

Tabelle 16: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse, Bewertungspunkte gemäß Bewertungssystem

Versuchsschritt	Rang V0	Rang V1	Rang V2	Rang V3	Rang V4	Rang V5
Verwendete Parametrierung	**4**	**2**	**1**	**3**	**6**	**5**
Verdopplung $f(a_0) = 0$	4	2	1	3	6	5
Halbierung $f(a_0) = 0$	4	2	1	3	6	5
Gleichgewichtung	3	2	1	3	6	5
Doppelte Gewichtung Block 1	4	2	1	3	6	4
Doppelte Gewichtung Block 2	4	2	1	3	6	5
Doppelte Gewichtung Block 3	4	2	1	3	6	5

Tabelle 17: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse, Rangfolge der Varianten

Anhang C: Abbildungen Struktur der Referenznetze

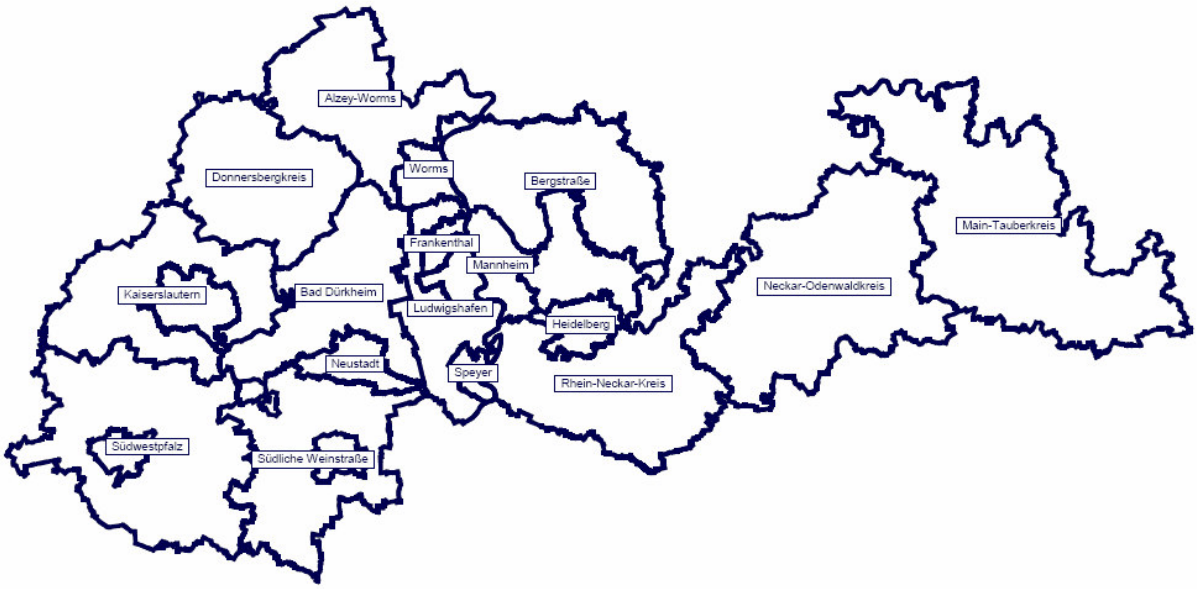


Abbildung 10: Gebiet des Verkehrsverbundes Rhein-Neckar (VISUM-Darstellung)

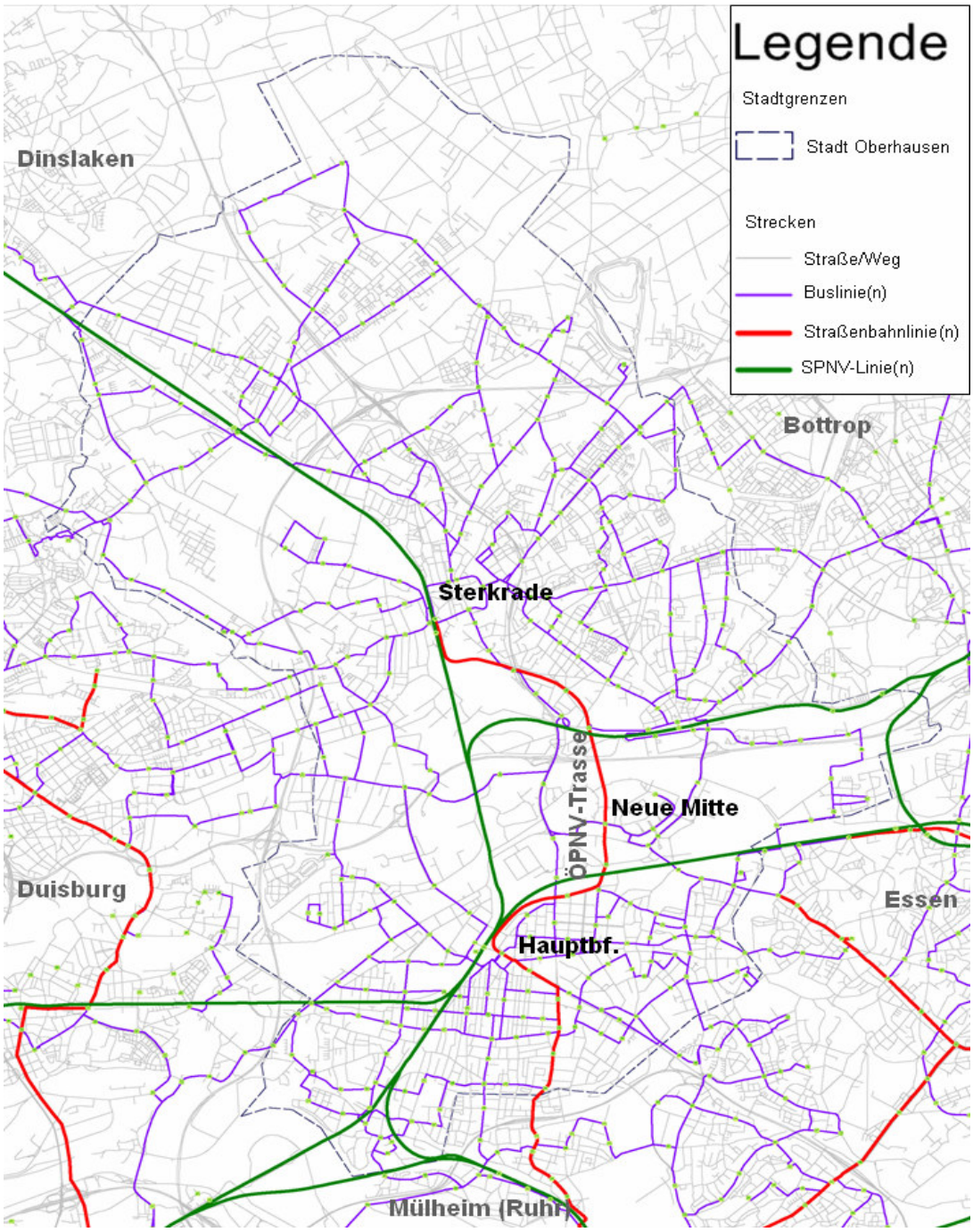


Abbildung 11: Gebiet der Stadt Oberhausen mit dargestelltem ÖPNV-Netz (VISUM-Darstellung)

Anhang D: Ergebnistabellen

Parameter	Wahlmöglichkeiten	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20	V21	V22	V23	V24	V25	V26	V27	V28	V29	V30	V31	V32	V33	Taktf.
Widerstand Verkehrssystem Bus		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Widerstand Verkehrssystem Strab		1	1	1	1,2	1,5	1,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Widerstand Verkehrssystem SPNV		1	2	3	3	3	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Suche und Vorauswahl	Siehe Tabelle 9	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B2	B3	K1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	-
Wahlmodell	Kirchhoff / Logit / Box-Cox / Lohse	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	Lg	Lg	Lg	Lg	BC	BC	BC	BC	BC	Lo	Lo	Lo	Lo	Lo	Lg	Lg	Lg	Lg	Lg	Lg	Lg	-
Parameter Beta	4 / /8 / 12 / 16 / bzw. Quadratwurzeln	8	8	8	8	8	8	8	8	8	4	12	16	0,075	0,15	0,3	0,9	1	0,25	1	4	1	1	2	2,8284	3,4641	4	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	-
Parameter Teta (nur Box-Cox)	0,75 / 0,5 / 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75	0,50	0,50	0,50	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Faktor Umsteigehäufigkeit	4min / 8min / 12min / 16min	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	4	12	16	8	8	8	8	8
Faktor Umsteigewartezeit	1 / 2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
Ganglinieninterv. f. aufrastern	Nein / 20min / 10min	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	10	20	N	-
Eigenständigkeit	Ja / Nein	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	N	-

Ergebnisse	Direktumlegung	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20	V21	V22	V23	V24	V25	V26	V27	V28	V29	V30	V31	V32	V33	Taktf.
Mittlere Reisezeit	keine Angaben	14:50	14:55	14:59	14:55	14:50	14:55	14:58	14:51	14:54	15:10	14:55	14:53	15:17	15:04	14:57	14:52	14:54	15:33	15:02	14:52	15:21	15:23	15:10	15:05	15:03	15:01	15:01	15:08	15:12	15:09	15:07	15:06	15:05	24:04:00
Mittlere Umsteigezeit	keine Angaben	00:45	00:47	00:48	00:50	00:51	00:53	00:48	00:46	00:48	00:56	00:45	00:44	00:58	00:49	00:44	00:41	00:43	00:42	00:49	00:42	01:02	01:04	00:56	00:52	00:51	00:50	00:52	00:48	00:47	00:58	00:52	00:51	00:50	01:55
Mittlere Umsteigehäufigkeit	0,37	0,32	0,32	0,32	0,33	0,35	0,35	0,32	0,30	0,32	0,35	0,31	0,31	0,40	0,36	0,32	0,31	0,31	0,44	0,34	0,31	0,39	0,39	0,35	0,33	0,33	0,33	0,40	0,33	0,30	0,37	0,36	0,36	0,36	0,34
Mittlere Reiseweite	6,77	6,49	6,46	6,45	6,43	6,41	6,40	6,44	6,45	6,44	6,50	6,43	6,43	6,50	6,45	6,43	6,41	6,42	6,58	6,45	6,41	6,54	6,55	6,49	6,47	6,46	6,45	6,44	6,46	6,48	6,43	6,46	6,46	6,45	6,48
Pkm Bus	490.936	441.029	446.853	451.039	438.196	425.904	432.056	450.681	446.855	445.565	448.252	452.304	453.035	453.342	453.342	454.552	455.150	454.440	446.395	451.853	454.477	447.133	446.068	448.677	449.672	450.173	450.565	449838	456627	459455	450865	452630	452901	453438	473771
Pkm Anteil Bus in %	61,5	57,7	58,7	59,4	57,9	56,4	57,3	59,4	58,8	58,7	58,6	59,7	59,8	59,2	59,7	60,1	60,3	60,1	57,6	59,5	60,2	58,1	57,8	58,7	59,0	59,2	59,3	59,3	60,0	60,2	59,6	59,4	59,5	59,6	62,1
Pkm SPNV	248.108	262.358	248.817	239.844	242.628	246.328	235.768	240.035	247.419	248.307	249.602	236.215	234.393	235.763	235.763	232.247	230.623	231.990	260.947	238.252	231.510	255.252	258.934	248.795	244.574	242.423	240.985	236150	235990	236652	234891	238656	237090	236726	199154
Pkm Anteil SPNV in %	31,1	34,3	32,7	31,6	32,0	32,6	31,3	31,6	32,6	32,7	32,6	31,2	30,9	30,8	31,0	30,7	30,5	30,7	33,7	31,4	30,6	33,2	33,6	32,5	32,1	31,9	31,7	31,1	31,0	31,0	31,0	31,3	31,1	31,1	26,1
Pkm Straßenbahn	56.868	54.988	58.375	60.572	68.542	75.109	77.373	60.444	57.315	57.967	59.860	60.763	60.801	62.465	62.465	61.538	60.891	61.109	60.128	61.396	60.896	60.144	59.529	59.876	60.265	60.522	60.672	64055	60895	59505	62991	62023	62106	62036	78852
Pkm Anteil Straßenbahn in %	7,1	7,2	7,7	8,0	9,0	9,9	10,3	8,0	7,5	7,6	7,8	8,0	8,0	8,2	8,2	8,1	8,1	8,1	7,8	8,1	8,1	7,8	7,7	7,8	7,9	8,0	8,0	8,4	8,0	7,8	8,3	8,1	8,2	8,2	10,3
Standardabweichung	0	136,6	132,0	130,2	138,9	150,3	147,8	130,9	133,7	136,0	130,8	131,2	132,1	130,7	127,7	128,3	132,3	129,8	138,1	128,6	132,4	133,5	134,6	130,2	129,6	129,5	129,4	138,2	122,4	120,2	131,6	126,3	126,5	126,4	153,9
Korrelationskoeffizient	1	0,995	0,995	0,995	0,994	0,992	0,992	0,995	0,995	0,994	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,994	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,995	0,993	0,996	0,996	0,994	0,995	0,995	0,995	0,989
Mittlerer Absoluter Fehler	0	56,5	55,4	55,3	59,2	64,7	64,1	55,4	56,6	56,9	55,4	56,1	56,7	56,9	54,9	54,9	56,8	55,6	60,4	54,7	56,9	57,4	58,3	55,3	54,8	54,8	54,8	60,5	51,9	50,4	56,6	54,3	54,3	54,6	63,2
Mittlerer Relativer Fehler	0	14,2	13,9	13,9	14,9	16,3	16,1	13,9	14,2	14,3	13,9	14,1	14,2	14,3	13,8	13,8	14,3	14,0	15,2	13,7	14,3	14,4	14,6	13,9	13,8	13,7	13,8	15,2	13,0	12,7	14,2	13,6	13,6	13,7	15,9
Punkte		**13,3**	**14,6**	**15,5**	**13,6**	**11,9**	**13,1**	**15,5**	**14,4**	**14,5**	**15,3**	**15,7**	**15,7**	**16,1**	**16,7**	**15,8**	**15,6**	**15,6**	**13,3**	**16,1**	**15,6**	**14,8**	**14,5**	**15,4**	**15,3**	**15,5**	**15,6**	**15,8**	**16,5**	**16,3**	**16,6**	**16,5**	**16,7**	**16,7**	**12,5**
Abw. Abs. SPNV-Trasse Ri. Sterkrade	841	575	147	22	71	149	-23	24	85	154	56	-19	-39	181	-8	-70	-101	-74	522	10	-80	334	336	132	76	50	33	32	-34	-53	10	10	12	-28	-437
Abw. Abs. SPNV-Trasse Ri. Hauptbahnhof	811	584	238	142	180	249	103	142	172	211	145	105	-87	273	113	53	38	-52	550	135	47	409	431	244	186	165	162	143	94	82	120	128	124	100	-376
Abw. Abs. ÖV-Trasse. Ri. Sterkrade	12.870	-426	-848	-832	-704	-584	-505	-500	-910	-759	-840	-885	-883	-679	-717	-810	-873	-847	-793	-768	-875	768	-707	-718	-761	-782	-795	-482	-891	-997	-672	-694	-708	-606	-794
Abw. Abs. ÖV-Trasse Ri. Hauptbahnhof	11.624	-525	-947	-1.008	-889	-726	-720	-549	-821	-762	-1006	-1064	-1064	-892	-949	-1083	-1083	-1064	-933	-970	-1074	920	-868	-895	-933	-959	-980	-727	-1120	-1240	-905	-884	-899	-837	-773
Summe der Beträge / 4	6.537	528	545	501	461	427	338	304	497	472	512	518	518	506	447	504	524	509	700	471	519	608	586	497	489	489	493	346	535	593	427	429	436	393	595

Anzahl belasteter Verbindungen

Branch&Bound-Suche	B1: 61.507
Branch&Bound-Suche	B2: 59:692
Branch&Bound-Suche	B3: 48.371
Kurzwegsuche	K1: 58.126

Ausgangsparametrierung

Angepasste Werte aus vorherigem Schritt

Anhang D: Ergebnistabellen

Parameter	Wahlmöglichkeiten	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20	V21	V22	V23	V24	V25	V26	V27	V28	V29	V30	V31	V32	V33	Taktf.
Widerstand Verkehrssystem Strab		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Widerstand Verkehrssystem Bus		1	1	1	1,2	1,5	1,5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Widerstand Verkehrssystem SPNV		1	2	3	3	3	5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Suche und Vorauswahl	Siehe Tabelle 9	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B2	B3	K1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	-
Wahlmodell	Kirchhoff / Logit / Box-Cox / Lohse	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	Lg	Lg	Lg	Lg	BC	BC	BC	BC	BC	Lo	Lo	Lo	Lo	Lo	Lo	Lo	Lo	Lo	Lo	Lo	Lo	-
Parameter Beta	4 / /8 / 12 / 16 / bzw. Quadratwurzeln	8	8	8	8	8	8	8	8	8	4	12	16	0,075	0,15	0,3	0,9	1	0,25	1	4	1	1	2	2,8284	3,4641	4	2	2	2	2	2	2	2	-
Parameter Teta (nur Box-Cox)	0,75 / 0,5 / 0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,75	0,50	0,50	0,50	0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Faktor Umsteigehäufigkeit	4min / 8min / 12min / 16min	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	4	12	16	12	12	12	12	12
Faktor Umsteigewartezeit	1 / 2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
Ganglinienintervall. f. aufrastern	Nein / 20min / 10min	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	10	20	20	-
Eigenständigkeit	Ja / Nein	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	J	N	-

Ergebnisse	Direktumlegung	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20	V21	V22	V23	V24	V25	V26	V27	V28	V29	V30	V31	V32	V33	Taktf.
Mittlere Reisezeit	keine Angaben	19:05	19:09	19:17	19:14	19:10	19:23	19:01	18:39		19:27	18:59	18:56	19:33	19:14	19:02	18:54	18:58	20:04	19:10	18:54	19:45	19:55	19:28	19:17	19:11	19:08	19:24	19:32	19:35	19:36	19:48	19:45	19:51	
Mittlere Umsteigezeit	keine Angaben	00:52	00:56	00:59	01:00	01:01	01:05	00:51	00:47		01:01	00:49	00:46	01:01	00:53	00:48	00:46	00:47	01:17	00:53	00:46	01:09	01:13	01:01	00:56	00:54	00:53	01:02	01:00	00:59		01:12	01:11	01:13	
Mittlere Umsteigehäufigkeit	0,27	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,25	0,23		0,20	0,24	0,24	0,31	0,28	0,25	0,24	0,24	0,35	0,26	0,24	0,31	0,32	0,28	0,26	0,26	0,25	0,31	0,26	0,25	0,27	0,28	0,27	0,28	
Mittlere Reiseweite	13,15	12,99	12,95	12,99	12,98	12,96	13,05	12,92	12,86		13,00	12,92	12,91	13,00	12,94	12,92	12,91	12,91	13,12	12,94	12,91	13,05	13,09	12,99	12,95	12,94	12,93	12,99	12,99	12,99	12,99	13,03	13,02	13,029	
Pkm Bus	2.372.491	2.335.547	2.432.031	2.515.284	2.458.437	2.380.053	2.503.580	2.330.969	2.315.829		2.343.944	2.335.105	2.335.622	2.367.202	2.349.113	2.339.040	2.336.574	2.335.823	2.384.391	2.339.997	2.336.184	2.361.488	2.360.721	2.341.589	2.336.880	2.335.507	2.334.859	2.330.951	2.351.675	2.360.607	2.335.717	2.349.329	2.347.382	2347459	
Pkm Anteil Bus in %	24,5	24,4	25,5	26,3	25,7	24,9	26,1	24,5	24,4		24,5	24,5	24,6	24,7	24,6	24,6	24,6	24,6	24,7	24,6	24,6	24,6	24,5	24,5	24,5	24,5	24,5	24,4	24,6	24,7	24,4	24,5	24,5	24,5	
Pkm SPNV	5.859.090	5.848.087	5.673.270	5.542.367	5.571.178	5.614.992	5.438.735	5.847.734	5.843.300		5.868.032	5.845.129	5.844.677	5.852.097	5.840.146	5.850.044	5.845.164	5.842.379	5.896.962	5.844.172	5.844.471	5.881.824	5.886.918	5.864.063	5.854.378	5.850.420	5.848.323	5.883.616	5.850.026	5.839.210	5.867.495	5.869.942	5.868.900	5869987	
Pkm Anteil SPNV in %	60,5	61,1	59,5	57,9	58,3	58,8	56,6	61,4	61,7		61,3	61,4	61,4	61,1	61,3	61,5	61,5	61,4	61,0	61,3	61,5	61,2	61,1	61,3	61,4	61,4	61,4	61,5	61,2	61,0	61,3	61,2	61,2	61,2	
Pkm Straßenbahn	1.450.207	1.318.856	1.398.478	1.464.964	1.482.344	1.504.530	1.592.635	1.316.155	1.295.328		1.331.684	1.313.706	1.310.977	1.326.274	1.320.861	1.316.671	1.307.997	1.313.572	1.342.473	1.321.031	1.308.659	1.337.945	1.344.979	1.331.867	1.325.141	1.322.025	1.320.128	1.322.863	1.338.108	1.342.743	1.334.161	1.345.356	1.342.120	1350040	
Pkm Anteil Straßenbahn in %	15,0	13,8	14,7	15,3	15,5	15,8	16,6	13,8	13,7		13,9	13,8	13,8	13,9	13,9	13,8	13,8	13,8	13,9	13,9	13,8	13,9	14,0	13,9	13,9	13,9	13,9	13,8	14,0	14,0	13,9	14,0	14,0	14,1	
Standardabweichung	0	167,7	159,9	163,5	149,5	138,8	152,0	170,4	187,2		165,5	170,3	172,1	169,0	164,1	163,8	171,3	166,6	173,9	164,4	172,4	167,9	171,9	166,2	165,7	166,3	167,1	183,9	154,0	145,7	159,6	154,3	156,5	155	
Korrelationskoeffizient	1	0,996	0,996	0,990	0,996	0,996	0,995	0,966	0,996		0,996	0,993	0,996	0,996	0,996	0,997	0,996	0,997	0,995	0,997	0,996	0,996	0,996	0,996	0,997	0,996	0,996	0,995	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	0,997	
Mittlerer Absoluter Fehler	0	44,1	44,5	48,8	44,6	41,9	49,1	45,2	52,5		42,7	45,3	46,0	43,6	43,1	44,0	46,7	45,0	45,0	43,2	46,6	43,0	43,8	42,8	43,0	43,3	43,7	46,5	40,3	38,8	41,7	39,9	40,4	39,8	
Mittlerer Relativer Fehler	0	9,7	9,6	10,3	9,5	9,1	10,3	9,9	11,6		9,5	9,9	10,1	9,5	9,4	9,6	10,1	9,8	9,9	9,5	10,1	9,5	9,7	9,4	9,5	9,5	9,6	10,3	8,9	8,5	9,2	8,8	8,9	8,8	
Punkte		**18,1**	**17,8**	**16,4**	**17,1**	**17,7**	**15,1**	**17,5**	**16,6**		**17,2**	**17,4**	**17,3**	**17,7**	**18,0**	**17,6**	**17,2**	**17,4**	**17,6**	**18,0**	**17,2**	**18,1**	**18,2**	**18,3**	**18,1**	**18,0**	**17,7**	**17,4**	**18,4**	**18,3**	**18,5**	**18,7**	**18,8**	**18,7**	
Abw. Abs. SPNV Ri. Mannheim	8.122	121	495	-788	-760	-722	-1.416	142	498		181	110	111	34	75	438	445	114	136	96	127	164	251	186	157	135	120	236	162	140	192	200	196	277	
Abw. Abs. SPNV Ri. Heidelberg	8.612	-158	-686	-1.112	-1.086	-1.064	-1.583	-201	-419		30	-193	-204	-114	-194	-213	-203	-209	264	-117	-202	145	260	-4	-69	-123	-151	36	-33	-63	14	81	73	147	
Abw. Abs. Straßenbahn Ri. Mannheim	2.491	-567	-134	308	314	322	1.065	-569	-618		-505	-597	-518	-529	-588	-631	-676	-642	-451	-571	-559	-477	-447	-511	-539	-548	-553	-537	-500	-488	-508	-487	-493	-478	
Abw. Abs. Straßenbahn Ri. Heidelberg	2.105	-491	-126	224	230	239	670	-497	-529		-475	-506	-516	-477	-499	-524	-559	-531	-458	-492	-543	-485	-464	-482	-485	-488	-487	-498	-469	-453	-490	-467	-476	-459	
Summe der Beträge / 4	5.333	334	360	608	598	587	1184	352	516		298	352	337	289	339	452	471	374	327	319	358	318	356	296	313	324	328	327	291	286	301	309	310	340	

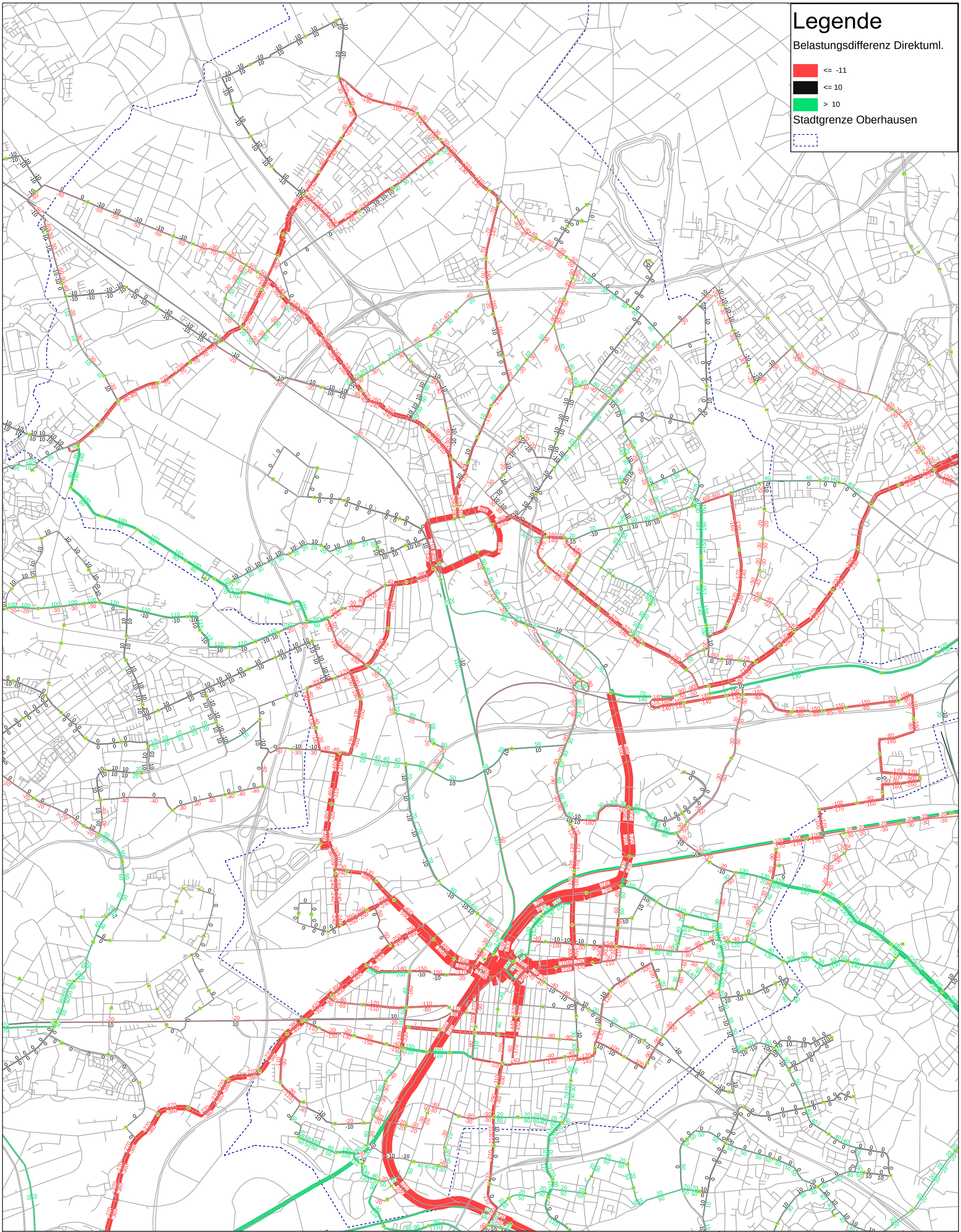
Anzahl belasteter Verbindungen

Branch&Bound-Suche	B1: 366.287
Branch&Bound-Suche	B2: 359381
Branch&Bound-Suche	B3: 316556
Kurzwegsuche	nicht durchgeführt

Ausgangsparametrierung

Angepasste Werte aus vorherigem Schritt

Variante 9 / Taktfein: Durchführung nicht möglich wegen Rechnerüberlastung



VISUM 10.01 PTV AG	Anhang E: Netzbelastungsgrafiken	OB_DA_V12.ver
Bearb.: PTV AG (Kevin Löhr)	Netz Oberhausen, Variante 12, Belastungsdifferenz zu Direktumlegung	

Legende

Belastungsdifferenz Direktuml.

<= -11

<= 10

> 10

Stadtgrenze Oberhausen

VISUM 10.01 PTV AG	Anhang E: Netzbelastungsgrafiken	OB_DA_TF.ver
Bearb.: PTV AG (Kevin Löhr)	Netz Oberhausen, Variante 12, Belastungsdifferenz zu Direktumlegung	

Anhang F: Korrelartionsdiagramme

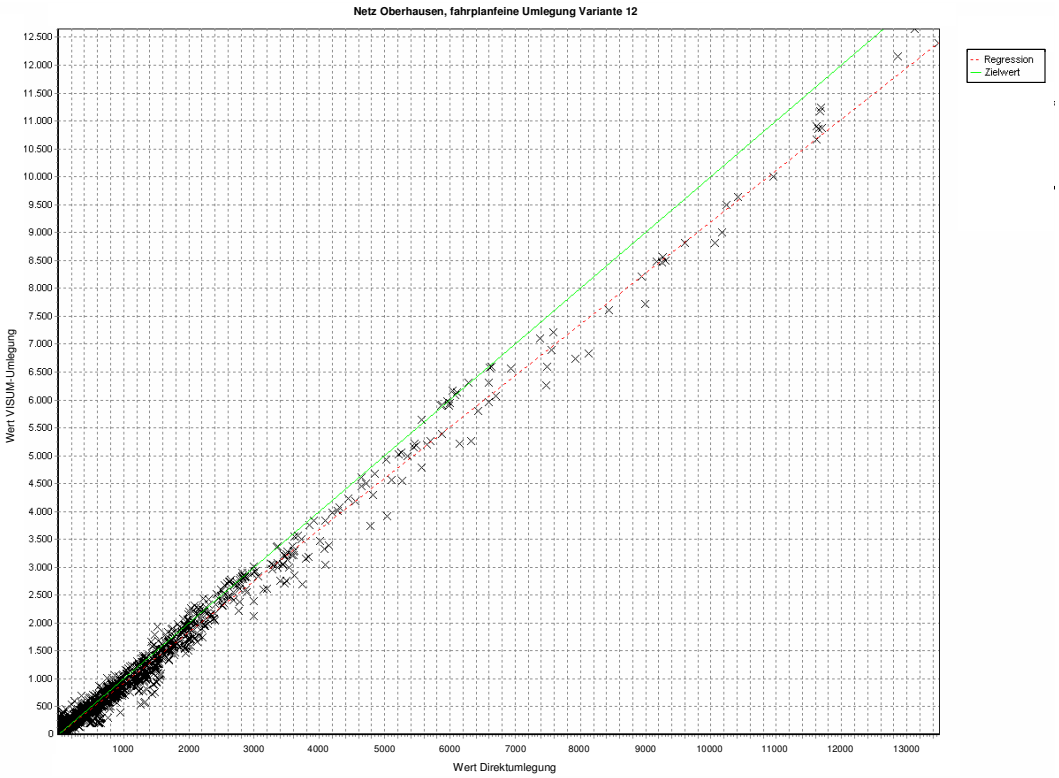


Abbildung 12: Korrelationsdiagramm aus VISUM-Umlegungsanalyse, Netz Oberhausen, fahrplanfeine Umlegung Variante 12

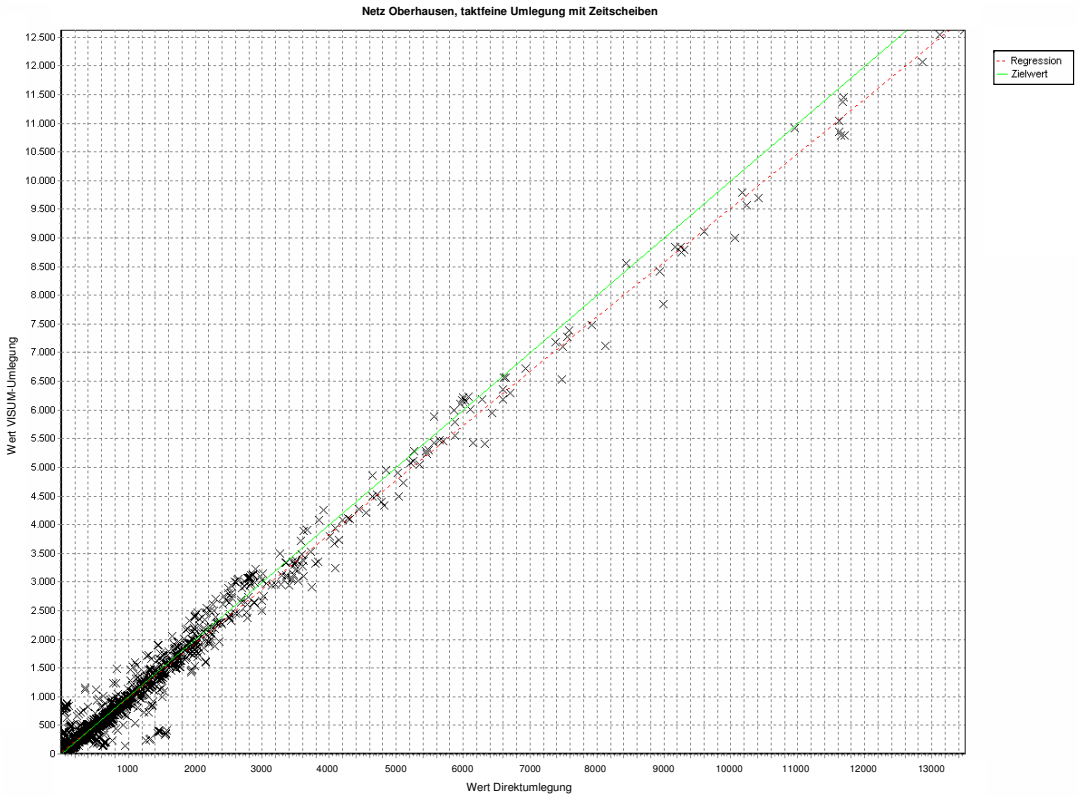


Abbildung 13: Korrelationsdiagramm aus VISUM-Umlegungsanalyse, Netz Oberhausen, taktfeine Umlegung mit Zeitscheiben

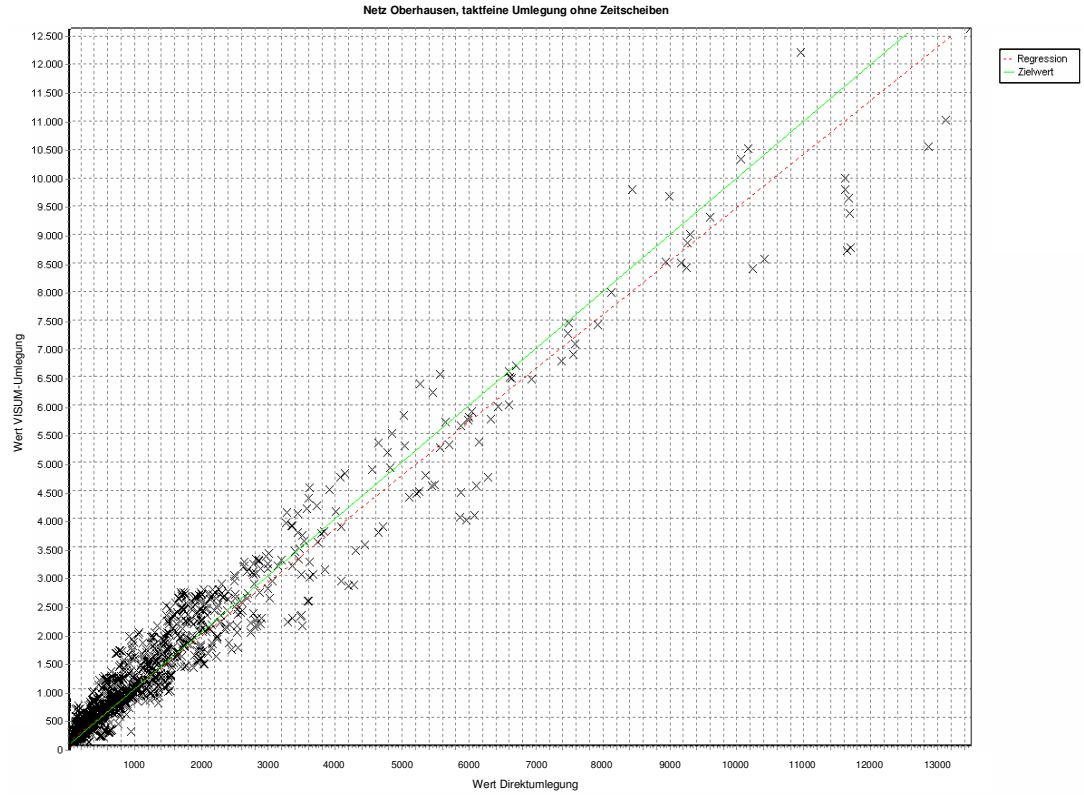


Abbildung 14: Korrelationsdiagramm aus VISUM-Umlegungsanalyse, Netz Oberhausen, taktfeine Umlegung ohne Zeitscheiben

Anhang G: Verwendete Software

Zur Netzanpassung, Verkehrsstromumlegung und statistischen Auswertung wurde die Software VISUM der PTV AG aus dem Softwarepakt PTV VISION in der Version 9.52 verwendet. Die Netze lagen in der Version 8 vor und wurden zu Beginn der Arbeit in die Datenstruktur der Version 9 umgewandelt. Daten der Direktumlegung lagen im Access-2000-Dateiformat vor und wurden in VISUM eingelesen. Für grafische Auswertungen wurde darüber hinaus die Software VISUM in der Version 10.01 verwendet.

Zur grafischen Darstellung von mathematischen Funktionen der Startwartezeit und der Verkehrsaufteilungsmodelle wurde die Software Mathcad der Firma Math Soft in der Version 2001 verwendet.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzen Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Karlsruhe, 20. Dezember 2007