Ein integriertes Netz- und Modal-Split-Modell als objektorientiertes System

Von dem Fachbereich
Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Hannover
zur Erlangung des Grades eines

Doktors des Ingenieurwesens
Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Thorsten Schüler

geboren am 6.6.1966, in Hannover

1998

Referent:

Prof. Dr. Rudolf Damrath

Korreferent:

Prof. Dr. Robert Schnüll

Tag der mündlichen Prüfung

13. Juli 1998

Vorwort

Während meiner mehrjährigen Tätigkeit am Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau an der Universität Hannover habe ich mich mit der Anwendung und Entwicklung verschiedener Verkehrsmodelle befaßt. Parallel habe ich mich mit der Entwicklung objektorientierter EDV-Programme beschäftigt. Durch das Arbeiten mit den Verkehrsmodellen entstand die Motivation, die Kenntnisse aus dem Verkehrsbereich mit den Erfahrungen aus der Entwicklung objektorientierter Strukturen zu verknüpfen.

Mit dieser Arbeit möchte ich zeigen, dass sich theoretische Modelle wie die objektorientierte Modellierung leichter im Rahmen einer praktischen Anwendung verwenden lassen als es häufig angenommen wird. Mit der Entwicklung eines multimodalen Netzmodells und eines darauf aufbauenden Verkehrsumlegungsmodells wird gezeigt, dass mathematische Modelle als Grundlage für eine praktische Problemstellung herangezogen werden können.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei all denen bedanken, die mich in den letzten drei Jahren bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit unterstützt haben.

Insbesondere Herrn Professor Damrath vom Institut für Bauinformatik möchte ich für die intensive Betreuung und die vielen Gespräche danken, in denen wichtige Elemente meiner Arbeit ihren Ursprung fanden und in denen durch die Diskussionen Brücken zwischen der Theorie und der Praxis geschlagen wurden. Bei Herrn Prof. Schnüll vom Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau möchte ich mich für die Betreuung und den persönlichen Einsatz bei der Beantragung meines Stipendiums bedanken. Den Mitarbeitern des Instituts für Bauinformatik möchte ich mich für die ständige Bereitschaft, mir jederzeit meine Fragen zu beantworteten und immer Zeit für ein Gespräch zu haben, danken. Ohne die wichtigen Gespräche mit Herrn Dipl.-Ing. R. Hüttermann und Herrn Dipl.-Ing. M. Rose würden in dieser Arbeit wichtige Aspekte fehlen. Ein großer Dank geht auch an Herrn Dr. Heck vom Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, der in einer Art Telefonbereitschaft bzw. Hotline jederzeit ein Ohr für verkehrsplanerische Fragen und Probleme hatte.

Der Firma ISIDATA GmbH möchte dafür danken, dass ich meine Arbeitszeit dort flexibel gestalten konnte. Auch möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mich tatkräftig bei der Erstellung der Dissertation unterstützt haben. Ein besonderer Dank geht an meine Freundin, die im Verlauf der Promotion auf meine unkonventionellen Arbeitszeiten Rücksicht genommen hat.

Kurzfassung

Die **Themen**, die in dieser Arbeit behandelt werden, sind multimodale Netzmodellierung, Verkehrsaufteilung und Verkehrsumlegung. Durch eine in die Verkehrsumlegung integrierte Verkehrsaufteilung soll die bisherige Trennung der beiden Aufgaben überwunden werden. Es entsteht ein integriertes Modal-Split-Modell oder Assignment-Modal-Split-Modell, das in einem multimodalen Verkehrsnetz
alternative Wege bestimmt, eine Gesamtverkehrsnachfrage auf diese umlegt und stationäre verkehrsmittelabhängige bzw. verkehrsmittelübergreifende Verkehrsbelastungen berechnet.

Aufbauend auf der objektorientierten Modellierung wird das **multimodale Netzmodell** in Form eines Klassenmodells definiert, in dem die Verkehrsarten motorisierter Individualverkehr, öffentlicher Personenverkehr, Radverkehr und Fußgängerverkehr gleichberechtigt integriert werden. Es werden die **elementar beschränkte Wegemenge** und die **minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge** beschrieben, die für verkehrsplanerische Anwendungen sinnvolle alternative Wege enthalten. Um die elementar beschränkte Wegemenge und die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge in multimodalen Verkehrsnetzen zu bestimmen, werden geeignete **Mehrwegealgorithmen** entwickelt.

Das **integrierte Modal-Split-Modell** baut auf dem multimodalen Netzmodell auf. Die Verkehrsumlegung wird durch Anwenden der entwickelten Mehrwegealgorithmen und klassischer Verteilungsfunktionen durchgeführt. Eingangsdaten für das Modell sind neben den Netzstrukturen eine verkehrsmittelunabhängige Gesamtverkehrsnachfrage. Optional können Verkehrsmittelverfügbarkeiten in die Berechnungen integriert werden. Einschränkungen betreffen den Güterverkehr, der nicht untersucht wird, und soziodemographische Daten (z. B. Fahrtzweck), die nur bedingt bzw. indirekt im Rahmen der Eigenschaften von Netzstrukturen, innerhalb der bereitgestellten Verkehrsnachfrage und über die Verkehrsmittelverfügbarkeiten berücksichtigt werden.

Im Rahmen einer **Anwendung** des Modells in Form eines Computerprogramms (AMBOS) wurden die Untersuchungsräume Erfurt und Hannover untersucht. Auf der Basis vorhandener Daten und geschätzter Parameter konnte die Brauchbarkeit des Modells festgestellt werden. Die Ergebnisse sind abhängig von der Aggregationsstufe gut bzw. zufriedenstellend. Eine detaillierte Verifizierung im Zusammenhang mit feineren Netzstrukturen steht noch aus.

abstract

The topics, which are treated in this dissertation, are multimode network modelling, modal-split and traffic assignment. The Integration of the modal-split into a traffic assignment process removes the past separation of the two functions. An integrated modal-split-model or Assignment-modal-split-model is developed, which determines alternative paths in a multimode transportation network, uses an overall traffic demand and calculates multimode traffic loads.

Based on the rules of object-oriented modelling the multimode traffic network is defined as a class model, in which the motorized individual traffic, public passenger traffic, bicycle traffic and pedestrian traffic are equally integrated. The elementarily limited quantity of paths and the minimum Fuzzy-evaluated quantity of paths are described, which contain meaningful alternative paths refering to traffic planning. In order to determine the elementarily limited quantity of paths and the minimum Fuzzy-evaluated quantity of paths in a multimode transportation network, suitable multi-path algorithms are developed.

The integrated modal-split-model add on the multimode traffic network. The traffic assignment is done by application of the developed multi-path algorithms and classical distribution functions. Input data for the model are the multimode network and an means of transport-independent overall traffic demand. Optionally means of transport availabilities can be integrated into the calculations. Restrictions concern the goods traffic, which is not examined, and social acpects (e.g. travel purpose), which only are directly or indirectly considered in the context of the characteristics of the network attributes, within the traffic demand and in the means of transport availabilities.

In the context of an application of the model in form of a computer program (AMBOS) the networks of the cities of Erfurt and Hannover were examined. Based on available data and estimated parameters the usefulness of the model could be determined . The results are good or satisfying dependent on the aggregation level. A detailed verification with more detailed network attributes is still required.

Integriertes Netz- und Modal-Split-Modell als objektorientiertes System

Schlagworte

multimodale Verkehrsumlegung

multimodales Netzmodell

integrierte Verkehrsaufteilung

headwords

multimode traffic assignment

model for multi mode networks

integrated modal split

Dipl.-Ing. T. Schüler

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1

2. Grundlagen 7
2.1 Verkehrsmodelle 7
2.1.1 Verkehrserzeugungs- und -verteilungsmodelle 10
2.1.2 Verkehrsaufteilungsmodelle 11
2.1.3 Verkehrsumlegungsmodelle 13
2.2 Objektorientierte Modellierung 19
2.2.1 Objektmodell 20
2.2.2 Klassenmodell 20
2.3 Graphentheorie 23
2.3.1 Definitionen 23
2.3.2 Der schlichte Graph 24
2.3.3 Der Pfeilgraph 25
2.3.4 Bewertung von Graphen 26

3. Multimodale Netzmodellierung 29
3.1 Analyse 29
3.1.1 Verkehrsaufkommen 30
3.1.2 Verkehrsmittel 31
3.1.3 Verkehrswege 34
3.2 Klassenmodell 36
3.3 Komplexitätsabschätzung 39
3.4 Gültigkeitsbereich 39
3.5 Zusammenfassung 41

4. Alternative Wege 43
4.1 Deterministisch bewertete Wegemengen 44
4.1.1 Die minimale Wegemenge 46
4.1.2 Die einfach beschränkte Wegemenge 46
4.1.3 Die elementar beschränkte Wegemenge 48
4.2 Fuzzy-bewertete Wegemengen 49
4.2.1 Fuzzy-Arithmetik 49
4.2.2 Fuzzy-bewertete Wege 53
4.2.3 Die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge 55
4.3 Beispiele 56
4.4 Bewertung aus Sicht der Verkehrsplanung 62

5. Wege- und Mehrwegealgorithmen 65
5.1 Wegealgorithmen 66
5.1.1 Minimale-Wege-Algorithmen 67
5.1.2 Mehrwegealgorithmen 70
5.1.3 Bewertung der Weg- und Mehrwegealgorithmen 72
5.2 Der neue Mehrwegealgorithmus 73
5.2.1 Der generelle Mehrwegealgorithmus 73
5.2.2 Die minimale Wegemenge 78
5.2.3 Die einfach beschränkte Wegemenge 80
5.2.4 Die elementar beschränkte Wegemenge 81
5.2.5 Die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge 83
5.2.6 Gültigkeitsbereich 85

6. Das integrierte Modal-Split-Modell 87
6.1 Das Kernmodell 87
6.1.1 Gegenseitige Beeinflussung der Verkehrsmittel 88
6.1.2 Alternative Wege 89
6.1.3 Liniengebundene Verkehrsmittel 91
6.1.4 Parallelverkehr 92
6.1.5 Gebrochener Verkehr 93
6.1.6 Verkehrsnachfrage 94
6.2 Transformation 95
6.2.1 Der kantenorientierte Graph 97
6.2.2 Der knotenorientierte Graph 99
6.2.3 Beurteilung 100
6.3 Prozessormodell 102
6.3.1 Bewertungsfunktionen 103
6.3.2 Der kantenorientierte Graph 105
6.3.3 Der knotenorientierte Graph 105
6.3.4 Der erweiterte generelle Mehrwegealgorithmus 107
6.3.5 Verteilungsfunktionen 110
6.4 Eingangsgrößen 110
6.5 Bewertungsgrößen 111
6.5.1 Der Pkw-Verkehr 111
6.5.2 Der Radverkehr 117
6.5.3 Der Fußgängerverkehr 119
6.5.4 Der öffentliche Personenverkehr 121
6.5.5 Sonstige Verkehrselemente 124
6.5.6 Zusammenfassung 127
6.6 Komplexitätsabschätzung 129
6.7 Gültigkeitsbereich 130
6.8 Zusammenfassung 131

7. Anwendung 135
7.1 Vorgehensweise 135
7.2 Parameter 136
7.3 Untersuchungsraum Erfurt 137
7.4 Untersuchungsraum Großraum Hannover 145
7.5 Zusammenfassung 150
7.6 Ausblick 152

8. Zusammenfassung 155

Literaturverzeichnis 161

Abbildungsverzeichnis 167

Tabellenverzeichnis 169

Verzeichnis der Programmtexte 170

wissenschaftlicher Werdegang 187

Integriertes Netz- und Modal-Split-Modell als objektorientiertes System

Dipl.-Ing. T. Schüler

1. Einleitung

Für die **Planung** zukünftiger Verkehrsnetze und für die Optimierung bestehender Netzstrukturen sind Modellrechnungen ein leistungsstarkes Hilfsmittel. Die Vielzahl von Entscheidungen, die z. B. bei der Suche aller Wege in einem Netz des öffentlichen Personenverkehrs getroffen werden, lassen sich ohne Modelle, Algorithmen und DV-Programme nicht erfassen. Auch wird die Untersuchung von gleichberechtigten konkurrierenden Verkehrsmitteln immer wichtiger. Gerade die Rückkopplung zwischen den einzelnen Verkehrsmitteln ist für die Modellierung von Verkehrsnetzen in Hinblick auf die Entwicklung intelligenter Verkehrsmanagementsysteme ein wichtiger Aspekt. Neben dem motorisierten Individualverkehr (Kfz-Verkehr) und dem öffentlichen Personenverkehr ist auch der nichtmotorisierte Individualverkehr (Fußgängerverkehr, Radverkehr) in den Planungsprozeß einzubeziehen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den **Themenbereichen** Netzmodellierung, Verkehrsaufteilung und Verkehrsumlegung. Mit einem neuen Modell wird eine multimodale Netzmodellierung ermöglicht. Im Gegensatz zu einem unimodalen Verkehrsnetz, welches nur Elemente eines Verkehrsmittels enthält, werden in einem multimodalen Verkehrsnetz mehrere Verkehrsmittel, z. B. die Verkehrsarten motorisierter Individualverkehr, öffentlicher Personenverkehr, Radverkehr und Fußgängerverkehr, gleichberechtigt im Verkehrsnetz abgebildet. Durch eine in die Verkehrsumlegung integrierte Verkehrsaufteilung soll die bisherige Trennung der beiden Bereiche Verkehrsaufteilung und Verkehrsumlegung überwunden werden. Es wird ein Assignment-Modal-Split-Modell entwickelt, welches auf der einen Seite durch objektorientierte Strukturen (modellorientiert) eine offene Architektur bietet und auf der anderen Seite die verkehrsplanerischen Belange in einer nachvollziehbaren Weise modelliert (pragmatischer Ansatz). Das neue Modell berechnet stationäre verkehrsmittelabhängige bzw. verkehrsmittelübergreifende Verkehrsbelastungen.

Der **gegenwärtige Stand** im Bereich der Modellrechnungen innerhalb der Verkehrsplanung läßt sich anhand des Vier-Stufen-Modells erläutern. Im Vier-Stufen-Modell werden die vier Bausteine Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung, Verkehrsaufteilung und Verkehrsumlegung in einem Ablaufplan dargestellt. Viele der bisher in der Verkehrsplanung angewandten Modelle basieren auf diesen vier Bausteinen, deren Reihenfolge innerhalb der unterschiedlichen Modelle variieren. Eine detaillierte Beschreibung der Bausteine des Vier-Stufen-Modells erfolgt in Kapitel 2.1, Verkehrsmodelle.

Die **Bausteine des Vier-Stufen-Modells** bauen auf Bezirken auf, in die ein Untersuchungsraum unterteilt sein muß. Mit dem Vier-Stufen-Modell werden die Verkehrsbeziehungen zwischen den Bezirken, die auch als Quellen bzw. Ziele bezeichnet werden, sowie den Verkehrsnetzen untersucht. Mit der Verkehrserzeugung wird für ein

definiertes Zeitintervall für jeden Bezirk die Zahl der Verkehrsteilnehmer berechnet, die in diesem Bezirk ihre Fahrt beginnen (Quellverkehr) bzw. deren Fahrt in diesem Bezirk endet (Zielverkehr). Im Rahmen der Verkehrsverteilung werden die Bezirke zueinander in Beziehung gesetzt und die Anzahl der Fahrten zwischen den Bezirken berechnet. Das Ergebnis der Verteilung ist eine Menge von Quelle-Ziel-Beziehungen, die auch mit dem Begriff *Verkehrsnachfrage* bezeichnet wird. Der dritte Baustein, die Verkehrsaufteilung (Modal-Split), ist für die Zuordnung der Fahrten zu den vorhandenen Verkehrsmitteln zuständig. Dabei werden die mit der Verkehrsverteilung ermittelten Fahrten auf die zu untersuchenden Verkehrsmittel aufgeteilt. Es entsteht eine verkehrsmittelspezifische Verkehrsnachfrage, die weiter verarbeitet wird und den Modellen der Verkehrsumlegung als unveränderliche Eingangsgröße dient. Für die Verkehrsumlegung müssen neben einer Verkehrsnachfrage zusätzlich Verkehrsnetze für die Verkehrmittel modelliert werden, auf denen die Untersuchungen stattfinden. Die Verkehrsnetze bestehen aus den Knoten und den zwischen ihnen vorhandenen Strecken. Die Verkehrsumlegung besteht aus den drei Teilaufgaben Bewertung der Verkehrsnetze, Wegesuche zwischen den Knoten der Verkehrsnetze und Verteilung der Verkehrsbeziehungen auf die berechneten Wege. Durch die Verteilung der Verkehrsnachfrage auf das Verkehrsnetz erhält man stationäre Verkehrsbelastungen. Abbildung 1 zeigt die Bausteine des Vier-Stufen-Modells.

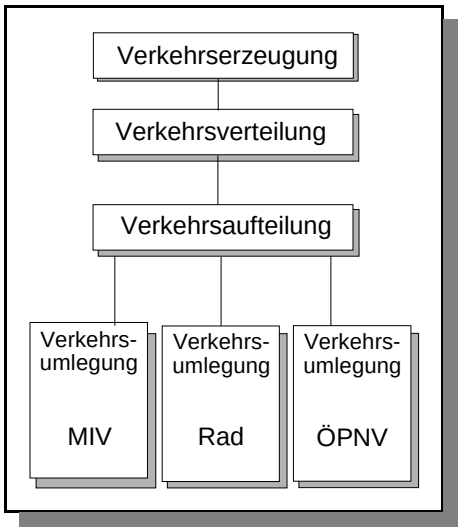

Abbildung 1: Vier-Stufen-Modell, klassisch

Eine **Untersuchung** der vorhandenen Verkehrsplanungsmodelle zeigt, dass die Bausteine Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung in ver-

schiedenen Kombinationen innerhalb der einzelnen Modelle auftreten. Ist der Baustein Verkehrsumlegung in ein Modell integriert, so ist dieses Modell nur für jeweils ein Verkehrsmittel anwendbar, da die Verkehrsumlegung Verkehrsbelastungen von unimodalen Verkehrsnetzen berechnet. Auch kann festgestellt werden, dass die Verkehrsaufteilung immer vor der Verkehrsumlegung durchgeführt wird.

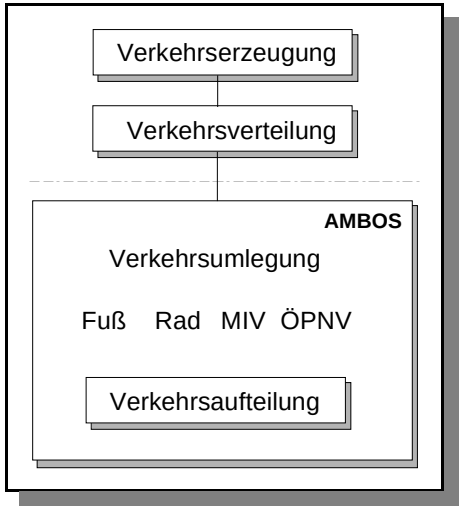

Abbildung 2: Vier-Stufen-Modell, AMBOS

Ein **Ansatz** zur Lösung der Aufgaben einer multimodalen Netzmodellierung sowie einer integrierten Verkehrsaufteilung ist eine Verknüpfung bestehender Modelle. Diese Möglichkeit ist aus verschiedenen Gründen nicht sinnvoll. Durch die verkehrsmittelspezifische Aufteilung der Wegewahl wird das multimodale Verkehrsverhalten nur unzureichend abgebildet. Die Modellierung von multimodalen Wegen ist durch eine Beibehaltung parallel arbeitender Wegesuchmodelle nicht durchführbar. Eine Beeinflussung zwischen konkurrierenden Verkehrsmitteln ist nur mit Hilfe von Iterationsverfahren möglich, die durch ihre Komplexität aufgrund der engen Verflechtungen der Verkehrsmittel untereinander an Transparenz verlieren. Gerade der direkte Einfluß der Verkehrsmittel aufeinander besitzt im multimodalen Verkehrsgeschehen eine Schlüsselfunktion. Die gestellten Anforderungen können nur mit einem neuen Netzmodell sowie neugestalteten Berechnungsalgorithmen zufriedenstellend gelöst werden.

Mit dem **neuen Netzmodell** und den darauf aufbauenden Algorithmen soll die Verkehrsaufteilung während der Verkehrsumlegung durchgeführt werden. Dies setzt das Vorhandensein alternativer Wege in einem multimodalen Verkehrsnetz voraus. Das zu entwickelnde multimodale Verkehrsnetz muß die Möglichkeit bieten, die unter-

schiedlichen Verkehrsarten gleichberechtigt innerhalb eines Verkehrsnetzes abzubilden. Durch Integration der unterschiedlichen Einflußgrößen der Verkehrsaufteilung in die Netzbewertung sowie in eine vorzugebene Verkehrsnachfrage wird auf eine explizite Berechnung der Verkehrsaufteilung verzichtet. Für die Berechnung von alternativen Wegen ist ein geeigneter Mehrwegealgorithmus zu entwickeln. Durch eine Verteilung von Fahrten auf multimodale alternative Wege wird implizit eine Verkehrsaufteilung - während der Verkehrsumlegung durchgeführt (Abbildung 2). In Tabelle 9 im Anhang werden die unterschiedlichen Einflußfaktoren der Verkehrsaufteilung und deren Umsetzung innerhalb des neuen Modells aufgeführt.

Im Rahmen der multimodalen Netzmodellierung wird mit Hilfe der **Graphentheorie** und der objektorientierten Modellierung versucht, die komplexen Abhängigkeiten im Verkehr durch Entwicklung eines Objektmodells und eines dazugehörigen Klassenmodells in ein einfaches Datenmodell zu überführen.

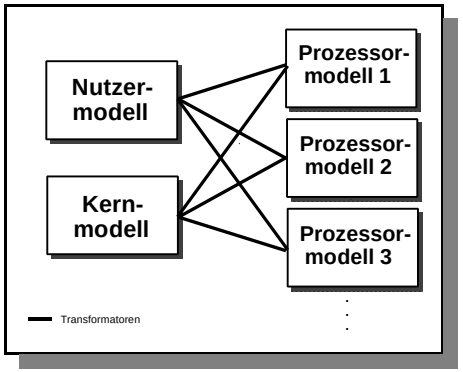

Abbildung 3: Modellübersicht, AMBOS

Der Modellaufbau erfolgt über die **Modellarchitektur** Kern-, Nutzer- und Prozessormodell (Abbildung 3). Das Kernmodell beinhaltet die Strukturen des multimodalen Netzmodells. Das Kernmodell dient als gemeinsame Basis für korrespondierende Nutzer- und Prozessormodelle. Die Berechnungen im Rahmen der Verkehrsumlegung und Verkehrsaufteilung erfolgen innerhalb eines Prozessormodells, welches mit dem Kernmodell Daten und Ergebnisse austauscht. Andere Problemstellungen sind mit Hilfe weiterer in dieser Arbeit nicht behandelter Prozessormodelle zu lösen. Für die Visualisierung und Modifikation wird ein Nutzermodell entwickelt (DV-Programm AMBOS, Anhang C). Zwischen den Teilmodellen existieren Transformatoren, die für die Umwandlung der Daten zwischen den Modellen zuständig sind. Der beschriebene Aufbau hat den Vorteil, dass das Netzmodell nicht nur für das in dieser Arbeit gestellte Problem verwendet werden kann, sondern durch die Integration von anderen Prozessormodellen erweiterbar ist. Weiterhin können unterschiedliche Ansichten durch

entsprechende Nutzermodelle realisiert werden.

Für die Entwicklung des integrierten Netz- und Modal-Split-Modells werden folgende **Vorgaben** definiert. Dem Modell wird eine Verkehrsnachfrage für einen Untersuchungsraum zur Verfügung gestellt. Sie bildet die Menge aller Fahrten des Gesamtsystems in dem spezifischen Zeitraum, welcher bei den Berechnungen nicht weiter berücksichtigt wird. Eine Unterscheidung der einzelnen Verkehrsmittel ist nicht erforderlich. Für alle in der Verkehrsnachfrage berücksichtigten Verkehrsmittel sind Netzstrukturen mit ihren spezifischen Eigenschaften vorzuhalten. Es ist zu darauf zu achten, dass die Eigenschaften der Verkehrsmittel sich auf den Zeitraum beziehen, für den die Verkehrsnachfrage bereitgestellt wird. Angaben zur Verfügbarkeit von Verkehrsmitteln können optional in die Berechnungen mit einfließen.

Im Rahmen der gestellten Aufgabe werden **Einschränkungen** vorgenommen. Bezogen auf das Vier-Stufen-Modell der Verkehrsplanung werden die Bausteine Verkehrserzeugung und Verkehrsverteilung nicht bearbeitet. Die Verkehrsnachfrage des Gesamtsystems wird durch das Modell nicht modifiziert. Induzierter Verkehr in bezug auf das Gesamtsystem kann mit diesem Modell nicht untersucht werden. Aufgrund der Vorgabe einer Verkehrsnachfrage für den Untersuchungsraum werden soziodemographische Daten (z. B. Fahrtzweck) nur bedingt bzw. indirekt im Rahmen der Eigenschaften von Netzstrukturen, innerhalb der bereitgestellten Verkehrsnachfrage und in den Verkehrsmittelverfügbarkeiten berücksichtigt.

Die Arbeit gliedert sich in die folgenden **Kapitel**. In Kapitel zwei werden die Grundlagen zum Verständnis der vorliegenden Arbeit angesprochen. Dabei werden die Bereiche Verkehrsplanung, objektorientierte Modellierung und Graphentheorie behandelt. Die Entwicklung eines multimodalen Netzmodells schließt sich in Kapitel drei an. Das multimodale Netzmodell ist das Kernmodell in der Modellarchitektur. Die Untersuchung von Wegemengen alternativer Wege und Wegealgorithmen sowie der Entwurf eines geeigneten Mehrwegealgorithmus sind Inhalt der Kapitel vier und fünf. Aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen wird in Kapitel sechs ein integriertes Modal-Split-Modell entwickelt. Im abschließenden Kapitel sieben erfolgt eine Anwendung des neuen Modells anhand von ausgesuchten Untersuchungsräumen. Im Zuge der Anwendung wird ein Nutzermodell (DV-Programm AMBOS, Anhang C) implementiert, mit dem die Daten und Ergebnisse bearbeitet, dargestellt und bewertet werden können.

2. Grundlagen

2.1 Verkehrsmodelle

Die Verkehrsmodelle sind die Werkzeuge für die Modellrechnungen innerhalb der **Verkehrsplanung**. Ziel der Verkehrsmodelle ist die Abbildung des Verkehrs. Der Verkehr entsteht durch Ortsveränderungen von Personen oder Gütern. Ein Ergebnis der Verkehrsmodelle sind Verkehrsbelastungen. Die Verkehrsmodelle können in verschiedene Modellgruppen eingeteilt werden, die eine sequentielle Modellierung des Verkehrs erlauben.

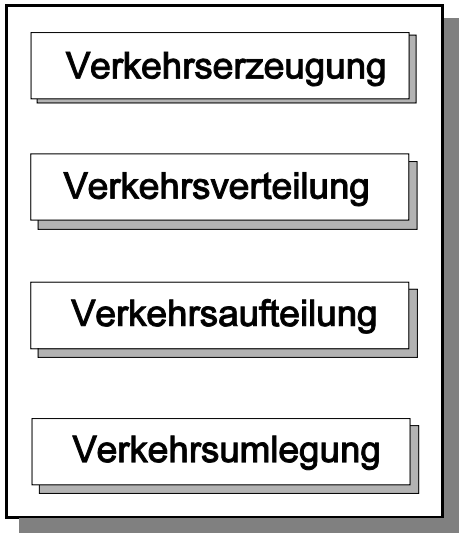

Abbildung 4: Vier-Stufen-Modell

Die Aufgaben im Rahmen von Verkehrsplanungen können mit dem **Vier-Stufen-Modell** (Abbildung 4) beschrieben werden. In diesem Modell werden die vier Bausteine Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung, Verkehrsaufteilung und Verkehrsumlegung in einem Ablaufplan dargestellt. Viele der bisher in der Verkehrsplanung angewandten Modelle basieren auf diesen vier Bausteinen. Neben makroskopischen Modellen mit deterministischen Ansätzen existieren mikroskopische Modelle, die auf stochastischen Ansätzen aufbauen. Neuere Modelle versuchen die Eigenschaften dieser beiden Modellarten zu verknüpfen.

Für die Erläuterung der einzelnen Bausteine des Vier-Stufen-Modells werden folgende **Annahmen** getroffen: Die Untersuchung des Verkehrsgeschehens erfolgt für ein vorher definiertes räumlich abgegrenztes Gebiet. Das Gebiet, welches untersucht wird, ist in Teilgebiete (Abbildung 5) eingeteilt, zwischen denen die Verkehrsbeziehungen betrachtet werden sollen. Diese Teilgebiete werden als Quellen bzw. Ziele oder auch Bezirke bezeichnet. Die Größe eines Bezirks hängt vom vorgegebenen Planungsziel ab. Ein Bezirk kann eine Gemeinde, ein Kreis, ein Stadtteil oder ein anderes durch politische oder topographische Vorgaben begrenztes Gebiet umfassen. Auf der Basis der definierten Bezirke berechnen die Modelle Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung anhand entsprechender Eingangsdaten für ein festgelegtes Zeitintervall, z. B. die Spitzenstunde, die jeweiligen Zwischenergebnisse.

Abbildung 5: Bezirke im Untersuchungsraum

Die **Kombination der Bausteine** des Vier-Stufen-Modells variiert. So verbinden bestimmte Verkehrsnachfragemodelle [BMV, A4, 1988] die drei Bausteine Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung. Andere Modelle beschäftigen sich nur mit der Verkehrsaufteilung oder der Verkehrsumlegung. Auch variiert die in Abbildung 4 dargestellte Reihenfolge der Bausteine Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung innerhalb der vorhandenen Verkehrsplanungsmodelle.

Nach einer Prüfung der Verkehrsmodelle auf ihre Anwendbarkeit im Zusammenhang mit multimodalen Verkehrsnetzen können folgende Aussagen festgehalten werden:

– Verkehrserzeugungs- und Verkehrsverteilungsmodelle sind verkehrsmittelunabhängig bzw. verkehrsmittelübergreifend (multimodal).
– Verkehrsaufteilungsmodelle benötigen verkehrsmittelabhängige Kenngrößen.
– Verkehrsumlegungsmodelle sind auf ein Verkehrsmittel beschränkt.

Als verkehrsmittelabhängige Kenngrößen der Verkehrsaufteilungsmodelle werden im allgemeinen Werte verwendet, die aus Betrachtungen unimodaler Verkehrsnetze gewonnen werden. Als unimodale Verkehrsnetze werden diejenigen Verkehrsnetze bezeichnet, in denen nur ein Verkehrsmittel abgebildet wird. Aufgrund der Schwierigkeiten, Aussagen über multimodale Kenngrößen von Quelle-Ziel-Beziehungen zu bestimmen und multimodale Aufteilungskombinationen mit Verkehrsumlegungsmodellen weiterzuverarbeiten, bestimmen die Verkehrsaufteilungsmodelle unimodale Verkehrsmittelanteile am Gesamtverkehr. Die Beschränkung der Verkehrsumlegungsmodelle auf ein Verkehrsmittel läßt eine Berechnung von multimodalen Verkehrsbelastungen (z. B. im gebrochenen Verkehr) nicht zu. Abbildung 6 zeigt die Struktur der Modellgruppen in der Verkehrsplanung in bezug auf die Verkehrsmittel.

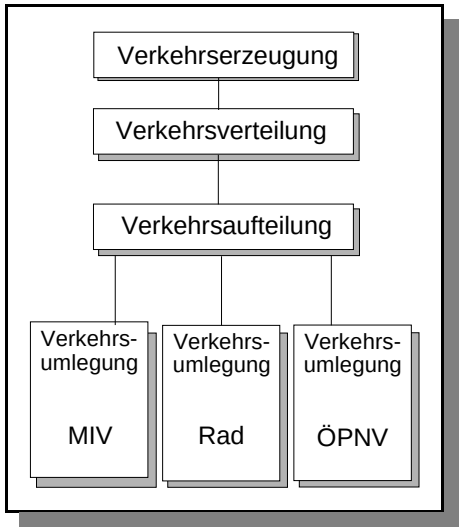

Abbildung 6: Vier-Stufen-Modell, klassisch

Die zur Zeit gängigen **Verkehrsmodelle** lassen sich in drei verschiedene Bereiche einteilen. Hier sind im wesentlichen die Modelle zur Berechnung der Verkehrsnachfrage, zur Berechnung der Verkehrsaufteilung (Modal-Split) und zur Durchführung von Verkehrsumlegungen zu nennen. Eine Übersicht existierender Modelle [BMV, 1984,

1988] zeigt, dass zum Teil mehrere Komponenten in einem Modell miteinander verknüpft werden. Ein großer Teil der Verkehrsmodelle befaßt sich jedoch nur mit einem der drei obengenannten Bereiche.

2.1.1 Verkehrserzeugungs- und -verteilungsmodelle

Die **Verkehrserzeugungs- und -verteilungsmodelle** bilden das Kernstück der Verkehrsnachfragemodelle. Einige Verkehrsnachfragemodelle binden zusätzlich den Baustein Verkehrsaufteilung direkt als Teilmodul oder indirekt in Form von Randbedingungen bzw. Eingangsgrößen (z. B. Mobilitäten) in den Berechnungsablauf ein [BMV, A4, 1988]. Das Ergebnis eines Verkehrserzeugungsmodells ist in Verbindung mit einem Verkehrsverteilungsmodell die Verkehrsnachfrage. Die Verkehrsnachfrage repräsentiert eine Menge von Fahrten zwischen jeweils zwei Bezirken im Untersuchungsraum. Sowohl über das Verkehrsmittel als auch über den Weg mit dem Verkehrsmittel werden keine Angaben gemacht.

Mit der **Verkehrserzeugung** wird für das definierte Zeitintervall für jeden definierten Bezirk die Zahl der Verkehrsteilnehmer berechnet, die diesen Bezirk verlassen bzw. in diesem Bezirk ankommen. Das Ergebnis des ersten Bausteins des Vier-Stufen-Modells ist die Bestimmung des Quellverkehrsaufkommens und des Zielverkehrsaufkommens für alle Bezirke im Untersuchungsraum. Die Verkehrserzeugung ist von den Beziehungen zwischen den Bezirken unabhängig. Die Verkehrserzeugungsmodelle können in Modelle mit

– Strukturklassenansatz,
– Personengruppenansatz und
– Nutzenmaximierungsansatz

eingeteilt werden [IVV-Aachen, 1985]. Modelle mit Strukturklassenansatz berechnen Verkehrsnachfragewerte aufgrund kausaler Zusammenhänge der Strukturdaten (z. B. Einwohner, Arbeitsplätze). Beim Personengruppenansatz werden kausale Zusammenhänge zwischen Personengruppen angenommen. Die Nutzenmaximierungsmethoden arbeiten mit kausalen Zusammenhängen und Personengruppen oder Einzelpersonen, deren Verhalten anhand eines repräsentativen Personenkreises statistisch ermittelt wird. Eingangsgrößen und Randbedingungen von Verkehrserzeugungsmodellen sind Mobilitäten, soziodemographische Größen (z. B. Haushaltskenngrößen), Strukturdaten und Faktoren.

Im Rahmen der **Verkehrsverteilung** werden die Bezirke zueinander in Beziehung gesetzt. Der Quellverkehr eines Bezirks wird auf alle anderen Bezirke verteilt, so dass zwischen allen Bezirken Verkehrsbeziehungen bestimmt werden. Werden Befragungen durchgeführt, so können die Befragungsergebnisse für die Verkehrsverteilung

herangezogen werden. Das Ergebnis der Verteilung ist eine Menge von Quelle-Ziel-Beziehungen (Abbildung 7).

Neuere Ansätze im Bereich der Verkehrsnachfragemodelle versuchen die Verkehrserzeugung und Verkehrsverteilung als Bestandteile in ein Gesamtmodell zu integrieren, in dem die sektorale Bearbeitung der einzelnen Bausteine aufgehoben wird. Ein Lösungsansatz baut dabei auf der Definition eines Verkehrswiderstands [Walther, 1997] auf. Durch die Modellierung der einzelnen Teilaufgaben in Abhängigkeit des definierten Verkehrswiderstands wird die Kombination bzw. Integration unterschiedlicher Teilmodelle möglich. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt Oppenheim [Oppenheim, 1994]. Auf der Basis einer Nutzenkomponente in Abhängigkeit von Budgets werden für die Entscheidungen im Rahmen der Aufgaben des Vier-Stufen-Modells Berechnungsfunktionen definiert. Der Nutzen einer Fahrt als Bestandteil aller Modellberechnungen erlaubt die Kombination bzw. Integration der Teilaufgaben des Vier-Stufen-Modells. Aussagen über die Eigenschaften der Modelle in bezug auf multimodalen Verkehr bzw. gebrochenen Verkehr sind für beide Modellansätze nicht gefunden worden.

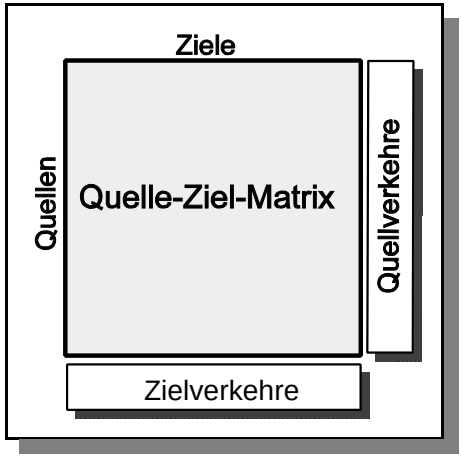

Abbildung 7: Quelle-Ziel-Matrix

2.1.2 Verkehrsaufteilungsmodelle

Der dritte Baustein des Vier-Stufen-Modells, die **Verkehrsaufteilung** (Modal-Split), ist für die Aufteilung der Fahrtenwünsche auf die vorhandenen Verkehrssysteme zuständig. Dabei werden die mit der Verkehrsverteilung ermittelten Fahrtwünsche auf die zu untersuchenden Verkehrsmittel aufgeteilt. Hierzu steht eine Vielzahl von Modellansätzen zur Verfügung. Mögliche Modellansätze sind das Probit-, Logit- oder Nested-

Logit-Modell [BMV, 1984; IVV 1985], die im wesentlichen auf der Berechnung von Wahrscheinlichkeiten aufbauen. Es entstehen verkehrsmittelspezifische Verkehrsnachfragen, die getrennt weiter verarbeitet werden und den Modellen der Verkehrsumlegung als unveränderliche Eingangsgröße dienen (Abbildung 8).

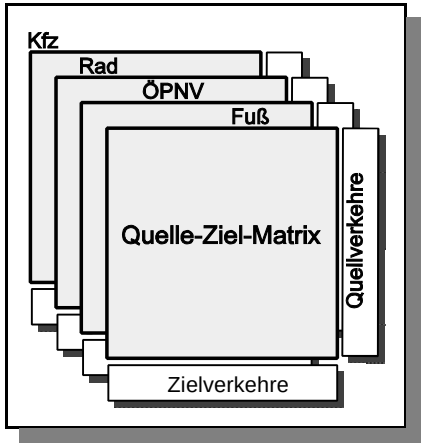

Abbildung 8: Verkehrsmittelspezifische Nachfragematrizen

Bei Verwenden des **Logit-Modell**s wird angenommen, dass die alternativen Wege unabhängig voneinander sind und bei der Entscheidung keine Korrelation der Nutzengrößen durch die Verkehrsteilnehmer durchgeführt wird. Als Grundlage wird für alle Berechnungen bei der stochastischen Verteilung exakt dieselbe Funktion (z. B. Gumbel-Typ-I-Verteilung) verwendet. Das Modell ist leicht zu handhaben. Die Zielsetzung, tatsächliches Verkehrsverhalten zu beschreiben, wird aus den obengenannten Gründen nur bedingt erfüllt.

Das **Probit-Modell** berücksichtigt bei der Entscheidung alle vorhandenen Alternativen. Die Nutzenzuweisungen für die Alternativen werden in diesem Modell über Normalverteilungen mit unterschiedlichen Standardabweichungen vorgenommen. Das Verkehrsverhalten wird realitätsnah abgebildet. Bei mehr als zwei Alternativen ist dieses Modell nur mit großem Rechenaufwand anwendbar.

Eine einfache Handhabung bietet auch das **Dogit-Modell**. Die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative wird unter Berücksichtigung der übrigen Alternativen bestimmt. Die Funktionsparameter für die Wahrscheinlichkeitsfunktionen werden mit Hilfe von Regressionsanalysen und empirischen Daten gewonnen. Durch die Einbeziehung von Regressionsrechnungen gehen die Ursache-Wirkung-Zusammenhänge weitgehend

verloren.

Eine Einteilung in zwei Stufen wird beim **Nested-Logit-Modell** vorgenommen. Die Entscheidungsstufen gliedern sich in eine grobe (z. B. motorisierter Individualverkehr oder öffentlicher Personenverkehr) und in eine anschließende feinere Stufe (z. B. Bahn oder Bus). Vorausgesetzt wird eine hierarchische Ordnung der alternativen Wege. Die Annahmewahrscheinlichkeiten werden unter Berücksichtigung anderer alternativer Wege berechnet.

Die **Gemeinsamkeiten** der beschriebenen Verkehrsaufteilungsmodelle lassen sich zusammenfassen. Alle Modelle bestimmen die Verkehrsaufteilung aufgrund vorgegebener Bewertungen bzw. Nutzen von Verkehrsmitteln. Die Bewertungen werden im allgemeinen aus den Bewertungen der Wege im Untersuchungsraum gewonnen. Die Einflußgrößen der Verkehrsaufteilungsmodelle sind im wesentlichen soziodemographische Daten, wegbezogene Kenngrößen und empirische zu ermittelnde Parameter und Faktoren. Die soziodemographischen Größen werden für die Ermittlung der verkehrsmittelgebundenen Verkehrsanteile und für die Verfügbarkeit von Verkehrsmitteln herangezogen. Die Aufteilung der wahlfreien Verkehrsteilnehmer auf die einzelnen Verkehrsmittel erfolgt mit Hilfe der Weggrößen und den oben aufgeführten Verkehrsaufteilungsmodellen. In jedem Fall sind die Modelle durch Modifizierung von Parametern anhand vorgegebener Daten für jede Untersuchung zu eichen. Aussagen über die Anwendbarkeit der Modelle auf gebrochenen Verkehr sind nicht zu finden.

Unterschiede zwischen den Verkehrsaufteilungsmodellen zeigen sich in der Berücksichtigung alternativer Wege und den mathematischen Grundlagen. Bei den einfachen Modellen (z. B. Logit-Modell) werden die Verkehrsmittelanteile unbeeinflußt von vorhandenen alternativen Verkehrsmitteln bestimmt. Aufwendigere Modelle (z. B. Probit-Modell) berücksichtigen die alternativen Verkehrsmittel mit Hilfe von Verteilungsfunktionen. Für die Verteilungsfunktionen werden je nach Modell unterschiedliche Funktionsansätze (z. B. Normalverteilung, Gumbel-I-Funktion) eingesetzt.

Neuere Ansätze versuchen die Verkehrsaufteilung in ganzheitliche Gesamtmodelle zu integrieren. Durch ein Angleichen der Eingangs- und Ausgangsgrößen der Bausteine des Vier-Stufen-Modells wird die Kombination der Teilmodelle möglich. Lösungsansätze sind die Definition eines Verkehrswiderstands [Walther, 1997] oder die Einführung von Budgets [Oppenheim, 1994]. Die Probleme der Eichung der Teilmodelle wird auf die Umrechnung der einzelnen Kenngrößen in die gemeinsamen Basiseinheiten verlagert.

2.1.3 Verkehrsumlegungsmodelle

Für die **Verkehrsumlegungsmodelle** müssen neben einer Verkehrsnachfrage zusätzlich Verkehrsnetze für die Verkehrsysteme modelliert werden, auf denen die

Untersuchungen stattfinden. Die Verfahren im Bereich der Verkehrsumlegung sind weitestgehend für jeweils ein Verkehrsmittel konzipiert, so dass eine Rückkopplung zwischen den Verkehrssystemen nur im Anschluss über ein gesondertes Modell durchgeführt werden kann. Auf dem Sektor des öffentlichen Personenverkehrs sind Minimale-Wege-Algorithmen weit verbreitet. Der nicht motorisierte Individualverkehr findet nur in wenigen Modellen Berücksichtigung und wird dort wie der motorisierte Individualverkehr behandelt. Gängige Berechnungsabläufe bei der Untersuchung von motorisiertem Individualverkehr sind das Sukzessivverfahren und das Gleichgewichtsverfahren.

Das **Sukzessivverfahren** besteht darin, die Verkehrsnachfrage in Anteile aufzuteilen und diese dann in Iterationen auf das Verkehrsnetz zu verteilen. Dieses Verfahren wird auch als kapazitätsabhängige Umlegung bzw. Capacity-Restraint-Verfahren [Heck, 1986] bezeichnet. Nach jeder Iteration werden die Bewertungen der Netzelemente anhand der aktuellen Verkehrsbelastung neu berechnet. Durch die Definition der Anteile wird die Anzahl der durchzuführenden Iterationen festgelegt.

Beim **Gleichgewichtsverfahren** ist die Anzahl der Iterationen abhängig von einem Gleichgewicht der Verkehrsbelastungen. Das Gleichgewicht wird mit Hilfe einer Zielfunktion definiert. Eine mögliche Zielfunktion ist die relative Abweichung der Verkehrsbelastungen zwischen zwei Iterationsschritten. Ist ein optimaler Grenzwert erreicht, werden die Berechnungen beendet. Zwischen den Iterationen werden die Bewertungen der Elemente anhand der aktuellen Verkehrsbelastung angepaßt. Die Gleichgewichtsverfahren unterscheiden sich durch ihr Konvergenzverhalten bzw. durch die Methoden, die das Konvergenzverhalten der Zielfunktion beeinflussen. Als Grundtyp kann der Frank-Wolfe-Algorithmus [Schittenhelm, 1992] bezeichnet werden. Nach jeder Iteration werden die Kantenbewertungen w_e anhand einer kumulierten Belastung b_{ku} berechnet (1). Die kumulierte Belastung setzt sich aus der Belastung der aktuellen Iteration b_n und der Belastung der vorherigen Iteration b_{n-1} zusammen. Zu der Belastung der vorherigen Iteration wird über einen Faktor α ein Anteil der Differenz zwischen den Belastungen der aktuellen und vorherigen Iteration addiert. Der Faktor α wird mit den in (1) dargestellten Gleichung bestimmt.

$$b_{ku} = b_{n-1} + \alpha \, (b_n - b_{n-1}) \qquad \alpha = \min_{0 \le \alpha \le 1} \sum_e \int_0^{b_{ku}} w_e(x) \, dx \tag{1}$$

Eine abgewandelte Form benutzt das Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover [Bierschenk, 1988]. Nach der Definition der maximalen durchzuführenden Iterationen n wird der Faktor α in Abhängigkeit von der aktuellen Iteration mit Hilfe von Dämpfungswerten bestimmt. Bei der ersten Iteration nimmt der Faktor α den Wert des unteren Dämpfungswertes a an. In der letzten Iteration

entspricht der Faktor α dem oberen Dämpfungswert b. Zwischen diesen beiden Werten werden die übrigen Faktoren der Iterationen i linear ermittelt. (2) zeigt die Berechnung des Faktors α.

$$\alpha = a + i \cdot \frac{b - a}{n} \qquad \textbf{(2)}$$

Durch die Integration von Dämpfungswerten werden die Werte der aktuell berechneten kumulierten Belastung den Werten der zuvor berechneten kumulierten Belastung mit steigender Zahl von Iterationen angeglichen.

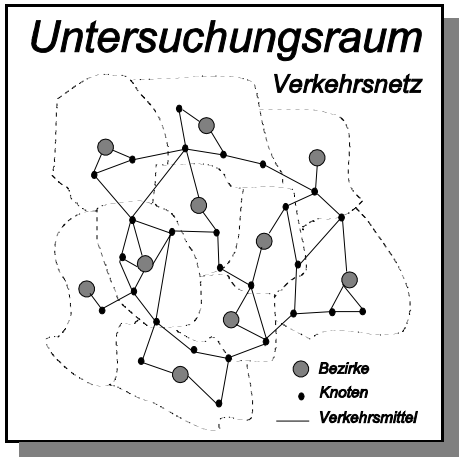

Abbildung 9: Verkehrsnetz

Voraussetzung für eine Verkehrsumlegung ist die Existenz von Verkehrsnetzen (Abbildung 9). Die **Verkehrsnetze** bestehen aus Knotenpunkten und den zwischen ihnen vorhandenen Strecken. Abhängig von der Aggregation der Verkehrsnachfrage enthalten die Verkehrsnetze zusätzlich Bezirke, welche die jeweilige Einzugsbereiche der Verkehrsnachfrage repräsentieren, sowie fiktive Verbindungen, um eine Verknüpfung der Bezirke mit den Verkehrsnetzen zu ermöglichen.

Die Verkehrsumlegung besteht aus drei **Teilaufgaben**. Den Anfang bildet die Bewertung der Knotenpunkte und der Strecken. Die zweite Teilaufgabe beinhaltet eine Wegesuche zwischen den Quellen und Zielen. Für dieses Problem existieren Verfahren sowohl zum Suchen minimaler Wege als auch für die Berechnung alternativer Wege. In einer dritten Teilaufgabe werden die Fahrtenwünsche auf die gefundenen Wege mit Hilfe von Verteilungsfunktionen umgelegt. Durch die Verteilung der Verkehrsnachfrage auf das Verkehrsnetz erhält man stationäre Verkehrsbelastungen für jedes Element des

Verkehrsnetzes, die für weitere Untersuchungen verwendet werden können.

Bei der Verwendung von Minimale-Wege-Algorithmen für die **Wegesuche** wird zwischen den Quellen und Zielen nur ein Weg bestimmt. Dieser Weg ist die Verbindung mit der minimalen Länge bzw. minimalen Bewertung. Es wird dabei vorausgesetzt, dass alle Fahrten zwischen einer Quelle und einem Ziel auf dem gefundenen Weg durchgeführt werden. Die Fahrten auf dieser Verkehrsbeziehung werden alle auf den gefundenen Weg umgelegt. Diese Verfahren werden hauptsächlich im Bereich des öffentlichen Personenverkehrs angewendet. Alternativ existieren Umlegungsverfahren, die in Abhängigkeit vom minimalen Weg auch alternative Verkehrsverbindungen berücksichtigen (Verfahren nach DIAL [Dial, 1971]). Für den Individualverkehr sind aufgrund des individuellen Verhaltens der Verkehrsteilnehmer alternative Wege zu bestimmen.

Verteilungsfunktionen, welche innerhalb von Verkehrsumlegungsmodellen verwendet werden können, sind

- die Verteilung nach Kirchhoff,
- die Logit-Verteilung,
- die Verteilung nach Kirchhoff-Logit,
- die 4:1-Verteilung und
- die Verteilung nach DIAL.

Während für die Verteilung nach DIAL nur minimale Wege bestimmt werden müssen, setzen die anderen Verteilungsfunktionen alternative Wege voraus.

Die **Verteilung nach Kirchhoff** [ivh, 1989] baut auf einer Potenzfunktion auf. Die Fahrten F_{xyk} zwischen den Knoten x und y auf dem Weg k berechnen sich aus der Summe aller Fahrten F_{xy} zwischen den Knoten x und y. Die Potenzfunktion besteht aus der Bewertung des Weges als Basis und einem negativen Faktor als Exponent. Dabei wird die Bewertung eines Weges w_{xy} ins Verhältnis mit der Summe der Bewertungen aller alternativen Wege gesetzt (3). Es wird für jeden Weg der auf ihn entfallende Anteil der Fahrten berechnet. Mit dem Parameter α kann die Entscheidung zugunsten des minimalen Weges gesteuert werden. Je größer der Wert α gewählt wird, desto mehr wird der minimale Weg berücksichtigt. Dieser Effekt kann wie folgt umschrieben werden: Wenn ein alternativer Weg nur durch eine gering erhöhte Bewertung vom minimalen Weg abweicht, entscheiden sich trotzdem viele Verkehrsteilnehmer für den minimalen Weg.

$$F_{xyk} = F_{xy} \cdot \frac{w_{xyk}^{-\alpha}}{\sum_i w_{xyi}^{-\alpha}} \qquad \textbf{(3)}$$

Die **Verteilung nach Logit** [IVV, 1985] baut auf dem aus der Verkehrsaufteilung bekannten Logit-Modell auf. Die Fahrten F_{xyk} zwischen den Knoten x und y auf dem Weg k berechnen sich aus der Summe aller Fahrten F_{xy} zwischen den Knoten x und y. Bei der Verteilung werden alle berechneten alternativen Wege unabhängig vom Verkehrsmittel berücksichtigt. Der Nutzen u_{xy} eines Weges besteht aus der negativen mit einem Faktor α gewichteten Bewertung des Weges w_{xy}. Der Nutzen eines Weges wird über eine Exponentialfunktion modifiziert. Dabei wird der Nutzen als Exponent in die Exponentialfunktion integriert. Dieser veränderte Wert wird mit der Summe der analog bearbeiteten Werte aller alternativen Wege ins Verhältnis gesetzt. Der Quotient aus der Bewertung des jeweiligen Weges und der Summe der Bewertungen aller vorhandenen Wege ergibt einen Faktor, mit dem die anteiligen Fahrten auf dem Weg berechnet werden (4).

$$F_{xyk} = F_{xy} \cdot \frac{e^{u_{xyk}}}{\sum_i e^{u_{xyi}}} \quad mit \quad u_{xy} = -\alpha \cdot w_{xy} \tag{4}$$

Eine weitere Verteilungsfunktion ist die **Kirchhoff-Logit-Funktion** [Krämer, 1992]. Dieser Ansatz besteht aus einer Kombination der Verteilung nach Kirchhoff und der Logit-Funktion (5). Die Funktion baut auf dem Nutzen eines Weges auf. Der Nutzen u_{xy} eines Weges besteht aus der negativen mit einem Faktor α gewichteten Bewertung des Weges w_{xy}. Für jeden Weg wird der Quotient aus der Exponentialfunktion mit dem Nutzen des Weges als Exponent und dem negativen Nutzen des Weges bestimmt. Der Wert eines Weges wird ins Verhältnis zu der Summe aller Quotienten der alternativen Wege gesetzt und der zum Weg zugehörige Anteil der Verkehrsnachfrage berechnet. Die Fahrten F_{xyk} zwischen den Knoten x und y auf dem Weg k berechnen sich aus dem Produkt der Summe aller Fahrten F_{xy} zwischen den Knoten x und y und dem zuvor berechneten Quotienten.

$$F_{xyk} = F_{xy} \cdot \frac{\frac{e^{u_{xyk}}}{-u_{xyk}}}{\sum_i \frac{e^{u_{xyi}}}{-u_{xyi}}} \quad mit \quad u_{xy} = -\alpha \cdot w_{xy} \tag{5}$$

Die aus der Verkehrsplanung stammende **4:1-Verteilung** [Mack, 1996] läßt sich durch folgende Kriterien beschreiben. Grundannahme dieser Verteilung ist, dass die Anzahl der Fahrten auf dem besten Weg mit der Bewertung w_{xy0} viermal so hoch ist wie die Anzahl der Fahrten auf dem schlechtesten Weg w_{xyn}. Die Berechnung der anteiligen Fahrten erfolgt in zwei Schritten. Die erste Teilaufgabe besteht aus der Bestimmung von Belastungsfaktoren b_{xyk} für jeden alternativen Weg k mit der Bewertung w_{xyk}. Dem besten Weg und allen gleichbewerteten Wegen wird der Belastungsfaktor vier zugeordnet. Auf der anderen Seite erhalten der schlechteste Weg sowie alle gleich-

bewerteten Wege den Belastungsfaktor eins. Der Belastungsfaktor für jeden Weg kann mit (6) berechnet werden.

$$b_{xyk} = \frac{w_{xyk} - w_{xyn}}{w_{xy0} - w_{xyn}} * 3 + 1 \tag{6}$$

Nach der Berechnung der Belastungsfaktoren wird für jeden Weg der Anteil der Fahrten bestimmt. Die Fahrten F_{xyk} zwischen den Knoten x und y auf dem Weg k berechnen sich aus der Summe aller Fahrten F_{xy} zwischen den Knoten x und y, die mit dem Quotienten aus Belastungszahl b_{xyk} und der Summe der Belastungszahlen multipliziert wird (7).

$$F_{xyk} = F_{xy} \cdot \frac{b_{xyk}}{\sum_i b_{xyi}} \tag{7}$$

Im Gegensatz zu den bisher aufgeführten Verteilungsfunktionen basiert die **Verteilung nach DIAL** auf einer Minimale-Wegesuche. Nach dem Berechnen der minimalen Wege von einem Quellknoten zu allen Zielknoten in Form eines Wegebaums, werden für alle Kanten von Knoten i nach Knoten j Wahrscheinlichkeiten p_{ij} bestimmt. Dafür wird eine Exponentialfunktion benutzt, deren Exponent aus der Differenz zwischen der Bewertung w_j des Weges vom Startknoten x zum Endknoten der Kante, der Bewertung w_i des Weges vom Startknoten x zum Anfangsknoten der Kante und der Bewertung w_{ij} der Kante von Knoten i nach Knoten j besteht (8).

$$p_{ij} = \begin{cases} e^{\alpha * (w_j - w_i - w_{ij})} & : w_j > w_i \\ 0 & : w_j \leq w_i \end{cases} \tag{8}$$

Danach werden über die Berechnung der zur jeweiligen Kante zugehörigen Anteile die Fahrten auf das Netz verteilt. Die Verteilung erfolgt in zwei Schritten. Der erste Schritt besteht aus dem Bestimmen von Hilfswerten k_{ij} für jede Kante von Knoten i nach Knoten j. Hierbei werden ausgehend vom Startknoten x (Wurzelknoten) die Knoten i jeder Ebene des Wegebaums in einem Vorwärtsschritt durchlaufen (9).

$$k_{ij} = \begin{cases} p_{ij} \cdot \sum_v k_{vi} & : i \neq x \\ p_{xj} & : i = x \end{cases} \tag{9}$$

Der zweite Schritt ist die Berechnung der Verteilungszahlen b_{ij} für jede Kante. Dieser Vorgang wird beginnend an den Ästen des Wegebaums (Zielknoten) in einem Rückwärtsschritt bestimmt (10). Auch hier werden die Knoten in der Reihenfolge der

Ebenen, in denen sie sich innerhalb des Wegebaums befinden, bearbeitet.

$$b_{ij} = \frac{k_{ij}}{\sum_{v} k_{vj}} \qquad \textbf{(10)}$$

Die Fahrten F_{ij} auf einer Kante zwischen den Knoten i und j berechnen sich aus dem Produkt aller Fahrten F_{xy} zwischen den Knoten x und y und den Verteilungszahlen b_{ij} der Kanten (11).

$$F_{ij} = F_{xy} \cdot b_{ij} \qquad \textbf{(11)}$$

2.2 Objektorientierte Modellierung

Mit der **objektorientierten Modellierung** ist ein Hilfsmittel gegeben, mit dem Problemstellungen unterschiedlichster Art bearbeitet werden können. In der objektorientierten Modellierung existieren verschiedene Teilmodelle, die jeweils eine andere Sichtweise auf das Problem beschreiben. Als Teilmodelle werden ein Objektmodell und das dazugehörige Klassenmodell, ein funktionales Modell sowie ein dynamisches Modell definiert. Das Objektmodell besteht aus Objekten und Relationen. Das funktionale Modell beschreibt die Art der Kooperation zwischen den Objekten, während sich das dynamische Modell mit der zeitabhängigen Kooperation zwischen den Objekten befaßt. Auf das funktionale Modell und das dynamische Modell wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

Die objektorientierte Modellierung hat die **Funktion**, Modelle zu formulieren, die durch einfach durchzuführende Modifikationen bzw. Erweiterungen gekennzeichnet sind. Durch eine klare Trennung von Elementen bei einer Modellierung von Objekten erhalten die objektorientierten Modelle einen einfachen Aufbau und werden übersichtlich und transparent. Werden Vererbungsmechanismen angewandt, erhalten die Modelle eine Hierarchie, die zur Übersichtlichkeit beitragen kann. Mit Vererbungsmechanismen werden Beziehungen bezeichnet, bei denen Objekte Eigenschaften von anderen Objekten übernehmen bzw. erben, ohne dass sie redundant definiert werden müssen (Polymorphismus). Infolge von vorhandenen Hierarchien und abgegrenzten Funktionsbereichen von Objekten (Kapselung) sind diese Modelle einfach strukturiert.

In den nachfolgenden **Kapitel**n werden der Aufbau eines Objektmodells und eines Klassenmodells beschrieben. Es werden Darstellungsformen definiert, mit denen objektorientierte Modelle entwickelt werden können.

2.2.1 Objektmodell

Mit einem **Objektmodell** wird versucht, die Realität mit Hilfe von Objekten und Relationen abzubilden. Es entsteht ein Objektdiagramm in Form eines Graphen (siehe Kapitel 2.3) mit ungerichteten Kanten.

Die **Objekte** bilden dabei die Knoten des Graphen. Jedes Objekt im Objektmodell besitzt in der Realität ein existierendes Gegenstück. Ein Objekt wird durch Eigenschaften in Form von Attributen beschrieben, mit denen der Zustand eines Objekts dynamisch festgelegt wird. Zusätzlich beinhaltet ein Objekt definierte Methoden, mit denen das Verhalten des Objektes beschrieben wird.

Die Menge der frei zu definierenden Beziehungen zwischen den Objekten wird als **Relationen** bezeichnet. Die Relationen im Objektmodell prägen der Menge von Objekten eine Struktur auf. Die Relationen zwischen den Objekten werden durch ungerichtete Kanten im Graphen beschrieben.

2.2.2 Klassenmodell

Ein **Klassenmodell** ist die Abstraktion eines zugehörigen Objektmodells. Das Klassenmodell besteht aus den Klassen und binären Relationen zwischen den Klassen. Das Objektmodell bildet eine Instanz eines Klassenmodells. Die Darstellung des Klassenmodells erfolgt in Form eines Graphen. Die Knoten des Graphen entsprechen den Klassen des Klassenmodells. Die Relation des Graphen repräsentiert die Beziehungen zwischen den Klassen.

Eine **Klasse** ist ein Vertreter einer Menge von Objekten. Eine Klasse besteht aus einem Namen, Attributen und Methoden, die auf den Attributen definiert sind. Im Klassenmodell wird eine Klasse in Form eines Rechtecks dargestellt (Abbildung 10). Der Name der Klasse wird als Bezeichnung in das Rechteck eingetragen.

Abbildung 10: Darstellung: Klasse

Die **Relation** zwischen zwei Klassen steht für die Menge korrespondierender Objektrelationen. Als Relationen in einem Klassenmodell existieren die Assoziation, die

Aggregation und die Generalisierung bzw. Spezialisierung. Mit Hilfe dieser Beziehungsformen können die Abhängigkeiten zwischen den Klassen beschrieben werden.

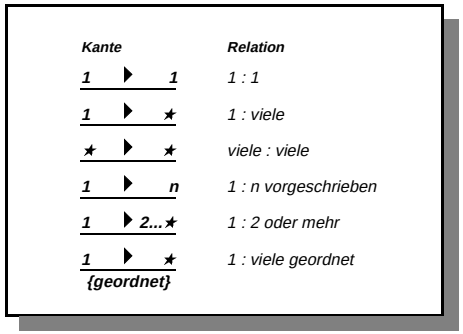

Abbildung 11: Darstellung: Assoziation

Die **Assoziation** ist eine symmetrische binäre Relation zwischen zwei Klassen. Als Notation wird eine ungerichtete Kante verwendet. Als reflexive Relation wird die Assoziation einer Klasse mit sich selbst bezeichnet. Die Eigenschaften einer Assoziation sind die Optionalität, die Mehrfachheit und die Ordnung der Relation. Mit der Optionalität wird festgelegt, ob die Anzahl der miteinander assoziierten Objekte vorgeschrieben wird. Die Anzahl der assoziierten Objekte wird durch die Mehrfachheit definiert. Über die Ordnung wird der Assoziation eine Richtung aufgeprägt. Bei einer Assoziation ist die Lebensdauer der Objekte der verknüpften Klassen von der Relation unabhängig. In Abbildung 11 werden die Notationen für Assoziationen beschrieben.

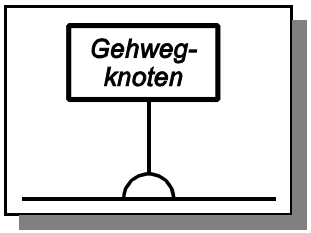

Abbildung 12: Darstellung: assoziierte Klasse

Eine Erweiterung der Assoziation sind **assoziierte Klassen**. Jeder Assoziation kann eine Klasse zugeordnet werden. Objekte dieser Klasse existieren solange wie die dazugehörige Beziehung zwischen den Objekten der über die Assoziation verbundenen

Klassen besteht. Assoziierte Klassen finden eine Anwendung in der Bewertung der Relation in einem schlichten Graphen (Kapitel 2.3). Die Darstellung einer assoziierten Klasse erfolgt mit einem Klassensymbol, einer ungerichteten Kante und einem Halbkreis auf der Seite der Relation, mit der die Klasse assoziiert wird (Abbildung 12).

Mit Hilfe der **Aggregation** werden Beziehungen abgebildet, die Verknüpfungen zwischen Klassen in der Form "*besteht aus*" beschreiben. Einer Klasse, der Vater-Klasse, wird eine zweite Klasse zugeordnet. Die Aggregation ist asymmetrisch und transitiv. Die Eigenschaften der Aggregation sind die Mehrfachheit, die Optionalität und die Ordnung. Die Darstellung im Graphendiagramm erfolgt mit einer gerichteten Kante mit einem Raute an der Seite der Vater-Klasse. Der Unterschied zwischen der Assoziation und Aggregation läßt sich an der Lebensdauer der verknüpften Objekte der Klassen beschreiben. Während assoziierte Objekte unabhängig voneinander bestehen können, existiert ein aggregiertes Objekt solange wie das zugehörige Vater-Objekt. Wird das Vater-Objekt entfernt, so müssen alle aggregierten Objekte gleichfalls entfernt werden. Die Notation der Aggregation zeigt die Abbildung 13.

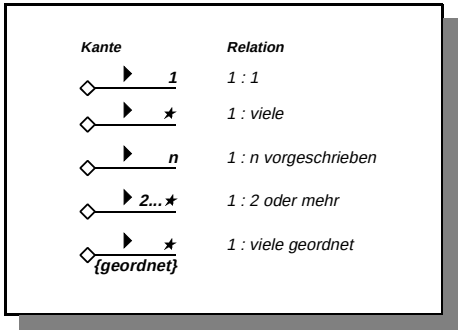

Abbildung 13: Darstellung: Aggregation

Die dritte Möglichkeit, Klassen zu verknüpfen, ist die **Generalisierung** bzw. **Spezialisierung**. Die Generalisierung ist eine Relation, die eine spezielle Klasse einer generellen Klasse zuordnet. Die Relation ist transitiv und asymmetrisch. Die spezielle Klasse ist eine Version bzw. ein Nachkomme einer generellen Klasse. Mit dieser Relation werden die Vererbungsmechanismen zwischen zwei Klassen beschrieben. Eine spezielle Klasse erbt alle Attribute und Methoden der generellen Klasse. Die Darstellung der Generalisierung im Graphendiagramm des Klassenmodells erfolgt mit einer gerichteten Kante und einem Dreieck als Symbol in Richtung der generellen Klasse (Abbildung 14). Als einfache Spezialisierung oder einfache Vererbung werden die Beziehungen bezeichnet, bei denen mehrere spezielle Klassen einer generellen Klasse zugeordnet werden. Die Verknüpfung einer speziellen Klasse mit mehreren generellen Klassen heißt mehrfache Vererbung.

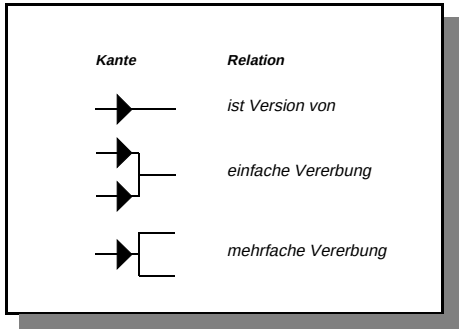

Abbildung 14: Darstellung: Generalisierung, Spezialisierung

Bei der Definition eines Klassenmodells auf der Basis eines Objektmodells ist auf die **Strukturverträglichkeit** zu achten. Die Strukturverträglichkeit beinhaltet zwei Bedingungen. Die erste Forderung betrifft die Objekte und Klassen. Für jedes Objekt im Objektmodell muß im Klassenmodell eine zugehörige Klasse definiert werden. Die zweite Bedingung bezieht sich auf die Relationen im Objektmodell und im Klassenmodell. Für jede Relation zwischen Objekten im Objektmodell muß im Klassenmodell eine Relation zwischen den Klassen der Objekte modelliert werden.

2.3 Graphentheorie

Die **Graphentheorie**, ein Teilgebiet der kombinatorischen Mathematik, kann auf eine 250-jährige Geschichte zurückblicken. In den letzten Jahren wurde ihre Anwendbarkeit für Aufgaben des Ingenieurwesens immer deutlicher. Für die Vielzahl der im Ingenieurwesen auftretenden topologischen Probleme bietet die Graphentheorie Algorithmen, deren Funktionsweisen klar definiert und beschrieben sind.

In diesem **Kapitel** wird die Nomenklatur der Graphen festgelegt, auf denen die Modellbeschreibungen in dieser Arbeit aufbauen. Neben der Definition von Bezeichnungen werden spezielle Formen von Graphen beschrieben. Es sollen die Grundlagen vermittelt werden, die zum Verständnis der vorliegenden Arbeit notwendig sind.

2.3.1 Definitionen

Ein **Graph** besteht aus mindestens einer Menge von Elementen und einer aufgeprägten Struktur. Für die mathematische Formulierung von Graphen kann die Mengen- und Relationsalgebra [Brandstädt, 1994; Damrath, 1997] herangezogen werden.

Alle Elemente der Menge(n) eines Graphen sind unterscheidbar und besitzen die gleichen Eigenschaften. Innerhalb der Graphentheorie werden die Elemente auch als **Knoten** bezeichnet. Sie sind identifizierbar, d. h. die Knoten sind eigenständige Objekte.

Die Struktur eines Graphen wird durch eine **Relation** beschrieben. Eine Relation besteht aus einer Menge von Kanten, mit denen die Beziehungen zwischen den Knoten definiert werden.

Eine **Kante** besteht aus einem geordneten Paar. Die Kante $e = (u,v) \neq (v,u)$ setzt den Anfangsknoten u und den Endknoten v in Beziehung zueinander. Eine gerichtete Kante verbindet die Knoten in einer Richtung. Eine ungerichtete Kante verbindet die Knoten in beide Richtungen. Die Elemente u und v werden auch als Nachbarelemente bezeichnet. In diesem Fall ist v adjazent zu u. Die Elemente u und v sind mit der Kante e inzident. Die Kante $e = (u,u)$ mit demselben Anfangs- und Endknoten wird als Schlinge bezeichnet. Eine Kante ist nur in Abhängigkeit der Knoten identifizierbar und somit auch kein eigenständiges Objekt. Aus der Definition der Kante als ein geordnetes Paar folgt, das im weiteren Verlauf nur gerichtete Kanten behandelt werden, sofern nicht gesondert auf ungerichtete Kanten hingewiesen wird.

2.3.2 Der schlichte Graph

Ein **schlichter Graph** besteht aus einer Menge von Knoten und einer Relation zwischen den Knoten.

Definition: Ein schlichter Graph ist das Gebilde G := (V; R) und besteht aus einer homogenen Menge V und einer homogenen binären Relation $R \subseteq V \times V$ (12).

$$G := (V;\ R) \qquad R \subseteq V \times V \tag{12}$$

Die Darstellung eines schlichten Graphen erfolgt in einem Graphendiagramm mit Hilfe von Knoten und gerichteten Kanten. Die Elemente der Menge V entsprechen den Knoten. Die Menge V wird daher auch als Knotenmenge bezeichnet. Die Relation R besteht aus einer Menge von gerichteten Kanten. Sie heißt daher auch Kantenmenge.

Die **Eigenschaften** des schlichten Graphen beziehen sich auf die Menge V und die Relation R. Die Knoten eines schlichten Graphen sind eindeutig identifizierbare Objekte und somit eigenständige Objekte. Die gerichteten Kanten sind durch ein geordnetes Knotenpaar identifizierbar und keine eigenständigen Objekte. Zur eindeutigen Identifikation von Kanten darf zwischen zwei Knoten höchstens eine Kante im Graphen existieren. Parallele Kanten zwischen zwei Knoten sind dadurch ausgeschlossen. Das

Klassenmodell eines schlichten Graphen wird in Abbildung 15 dargestellt.

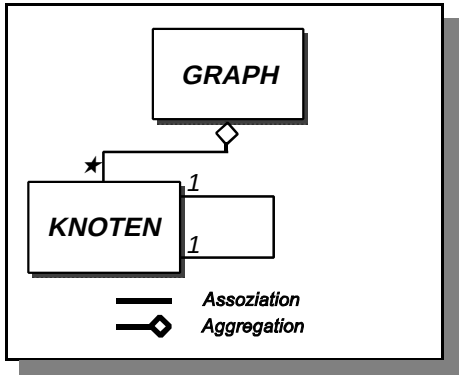

Abbildung 15: schlichter Graph

Bei der Abbildung eines **Verkehrsnetzes** mit einem schlichten Graphen entsprechen die Knoten den Verkehrsknoten und die Kanten den Verkehrsverbindungen. Durch die Bedingung, keine parallelen Kanten abbilden zu können, ist der schlichte Graph als Grundlage für ein multimodales Verkehrsnetz ungeeignet. Aus diesem Grund wird der Pfeilgraph als Sonderform eines bipartiten Graphen im folgenden Kapitel definiert.

2.3.3 Der Pfeilgraph

Für Problemstellungen, in denen parallele Kanten benötigt werden, bietet die Graphentheorie die Struktur des **Pfeilgraphen** als Sonderform eines bipartiten Graphen. Der Pfeilgraph als Sonderform des bipartiten Graphen heißt auch Multigraph [Damrath, 1997].

Definition: Ein Gebilde G := (V, K; a, e) mit den Mengen V und K und den Abbildungen a: K → V und e: K → V heißt Pfeilgraph (13).

$$G := (V,\ K;\ a,\ e) \qquad a: K \rightarrow V \qquad e: K \rightarrow V \tag{13}$$

In einem Graphendiagramm wird der Pfeilgraph durch Knoten und Pfeile dargestellt. Die Elemente der Menge V entsprechen den Knoten. Die Menge V wird daher auch als Knotenmenge bezeichnet. Die Menge K besteht aus einer Menge von Pfeilen . Sie heißt daher auch Pfeilmenge.

Die Kombination aus einem Eingangsknoten e(k), einer Kante k der Kantenmenge K und einem Ausgangsknoten a(k) wird als **Pfeil** definiert. Der Pfeil ist vergleichbar mit einer assoziierten Klasse. Bedingung für einen Pfeil ist, dass eine Kante aus der Menge K mit keinem oder genau mit zwei Knoten aus der Menge V verbunden ist. Die Abbildung e wird auch als Eingangsinzidenz und die Abbildung a auch als Ausgangsinzidenz bezeichnet. Die Pfeile in einem Pfeilgraphen werden häufig auch als Kanten bezeichnet.

Die **Eigenschaften** des Pfeilgraphen beziehen sich auf die Knotenmenge V und die Pfeilmenge K. Sowohl die Knoten als auch die Pfeile des Pfeilgraphen sind eindeutig identifizierbare Objekte und somit eigenständige Objekte. Parallele Pfeile zwischen einem Eingangsknoten und einem Ausgangsknoten sind zugelassen. Das Klassenmodell eines Pfeilgraphen wird in Abbildung 16 dargestellt.

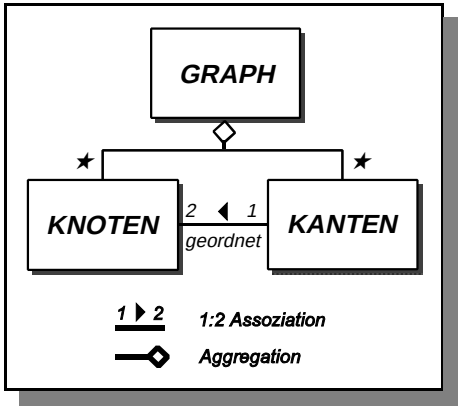

Abbildung 16: Pfeilgraph

Bei der Abbildung eines **Verkehrsnetzes** mit einem Pfeilgraphen entsprechen die Knoten den Verkehrsknoten und die Kanten bzw. Pfeile den Verkehrsverbindungen. In dieser Arbeit wird ein **Verkehrsnetz** grundsätzlich als Pfeilgraph behandelt, da mit ihm parallele Kanten modelliert werden können. Des weiteren ist eine objektorientierte Modellierung eines Pfeilgraphen infolge der eigenständigen Knoten und Kanten einfacher als ein schlichter Graph zu realisieren.

2.3.4 Bewertung von Graphen

Für die Wegesuche in Verkehrsnetzen sind die Knoten und Kanten des Graphen zu bewerten. Werden Elemente eines Graphen mit einer **Bewertung** verknüpft, so besteht

diese Bewertung aus Wahrheitswerten (wahr, falsch), literalen Werten (z. B. A - Z), “scharfen“ reellen Zahlen oder “unscharfen“ Zahlen (Fuzzy-Zahlen).

Definition: Ein Gebilde G := (V, K; a, e; w_V, w_K) mit den Abbildungen w_V: V → $\mathbb{R}^+$ und w_K: K → $\mathbb{R}^+$ heißt reell bewerteter Pfeilgraph (14).

$$G := (V,\ K;\ a,\ e,\ w_V,\ w_K) \qquad \textbf{(14)}$$

$$a: K \rightarrow V \qquad e: K \rightarrow V \qquad w_V: V \rightarrow \mathbb{R}^+ \qquad w_K: K \rightarrow \mathbb{R}^+$$

Für die reelle Bewertung sind im Rahmen der Anwendungen entsprechende Werte einzusetzen. Reelle Bewertungen werden als grundsätzlich positiv definiert.

Bei der Verwendung von Algorithmen der Wegesuche in der Graphentheorie wird in der Regel auf die **Bewertung von Knoten** verzichtet und ausschließlich mit Bewertungen von Kanten gearbeitet. In diesen Fällen werden die Bewertungen der Knoten auf die Bewertungen von allen vom Knoten wegführenden Kanten addiert. Für die Algorithmen der Wegesuche ist aus diesem Grund die Verwendung eines Pfeilgraphen mit reeller Kantenbewertung ausreichend. Bei der Modellierung von Verkehrsnetzen ist das getrennte Vorhalten von Knoten- und Kantenbewertungen allerdings sinnvoll.

3. Multimodale Netzmodellierung

In diesem Kapitel wird ein **Netzmodell** entwickelt, welches den Belangen des Personenverkehrs Rechnung trägt. Das Modell ermöglicht es, sowohl den motorisierten Individualverkehr als auch den nicht motorisierten Individualverkehr und den öffentlichen Personenverkehr abzubilden. Das Netzmodell hat bezogen auf die in Kapitel 1 beschriebene Modellarchitektur (Kernmodell, Prozessormodell, Nutzermodell) die Funktion eines Kernmodells aus der Sicht des Verkehrswesens. Nach einer Analyse von Verkehrsabläufen werden die zu modellierenden Elemente definiert. Aufbauend auf den beschriebenen Größen wird ein Klassenmodell entwickelt. Den Abschluss dieses Kapitels bilden eine Komplexitätsabschätzung und die Abgrenzung des Gültigkeitsbereiches.

3.1 Analyse

Betrachtet man das **Verkehrsgeschehen**, so sind drei unterschiedliche Gruppen von Elementen zu erkennen, die voneinander abhängen. Zum einen gibt es das Verkehrsaufkommen, welches aus einer Menge von Personen und Gütern besteht, die von einer Quelle zu einem Ziel transportiert werden. Für die Durchführung des Transports werden die vorhandenen Verkehrsmittel genutzt. Für die Nutzung der Verkehrsmittel ist die Existenz von Verkehrswegen Voraussetzung. Der Verkehr besteht aus den Teilbereichen Verkehrsaufkommen, Verkehrsmittel und Verkehrswege. Abbildung 17 zeigt die drei Teilbereiche sowie deren Elemente und Beziehungen, soweit sie den Rahmen dieser Arbeit betreffen.

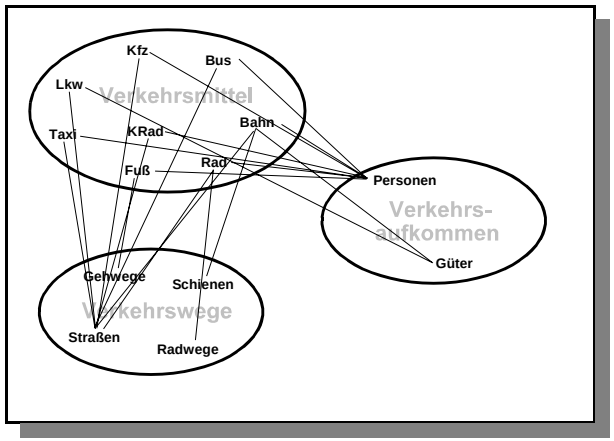

Abbildung 17: Verkehrsgeschehen: Elemente und deren Beziehungen

3.1.1 Verkehrsaufkommen

Mit dem **Verkehrsaufkommen** wird die Summe aller Fahrten von Personen oder Gütern in einem Untersuchungsraum für einen spezifischen Zeitraum bezeichnet. Jede Fahrt hat einen festen Ausgangspunkt und ein vorgegebenes Ziel. Kriterien zur Unterteilung des Verkehrsaufkommens sind die Personen bzw. Güter (Verkehrsaufkommen), der Fahrtzweck und das Zeitbudget. Abbildung 18 zeigt die Klassifizierungen des Verkehrsaufkommens und deren Beziehungen.

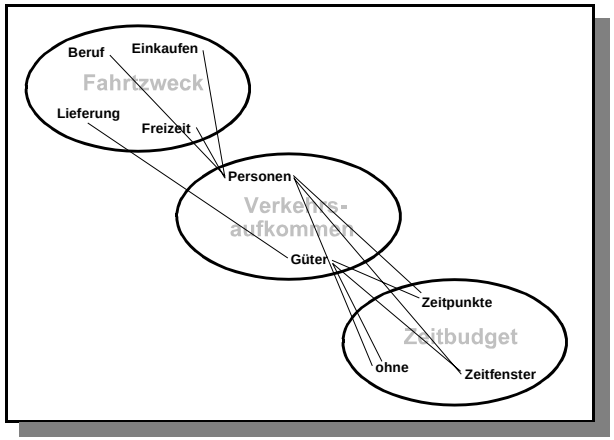

Abbildung 18: Verkehrsaufkommen: Klassifizierungen und deren Beziehungen

Jede Fahrt besitzt einen Fahrtzweck, der für das Entstehen der Fahrt verantwortlich ist. Existiert kein Fahrtzweck, so findet auch keine Fahrt statt. Bezogen auf die Modellierung eines Netzmodells hat der Fahrtzweck nur eine untergeordnete Funktion. Aus diesem Grund wird er im weiteren Verlauf bei der Netzmodellierung nicht gesondert berücksichtigt. Wird das Zeitbudget einer Fahrt als deren Eigenschaft definiert, so teilt sich das Verkehrssaufkommen in die Teilbereiche Personenverkehr und Güterverkehr.

Als **Personenverkehr** werden die Fahrten bezeichnet, die sich mit dem Transport von Personen befassen. Der Weg, auf dem die Fahrt durchgeführt wird, wird durch die auf ihm *transportierten* Verkehrsteilnehmer festgelegt. Jede Fahrt setzt das Vorhandensein eines oder mehrerer Verkehrsmittel voraus, mit denen die Fahrt erfolgen kann.

Der **Güterverkehr** besteht aus der Summe aller Fahrten, auf denen Güter zwischen zwei Punkten transportiert werden. Jede Fahrt wird auf einem oder verschiedenen

Verkehrsmitteln durchgeführt. Im weiteren Verlauf beschränken sich die Untersuchungen auf den Personenverkehr.

3.1.2 Verkehrsmittel

Alle Fahrten werden von den Verkehrsteilnehmern auf einem **Verkehrsmittel** oder mehreren Verkehrsmitteln durchgeführt. Mit dem Begriff Verkehrmittel wird im weiteren Verlauf die Summe aller Einzelfahrzeuge eines Verkehrsmittels bezeichnet. Jedes Verkehrsmittel ist ein Repräsentant aller Einzelfahrzeuge mit gleichen Eigenschaften.

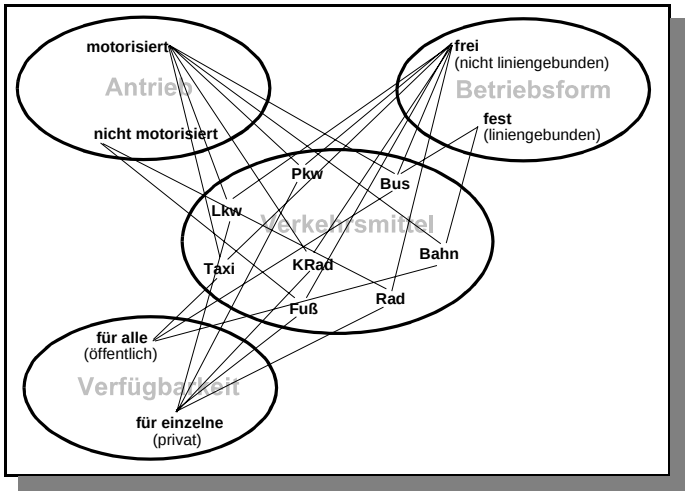

Abbildung 19: Verkehrsmittel: Klassifizierungen und deren Beziehungen

Die Verkehrsmittel können anhand unterschiedlicher Kriterien klassifiziert werden. Abbildung 19 zeigt die Verkehrsmittel, welche im Zusammenhang mit dem Personenverkehr in dieser Arbeit behandelt werden. Zu den Eigenschaften der Verkehrsmittel gehören die Verfügbarkeit für den Verkehrsteilnehmer, der Antrieb und die Betriebsform des Verkehrsmittels. Eine Untersuchung der Verkehrsmittel im Personenverkehr ergibt, dass eine Unterscheidung in öffentliche und private Verkehrsmittel, motorisierte und nicht motorisierte Verkehrsmittel und liniengebundene und nicht liniengebundene Verkehrsmittel vorgenommen werden kann.

Die Charakteristik der **öffentlichen Verkehrsmittel** ist die allgemeine räumliche und zeitliche Verfügbarkeit der einzelnen Systeme für die Verkehrsteilnehmer. Bei den öffentlichen Verkehrsmitteln sind Unterteilungen in motorisierte und nicht motorisierte

bzw. liniengebundene und nicht liniengebundene Verkehrsmittel möglich.

Im Gegensatz zu öffentlichen Verkehrsmitteln können die **privaten Verkehrsmittel** nicht von allen Verkehrsteilnehmern genutzt werden. Ein privates Verkehrsmittel steht nur einer begrenzten Anzahl von Verkehrsteilnehmern zur Verfügung. Ein klassisches Beispiel ist der private Pkw. Die privaten Verkehrsmittel können in motorisierte und nicht motorisierte Verkehrsmittel aufgeteilt werden. Auch kann eine Unterscheidung in liniengebundene und nicht liniengebundene private Verkehrsmittel vorgenommen werden. Betrachtet man die zur Zeit existierenden Verkehrsmittel, so sind private liniengebundene Verkehrsmittel nicht präsent. Ein Beispiel für ein liniengebundenes privates Verkehrsmittel wäre eine Straßenbahn, die aus bestimmten Gründen von einem oder mehreren Verkehrsteilnehmern privat genutzt wird. In den folgenden Abschnitten werden nur private nicht liniengebundene Verkehrsmittel betrachtet.

Die **motorisierten öffentlichen Verkehrsmittel** bilden den Hauptanteil an den öffentlichen Verkehrsmitteln. Hier sind vor allem der Bus und die Bahn in ihren verschiedenen Ausprägungen, z. B. Linienbus, Überlandbus, Stadtbahn und Straßenbahn, zu nennen. Daneben existieren Sonderformen dieser beiden Systeme, z. B. der Rufbus. Als Rufbusse werden Buslinien bezeichnet, die nur bei Bedarf Haltestellen in ihrem Einzugsbereich anfahren. Ein weiteres öffentliches motorisiertes Verkehrsmittel ist das Taxi. Eine Taxifahrt kann aber auch als eine besondere Form einer Fahrt mit einem privaten Pkw bezeichnet werden, da der Verkehrsteilnehmer das Taxi gegen Bezahlung quasi als privates Verkehrsmittel nutzt. Nicht viel anders sieht es bei Anruf-Sammel-Taxen aus. AST-Taxen sind auch vergleichbar mit einem Rufbus.

Als **nicht motorisierte öffentliche Verkehrsmittel** können die in Kopenhagen vorhandenen und in Hannover geplanten Stadträder eingeordnet werden. Das Stadtrad ist ein Fahrrad, welches von jedem Verkehrsteilnehmer genutzt werden kann. Gegen eine geringe Gebühr oder ein Pfand kann das Fahrrad an spezifischen Punkten gemietet werden. Das Ende einer Fahrt mit dem Stadtrad muß dabei nicht am Ausgangspunkt der Fahrt liegen. Die Fahrten mit dem Stadtrad sind infolge der festen Abstellorte nur in ihrem Start und Ziel festgelegt. Eine Fahrt mit dem Stadtrad kann auch als eine Sonderform der Fahrt mit einem privaten Fahrrad bezeichnet werden, da auch hier das Verkehrsmittel von dem Verkehrsteilnehmer für die Fahrt gemietet wird und anderen Verkehrsteilnehmern nicht mehr zur Verfügung steht.

Liniengebundene öffentliche Verkehrsmittel sind Verkehrsmittel, deren Wegewahl durch Randbedingungen eingeschränkt wird. Die Wegewahl einer Buslinie ist durch die Vorgabe der anzufahrenden Haltestellen festgelegt. Der Fahrtverlauf einer Fahrt ist vorgegeben. Bei der Wahl des Weges von einem Start zu einem Ziel sind durch die Vorgabe fester Fahrwege häufig Umwege vom Verkehrsteilnehmer in Kauf zu nehmen. Ausnahmen bilden verschiedene Betriebsformen des Verkehrsmittels Rufbus, bei denen flexible Fahrwege möglich sind. Betriebsformen für den Rufbus sind der Linienbetrieb,

der Richtungsbandbetrieb und der Flächenbetrieb. Rufbusse im Linienbetrieb besitzen die gleichen Eigenschaften wie liniengebundene Verkehrsmittel. Der Unterschied besteht in vorher nicht festgelegten Abfahrtszeiten. Der Richtungsbandbetrieb ist gekennzeichnet durch Haltestellen, die bei jeder Fahrt angesteuert werden und zusätzlichen Haltestellen, an denen nur bei Bedarf gehalten wird. Diese zusätzlichen Haltestellen müssen nicht auf dem Fahrweg liegen, den der Rufbus im Normalfall durchfährt. Im Flächenbetrieb richtet sich die Linienführung bzw. der Fahrweg ausschließlich nach den eingegangenen Fahrtwünschen.

Rufbusse im Flächenbetrieb, das Stadtrad sowie das Taxi werden den **nicht liniengebundenen öffentlichen Verkehrsmitteln** zugeordnet. Die Verkehrsmittel sind hinsichtlich ihrer Wegewahl an keinen vorgeschriebenen Weg gebunden. Einschränkungen bestehen beim Stadtrad und dem Rufbus hinsichtlich der Einstiegs- und Ausstiegspunkte, die durch die Abstellplätze bzw. Haltestellen vorgegeben sind.

Das am häufigsten vertretene **private motorisierte Verkehrsmittel** in einem Verkehrsnetz ist der Pkw. Eine Variante des privaten Pkw bildet das Car-Sharing, bei dem sich mehrere Personen eine begrenzte Anzahl von Kraftfahrzeugen teilen. Da diese Fahrzeuge nur einem bestimmten Personenkreis zur Verfügung stehen, muß auch das Car-Sharing als ein privates Verkehrsmittel angesehen werden. Ein weiteres Verkehrsmittel dieser Kategorie ist das motorisierte Kraftrad (KRAD). Das Verkehrsmittel Kraftrad besitzt im wesentlichen die gleichen Charakteristiken wie der Pkw. Ausnahme ist das regelwidrige jedoch mögliche Fahrverhalten von Krafträdern innerhalb eines Staus.

Bei den **nicht motorisierten privaten Verkehrsmitteln** sind die Verkehrsmittel Fahrrad und “zu Fuß gehen” zu nennen.

Die Fahrten im **gebrochenen Verkehr**, z. B. Park & Ride, können in mehrere Teilfahrten unter Benutzung der bisher aufgeführten Verkehrsmittel aufgeschlüsselt werden. Innerhalb des gebrochenen Verkehrs werden grundsätzlich keine anderen als die bisher beschriebenen Verkehrsmittel benutzt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die in einem Netz vorhandenen Verkehrsmittel in unterschiedliche Teilbereiche eingeteilt werden können. Über das Kriterium Verfügbarkeit erfolgt eine Einteilung in öffentliche und private Verkehrsmittel. Die Art der Fortbewegung eines Verkehrsmittels teilt die Verkehrsmittel in die Bereiche motorisierte und nicht motorisierte Verkehrsmittel. Die dritte Unterscheidung basiert auf der Art der Wegewahl durch die Verkehrsmittel. Neben liniengebundenen Verkehrsmitteln, z. B. Bus und Bahn, existieren nicht liniengebundene Verkehrsmittel, z. B. das Fahrrad. Die Auflistung zeigt, dass die Verkehrsmittel

- Pkw,
- Fahrrad,
- zu Fuß gehen,
- liniengebundene öffentliche (ÖPV liniengebunden) und
- nicht liniengebundene öffentliche Verkehrsmittel (ÖPV nicht liniengebunden)

in die weiteren Betrachtungen einbezogen werden müssen.

3.1.3 Verkehrswege

Grundvoraussetzung für das Vorhandensein von Verkehr sind die **Verkehrswege**, auf denen die Verkehrsmittel verkehren. Mit dem Begriff Verkehrswege wird die Infrastruktur bezeichnet, welche die einzelnen Verkehrsmittel voraussetzen. Die Verkehrswege bestehen aus der Summe aller Strecken sowie den Knoten zwischen den Strecken. Klassifizierungen sind der Besitz und die mögliche Benutzung. Abbildung 20 zeigt die Verknüpfungen der Verkehrswege. Neben den aufgeführten Verkehrswegen Gehweg, Radweg, Straße und Schiene existieren weitere Verkehrswege wie z. B. Wasserstraßen oder Luftstraßen. Die Charakteristiken dieser Verkehrswege unterscheiden sich nicht von den in diesem Kapitel untersuchten Elementen, so dass auf eine gesonderte Behandlung verzichtet wird.

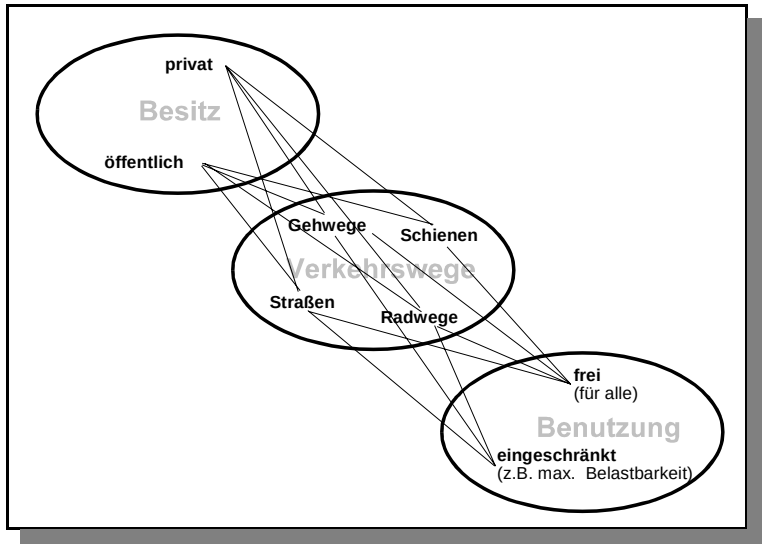

Abbildung 20: Verkehrswege: Klassifizierungen und deren Beziehungen

Aus der Sicht des Verkehrsteilnehmers sind die Eigentumsrechte (Besitz) von Verkehrswegen nicht relevant. Im Gegensatz dazu sind Einschränkungen bei der Benutzung von Verkehrswegen von großer Bedeutung. Eingeschränkte Nutzungsmöglichkeiten oder das Verbot der Nutzung sind über die Beziehungen zwischen den Verkehrsmitteln und den Verkehrswegen abzubilden. Die in dieser Arbeit behandelten Verkehrswege sind Straßen, Schienenwege, Radwege und Gehwege.

Die Summe der Verkehrswege wird als **Verkehrsnetz** definiert. Ein Verkehrsnetz besteht aus den Strecken und Knoten. Ausgehend von den vorhandenen Verkehrswegen können sowohl Straßennetze als auch Schienennetze, Radwege- und Gehwegenetze Bestandteile eines Verkehrsnetzes sein. Ein Verkehrsnetz besteht aus mindestens einem der vier aufgeführten verkehrsmittelspezifischen Netze.

Das **Schienennetz** wird ausschließlich von öffentlichen Verkehrsmitteln, z. B. der Bahn, benutzt. Die Strecken des Schienennetzes bestehen aus den einzelnen Gleisen. Die Knoten sind Kreuzungen bzw. Weichen. Auf dem Schienennetz verkehren in bezug auf den Personenverkehr im allgemeinen liniengebundene öffentliche motorisierte Verkehrsmittel. Der Begriff öffentlich bezieht sich in diesem Zusammenhang nicht auf die Eigentumsrechte an den Verkehrsmitteln, sondern beschreibt die Verfügbarkeit der Verkehrsmittel für den Verkehrsteilnehmer. Neben den Knoten existieren in einem Schienennetz weitere Punkte mit besonderer Bedeutung, die Haltestellen. An den Haltestellen können die Verkehrsteilnehmer in das Verkehrsmittel einsteigen oder es wieder verlassen. Haltestellen liegen zwischen zwei Kreuzungen auf einem Schienenweg. Der Schienenweg wird somit in zwei Teilabschnitte aufgespalten, die durch die Haltestelle miteinander verknüpft werden. Die durch eine Haltestelle verbundenen Schienenwege werden häufig von unterschiedlichen Arten des Verkehrsmittels Bahn benutzt. Je nach Bedeutung des Verkehrsmittels wird an der Haltestelle vorbeigefahren, oder die Haltestelle wird als Ein- und Ausstiegsmöglichkeit von den Fahrgästen genutzt. Ein Vergleich der Haltestellen und der Knoten im Schienennetz zeigt, dass die Haltestellen als Knoten mit besonderer Funktion betrachtet werden können.

Im Gegensatz zum Schienennetz wird ein **Straßennetz** von verschiedenen Verkehrsmitteln als Infrastruktur vorausgesetzt. Neben den privaten motorisierten Verkehrsmitteln (z. B. Pkw) setzen auch öffentliche Verkehrsmittel, z. B. der Bus, ein Straßennetz voraus. Des weiteren werden die Strecken vom Verkehrsmittel Fahrrad genutzt. Bestandteile des Straßennetzes sind Knotenpunkte und Fahrbahnen, welche die Knotenpunkte verbinden. Die Fahrbahnen werden im weiteren Verlauf als Straßen bezeichnet. Im Zusammenhang mit dem Verkehrsmittel Bus existieren in einem Straßennetz Haltestellen als zusätzliche Knoten von Straßenabschnitten. Ein Vergleich der Eigenschaften einer Haltestelle mit den Charakteristiken eines Knotenpunktes ergibt, dass in einem Straßennetz die Haltestellen als Sonderform von Knotenpunkten angesehen werden können. Während an den Knotenpunkten Abbiegemöglichkeiten

bestehen und unter Umständen Haltezeiten beim Überqueren des Knotenpunktes auftreten, sind an Haltestellen keine Abbiegemöglichkeiten vorhanden. Haltezeiten entstehen sobald eine Haltestelle von einem Verkehrssystem als Ein- und Ausstiegsmöglichkeit genutzt wird.

Mit dem **Radwegenetz** steht dem Verkehrsmittel Fahrrad neben dem Straßennetz eine weitere Infrastruktur zur Verfügung. Das Radwegenetz besteht aus den Radwegen und entsprechenden Knoten. Die Knoten werden zum Teil auch von anderen Verkehrsmitteln benutzt. Die Straßenkreuzung ist dafür ein Beispiel, sofern die Radwege parallel zu den an die Straßenkreuzung angeschlossenen Straßen verlaufen. Die Radwege werden ausschließlich vom Verkehrsmittel Fahrrad genutzt.

Das **Gehwegenetz** steht ausschließlich dem Verkehrsmittel *"zu Fuß gehen"* zur Verfügung und setzt sich aus den Gehwegen und Knoten von Gehwegen zusammen. Die Knoten im Gehewegenetz, z. B. eine Straßenkreuzung, werden zum Teil von anderen Verkehrsmitteln benutzt.

Die Struktur eines Verkehrsnetzes kann **zusammenfassend** durch punktförmige Elemente (z. B. Haltestelle, Straßenkreuzung) und Elemente mit Streckencharakter (z. B. Straßen, Radwege) beschrieben werden. Die einzelnen Elemente werden zum Teil von mehreren Verkehrsmitteln genutzt (z. B. Straße).

3.2 Klassenmodell

Das **Klassenmodell** beschreibt die Elemente und die allgemeinen Zusammenhänge zwischen den Elementen in einem multimodalen Verkehrsnetz. Aus den zuvor beschriebenen Aspekten über Verkehrsaufkommen, Verkehrsmittel und Verkehrswege ergibt sich für das Verkehrsgeschehen ein Klassenmodell, welches in die drei Teilbereiche Verkehrsaufkommen, Verkehrsmittel und Verkehrswege eingeteilt wird.

Für den Entwurf eines Klassenmodells sind die **Beziehungen** zwischen den Elementen des Verkehrsgeschehens zu untersuchen. Eine wesentliche Beziehung ist die Abhängigkeit zwischen dem Verkehrsteilnehmer, den Verkehrsmitteln und den Verkehrswegen. Jede Fahrt im Verkehrsablauf wird von einer Menge von Verkehrsteilnehmern mit einem oder mehreren Verkehrsmitteln auf Verkehrswegen durchgeführt. Dabei stehen die Verkehrsmittel und die Verkehrswege in besonderer Beziehung. Während eine Fahrt mit nahezu jedem Verkehrsmittel erfolgen kann, sind die möglichen Beziehungen zwischen den Verkehrsmitteln und den Verkehrswegen eingeschränkt. Aus der Betrachtung der Realität ergeben sich spezifische Verkehrsmittel-Verkehrswege-Kombinationen, die im Modell abzubilden sind.

Das Klassenmodell für die Modellierung multimodaler Verkehrsnetze bildet das

Kernmodell der in Kapitel 1 beschriebenen Modellarchitektur (Kernmodell, Prozessormodell, Nutzermodell). Aus der Sicht der Verkehrsplanung entsteht ein Modell, auf dessen Basis unterschiedliche Problemstellungen bearbeitet werden können. Das Modell formuliert keine Aussagen über Funktionalitäten oder Sichten. Das Kernmodell ist die Basis für die Entwicklung von Nutzer- und Prozessormodellen.

Die Klassen des Kapitels **Verkehrsaufkommen** ergeben sich aus der Beschreibung des Verkehrsaufkommens. Für das Modell wird eine Klasse für das Verkehrsaufkommen und eine Klasse für einen Transportvorgang (Fahrt) definiert. Mit der Klasse *Verkehrsaufkommen* wird die Summe aller Transportvorgänge (Fahrten) umschrieben. Die Klasse *Fahrt* steht für eine Menge von Verkehrsteilnehmern, die alle denselben Fahrtwunsch von einer bestimmten Quelle zu einem bestimmten Ziel besitzen.

Betrachtet werden die **Beziehungen** zwischen den Klassen des Teilbereiches Verkehrsaufkommen. Das Verkehrsaufkommen besteht aus einer Menge von Fahrten (Quelle-Ziel-Beziehungen). Es wird eine 1:n-Aggregation zwischen der Klasse *Verkehrsaufkommen* und der Klasse *Fahrt* definiert. Eine Menge von Fahrten existiert nur dann, wenn auch ein Verkehrsaufkommen vorhanden ist.

Im Teilbereich **Verkehrsmittel** wird für die Menge der Verkehrsmittel eine Klasse *Verkehrsmittelmenge* und eine Klasse *Verkehrsmittel* für ein Verkehrsmittel definiert. Im vorherigen Kapitel ist eine Klassifizierung der Verkehrsmittel vorgenommen worden. Die Unterteilung der Verkehrsmittel in öffentliche und private, motorisierte und nicht motorisierte sowie liniengebundene und nicht liniengebundene Verkehrsmittel ergibt die Menge der Verkehrsmittel, für die Klassen zu entwerfen sind. Als Verkehrsmittel werden

- liniengebundene öffentliche Verkehrsmittel (z. B. Bus, Bahn),
- nicht liniengebundene öffentliche Verkehrsmittel (z. B. Rufbus, AST),
- der Personenkraftwagen (Pkw),
- das Fahrrad und
- das “zu Fuß gehen”

in das Klassenmodell aufgenommen.

Die **Beziehung** zwischen der Klasse *Verkehrsmittelmenge* und der Klasse *Verkehrsmittel* ist eine 1:1-Aggregation. Zwischen den Klassen der einzelnen Verkehrsmittel (z. B. Pkw) und der Klasse *Verkehrsmittel* wird eine Generalisierung in das Modell integriert.

Auf der Ebene der **Verkehrswege** existieren im Klassenmodell eine Klasse für das Verkehrsnetz und Klassen für seine Bestandteile. Die Basiselemente des Verkehrsnetzes sind die Knoten und die Strecken. Es erfolgt die Definition einer Klasse für einen

Knoten und einer Klasse für eine Strecke. Analog zu den Beschreibungen der Verkehrswege im vorherigen Kapitel entstehen weitere spezielle Klassen für

- Weichen bzw. Schienenkreuzungen,
- Haltestellen,
- Knotenpunkte,
- Radwegknoten und
- Gehwegknoten

als Spezialisierung der Klasse *Knoten* und

- Schienenwege bzw. Gleise,
- Straßen,
- Radwege und
- Gehwege

als Spezialisierung der Klasse *Strecke*.

Als **Beziehungen** zwischen den speziellen Klassen und den Basisklassen (Knoten und Strecke) wird eine Generalisierung bzw. eine Spezialisierung eingeführt. In einem Verkehrsnetz ist jede Strecke mit genau zwei Knoten verbunden. Zwischen der Klasse für eine Strecke und der Klasse für einen Knoten wird eine 1:2-Assoziation definiert. Ein Verkehrsnetz besteht aus einer Menge von Knoten und einer Menge von Strecken. Die Klasse Verkehrsnetz wird mit jeweils einer 1:n-Aggregation mit den Klassen *Knoten* und *Strecke* verbunden. Das Teilmodell der Klassen *Verkehrsnetz*, *Knoten* und *Strecke* bildet einen Pfeilgraphen.

Die zwischen den einzelnen Teilbereichen zu modellierenden **übergreifenden Beziehungen** bestehen aus einer Verknüpfung der Fahrten mit den Verkehrsmitteln und einer Verknüpfung von Verkehrsmitteln und Verkehrswegen. Eine Fahrt kann mit einem oder mehreren Verkehrsmitteln durchgeführt werden. Die Klasse *Fahrt* wird mit allen vorhandenen Verkehrsmitteln über eine 1:1-Assoziation verknüpft. Als Beziehungen zwischen den Spezialisierungen der Klasse *Verkehrsmittel* (z. B. Pkw) und den Bestandteilen der Verkehrswege werden 1:n-Assoziationen integriert. Es entstehen die Beziehungen

- ÖPV (liniengebunden) - Schienenweg / Weiche,
- ÖPV (liniengebunden) - Straße / Knotenpunkt,
- ÖPV (nicht liniengebunden) - Schienenweg / Weiche,
- ÖPV (nicht liniengebunden) - Straße / Knotenpunkt,
- Pkw - Straße / Knotenpunkt,
- Fahrrad - Straße / Knotenpunkt,
- Fahrrad - Radweg / Radwegknoten,

– Fahrrad - Radweg / Knotenpunkt,
– zu Fuß gehen - Gehweg / Gehwegknoten und
– zu Fuß gehen - Gehweg / Knotenpunkt.

In der Abbildung 21 werden die Klassen des Klassenmodells und die Beziehungen noch einmal graphisch dargestellt.

3.3 Komplexitätsabschätzung

Die **Aufteilung des Modells** in drei Teilbereiche fördert die Übersichtlichkeit und Transparenz der Vorgänge und Beziehungen in einem multimodalen Verkehrsnetz. Durch die Aufteilung erhält das Modell einen modularen Aufbau und kann einfach mit neuen Elementen aus der Verkehrsplanung erweitert werden.

Die Anwendung der **objektorientierten Modellierungstechnik** liefert einfach strukturierte Relationen zwischen den Klassen im Modell. Die Eigenschaften der Relationen sind durch die Graphentheorie beschrieben. Die klare Struktur der Beziehungen im Klassenmodell läßt eine Implementation des Modells mit Hilfe von wenigen spezifischen Datenstrukturen zu, deren Charakteristiken durch die Literatur festgelegt sind.

3.4 Gültigkeitsbereich

Mit dem formulierten **Netzmodell** ist eine integrierte Modellierung unterschiedlicher Verkehrsmittel in einem Verkehrsnetz möglich. Dabei werden die Verkehrsmittel gleichberechtigt in das Verkehrsnetz eingebunden. Besteht die Möglichkeit, den Streckenelementen und Knoten Attribute zuzuordnen, kann das Netzmodell für die Durchführung einer Wegesuche herangezogen werden.

Die Hierarchie des **Klassenmodells** läßt die Integration neuer Verkehrselemente zu, ohne dass die vorhandenen Strukturen modifiziert werden. Dadurch wird eine hohe Flexibilität des Modells erreicht. Der Aufbau des Klassenmodells läßt es zu, dass durch die Wahl der Relation zwischen der Menge der Verkehrsmittel und den einzelnen Verkehrsmitteln als 1:1-Aggregation bzw. als 1:n-Aggregation die Verkehrsmittel als Summe aller Einzelfahrzeuge bzw. als Einzelfahrzeuge mit diesem Modell abgebildet werden können.

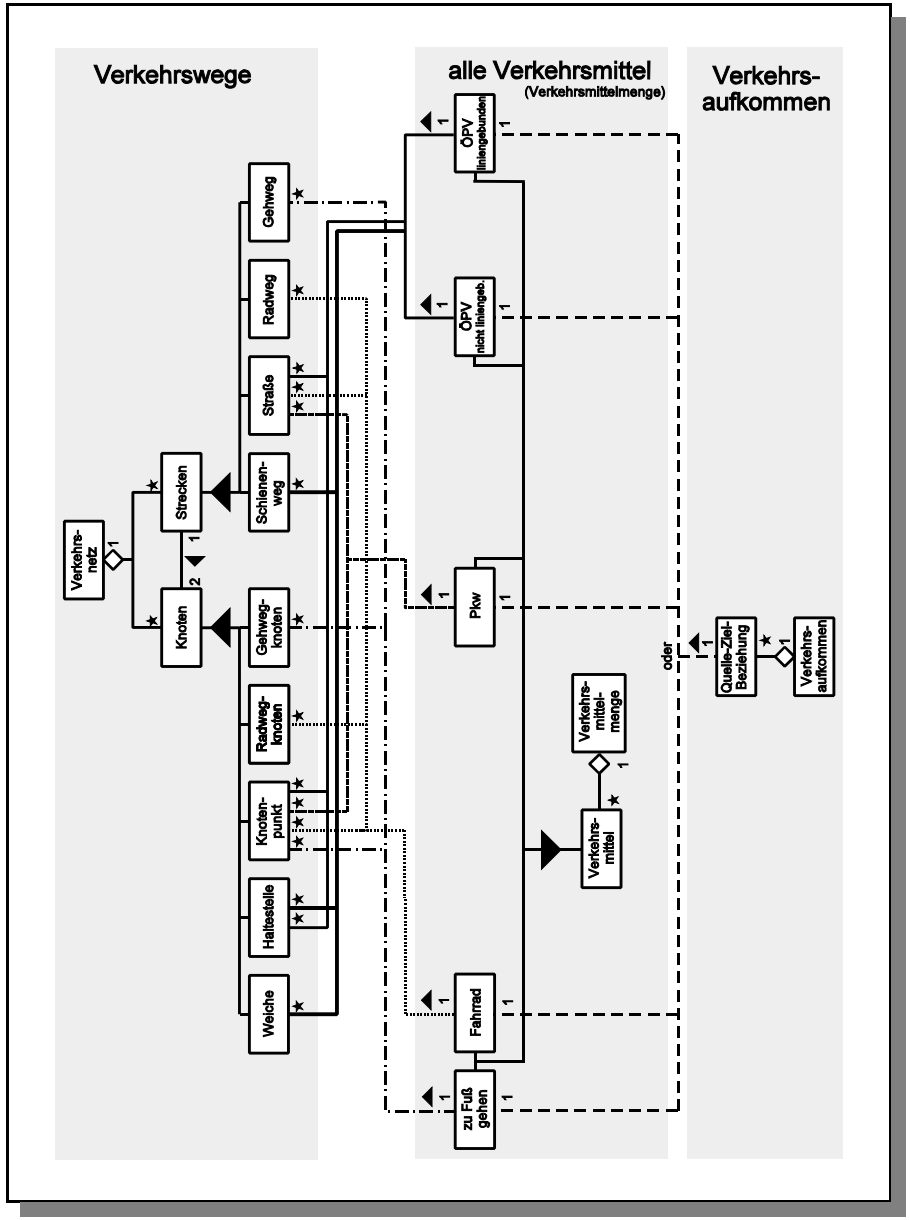

Abbildung 21: Multimodale Netzmodellierung: Klassenmodell

Einschränkungen bestehen in der Modellierung von verkehrsmittelspezifischen Eigenschaften. Werden Knoten von Streckenelementen unterschiedlicher Verkehrsmittel zum Aufbauen einer Netzstruktur genutzt, muß auf die Modellierung von verkehrsmittelspezifischen Eigenschaften an den Knoten verzichtet werden. Diese Attribute sind auf die angeschlossenen Streckenelemente zu verlagern. Die Eigenschaften des liniengebundenen Verkehrs sind nur durch zusätzliche Maßnahmen modellierbar. Abhängigkeiten zwischen Verkehrsmitteln auf einem Streckenelement sind über zusätzliche Strukturen abzubilden. Das Wegewahl- und Verkehrsmittelwahlverhalten von Verkehrsteilnehmern wird in diesem Netzmodell nicht berücksichtigt.

3.5 Zusammenfassung

Als Datengrundlage ist ein **Netzmodell** entstanden, mit dem der Personenverkehr modelliert werden kann. Ausgehend von den Teilbereichen Verkehrsaufkommen, Verkehrsmittel und Verkehrswege ist ein Klassenmodell entwickelt worden. Das Verkehrsaufkommen besteht aus der Summe aller Beförderungsfälle (Fahrten) im Untersuchungsraum innerhalb eines spezifischen Zeitintervalls. Die Verkehrsmittel können wahlweise als Einzelfahrzeuge eines Typs (z. B. Pkw, Fahrrad, Taxi) oder als Summe aller Einzelfahrzeuge eines Typs interpretiert werden. Die Verkehrswege bilden die Infrastruktur für die Verkehrsmittel. Das Modell beinhaltet die Beziehungen

- Verkehrsaufkommen - Fahrt,
- Fahrt - Verkehrsmittel (z. B. Fahrrad)

und die Verkehrsmittel-Verkehrswege-Kombinationen

- ÖPV (liniengebunden) - Schienenweg / Weiche,
- ÖPV (liniengebunden) - Straße / Knotenpunkt,
- ÖPV (nicht liniengebunden) - Schienenweg / Weiche,
- ÖPV (nicht liniengebunden) - Straße / Knotenpunkt,
- Pkw - Straße / Knotenpunkt,
- Fahrrad - Straße / Knotenpunkt,
- Fahrrad - Radweg / Radwegknoten,
- Fahrrad - Radweg / Knotenpunkt,
- zu Fuß gehen - Gehweg / Gehwegknoten und
- zu Fuß gehen - Gehweg / Knotenpunkt.

Durch die angewandte objektorientierte Modellierungstechnik ist das Modell modular erweiterbar. Das entwickelte Netzmodell entspricht dem Kernmodell innerhalb der in Kapitel 1 beschriebenen Modellarchitektur.

Einschränkungen hinsichtlich des Gültigkeitsbereiches betreffen verkehrsmittelspezi-

fische Eigenschaften von Knoten in einem Verkehrsnetz, das Verhalten von Verkehrsteilnehmern, auf einem Streckenelement sich beeinflussende Verkehrsmittel sowie den liniengebundenen Verkehr.

4. Alternative Wege

Für die integrierte Berechnung der Verkehrsaufteilung ist eine Voraussetzung die Suche alternativer Wege. Das **Kapitel** beschäftigt sich mit Wegen und Wegemengen alternativer Wege. Als Wegemengen werden die minimale Wegemenge, die einfach beschränkte Wegemenge, die elementar beschränkte Wegemenge und die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge definiert. Die Darstellung von Beispielen und die Bewertung der Wegemengen aus Sicht der Verkehrsplanung bilden den Abschluss.

Die folgenden Definitionen und Beschreibungen von Wegen beziehen sich auf die Elemente eines **Pfeilgraphen**. Der Pfeilgraph als Gebilde (V, K; a, e) ist eine Sonderform des bipartiten Graphen. Der Pfeilgraph besteht aus einer Knotenmenge V und einer Kantenmenge K sowie einer Eingangsinzidenz e und einer Ausgangsinzidenz a (15).

$$G := (V,K;a,e) \quad a\colon K \rightarrow V \quad e\colon K \rightarrow V \tag{15}$$

Die Knotenmenge V und die Kantenmenge K sind disjunkte Mengen. Die Knoten der Knotenmenge V und die Kanten der Kantenmenge K sind eigenständige identifizierbare Objekte. Über die Eingangsinzidenz e und die Ausgangsinzidenz a werden die Objekte der Knotenmenge und der Kantenmenge verknüpft. Die Ausgangsinzidenz a ordnet jeder Kante k der Kantenmenge K eindeutig einen Ausgangsknoten $v_a = a(k) \in V$ zu. Die Eingangsinzidenz e ordnet jeder Kante k der Kantenmenge K eindeutig einen Eingangsknoten $v_e = e(k) \in V$ zu. Zwischen einem Knoten v_a und einem Knoten v_e können mehrere parallele Kanten existieren.

Ein **Weg** besteht aus einer eindeutigen Folge von Kanten, die miteinander verkettet werden. Dabei ist der Eingangsknoten der einen Kante identisch mit dem Ausgangsknoten der folgenden Kante. Der Weg vom Knoten $x \in V$ zum Knoten $y \in V$ wird als Weg p(x,y) bezeichnet (16).

$$\begin{gathered} p(x,y) := \langle k_1,k_2,k_3,\ldots,k_n \rangle \\ \textit{Bedingung}\colon\ a(k_1) = x \wedge e(k_n) = y \wedge \bigwedge_{i=1}^{n-1} (e(k_i) = a(k_{i+1})) \end{gathered} \tag{16}$$

Ein Weg p(x,y) mit $x \neq y$, auf dem ein Knoten z mehrmals vorkommt, enthält einen **Zyklus** durch z. Enthält der Weg p(x,y) keinen Knoten mehr als einmal, so ist der Weg

ohne Zyklus bzw. zyklenfrei. Ein Weg p(x,x), dessen Endknoten gleich dem Anfangsknoten ist, ist ein Zyklus durch x. Ein Weg $p(x,x) = \langle\rangle$ ohne Kanten heißt leerer Weg und wird mit λ bezeichnet.

Eine **Wegemenge** P(x,y) besteht aus einer Menge von Wegen p(x,y) zwischen dem Anfangsknoten $x \in V$ und dem Endknoten $y \in V$ (17).

$$P(x,y) := \{\ p(x,y)\ \} \tag{17}$$

Alle Wege der Menge P(x,y) besitzen denselben Anfangsknoten und denselben Endknoten. Enthält der Graph G Zyklen, so ist die Menge P(x,y) unendlich. In einem zyklenfreien Graphen ist die Wegemenge P(x,y) endlich. Die **vollständige Wegemenge** P*(x,y) enthält alle möglichen Wege in einem Graphen G zwischen den Knoten x und y.

Die **Wegemenge alternativer Wege** $P_A(x,y)$ zwischen den Knoten $x \in V$ und $y \in V$ ist eine Teilmenge der vollständigen Wegemenge P*(x,y) (18). Anhand einer Bewertung, welche für die Wege definiert werden muß, können die alternativen Wege innerhalb der vollständigen Wegemenge bestimmt werden.

$$P_A(x,y) \subseteq P^*(x,y) \tag{18}$$

Die **Bewertung** eines Weges kann auf unterschiedliche Weise formuliert werden. Wege können deterministisch ("scharf") oder auf der Basis der Fuzzy-Theorie ("unscharf") bewertet werden. Beide Ansätze werden in den folgenden Kapiteln behandelt.

4.1 Deterministisch bewertete Wegemengen

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf einen **bewerteten Pfeilgraphen**. Der bewertete Pfeilgraph ist das Gebilde (V, K; a, e; u_d). Jeder Kante k der Kantenmenge K des Pfeilgraphen wird als Kantenlänge eindeutig ein positiver reeller Wert über die Bewertungsfunktion $u_d \in \mathbb{R}^+$ zugeordnet (19).

$$G := (V,K;a,e;u_d) \quad u_d\colon K \rightarrow \mathbb{R}^+ \tag{19}$$

Der Weg p(x,y) beschreibt die Folge von Kanten von einem Knoten x zu einem Knoten

y. Jedem deterministisch **bewerteten Weg** $p_d(x,y)$ wird eine Weglänge $w_d(x,y) \in \mathbb{R}^+$ zugeordnet. Die Weglänge $w_d(x,y)$ berechnet sich aus den Kantenlängen $u_d \in \mathbb{R}^+$ der Kanten auf dem Weg $p_d(x,y)$. Die Weglänge $w_d(x,y)$ wird als Summe der Kantenlängen u_d auf dem Weg $p_d(x,y)$ definiert (20). Ein leerer Weg λ erhält die Weglänge 0.

$$\begin{aligned} p_d(x,y) &= \langle k_1,\ k_2,\ \cdots,\ k_n \rangle \\ w_d(x,y) &:= \sum_i^n u_{dk_i} \end{aligned} \qquad \textbf{(20)}$$

Zwei deterministisch bewertete Wege $p_{d,i}(x,y)$ und $p_{d,k}(x,y)$ können bezüglich ihrer Weglängen miteinander verglichen werden. Als Symbol der Vergleichbarkeit wird das Zeichen $\sqsubseteq$ mit der Bedeutung "kürzer oder gleich lang" eingeführt. Der Weg $p_{d,i}(x,y)$ ist "kürzer oder gleich lang" als der Weg $p_{d,k}(x,y)$, wenn seine Weglänge $w_{d,i}(x,y)$ kleiner oder gleich der Weglänge $w_{d,k}(x,y)$ ist (21).

$$p_{d,i}(x,y) \sqsubseteq p_{d,k}(x,y) :\Leftrightarrow w_{d,i}(x,y) \leq w_{d,k}(x,y) \qquad \textbf{(21)}$$

Die deterministisch **bewertete Wegemenge** $P_d(x,y)$ besteht aus einer Menge von deterministisch bewerteten Wegen $p_d(x,y)$. Die Wegemenge $P_d(x,y)$ läßt sich anhand der Weglängen $w_d(x,y)$ der Wege $p_d(x,y)$ linear ordnen. Das Gebilde $(P_d(x,y); \sqsubseteq)$ mit der Relation $\sqsubseteq$ heißt daher eine linear geordnete Wegemenge. Jede nicht leere bewertete Wegemenge $P_d(x,y)$ enthält mindestens einen Weg mit minimaler Weglänge $w_{d,\min}(x,y)$ (22).

$$\begin{aligned} P_d(x,y) &= \{\ p_{d,1}(x,y),\ \ldots,\ p_{d,n}(x,y)\ \} \neq \emptyset \\ w_{d,\min}(x,y) &:= Min\ \{\ w_{d,1}(x,y),\ \ldots,\ w_{d,n}(x,y)\ \} \end{aligned} \qquad \textbf{(22)}$$

Wegemengen alternativer Wege können über Definitionen auf der Basis einer Wegemenge mit deterministisch bewerteten Wegen bestimmt werden. In den folgenden **Kapiteln** werden die minimale Wegemenge, die einfach beschränkte Wegemenge und die elementar beschränkte Wegemenge definiert und bezüglich der Eigenschaften und der Anwendbarkeit für die in dieser Arbeit gestellten Aufgaben beurteilt.

4.1.1 Die minimale Wegemenge

Als Teilmenge der vollständigen Wegemenge $P^*(x,y)$ enthält die **minimale Wegemenge** $P_{d,\min}(x,y)$ alle Wege, deren Weglängen $w_d(x,y)$ gleich der minimalen Weglänge $w_{d,\min}(x,y)$ sind (23).

$$P_{d,\min}(x,y) := \{\ p_d(x,y) \in P^*(x,y)\ |\ w_d(x,y) = w_{d,\min}(x,y)\ \} \qquad \textbf{(23)}$$

Die **Eigenschaften** der minimalen Wegemenge sind:

– Alle Wege p(x,y) mit minimaler Weglänge sind enthalten.

– Alle Wege p(x,y) über z mit Zyklen durch z sind nicht enthalten. Würde ein Weg einen Zyklus beinhalten, so wäre seine Weglänge nicht minimal.

Eine **Beurteilung** ergibt, dass bedingt durch die Aufgabe, eine Beschreibung einer Menge alternativer Wege zu formulieren, die minimale Wegemenge keine brauchbare Lösung liefert. Sie beinhaltet zumeist nur einen Weg mit minimaler Weglänge. Enthält die minimale Wegemenge alternative Wege, so unterscheiden sich deren Weglängen nicht von der minimalen Weglänge. Sowohl Wege mit "kleinen" Umwegen als auch Wege mit "großen" Umwegen sind in der minimalen Wegemenge nicht enthalten.

4.1.2 Die einfach beschränkte Wegemenge

In der **einfach beschränkten Wegemenge** $P_{d,E}(x,y) \subseteq P^*(x,y)$ wird die Anzahl der Wege der vollständigen Wegemenge durch Einführen einer einfachen Beschränkung reduziert. Zur Bestimmung der einfach beschränkten Wegemenge werden die Weglängen $w_d(x,y)$ der Wege $p_d(x,y)$ mit der Weglänge des minimalen Weges $w_{d,\min}(x,y)$ verglichen. Ein Vergleich der Wegelängen mit Hilfe

– absoluter Abweichungen oder
– relativer Abweichungen

ist zu untersuchen.

Die erste Möglichkeit, Wege zu vergleichen, ist der Ansatz über die absoluten Werte der Weglängen. Die **einfache absolut beschränkte Wegemenge** $P_{d,E,abs}(x,y)$ enthält alle Wege, deren Weglängen $w_d(x,y)$ kleiner oder gleich der Summe aus dem Wert der minimalen Weglänge $w_{d,\min}(x,y)$ und einem vorgegebenen Inkrement $\Delta(x,y) \geq 0$ sind (24).

$$P_{d,E,abs}(x,y) := \left\{ p_d(x,y) \in P^*(x,y) \mid w_d(x,y) \le w_{d,\min}(x,y) + \Delta(x,y) \right\} \quad \textbf{(24)}$$

Ein Vergleich von relativen Abweichungen bildet eine zweite Möglichkeit, Weglängen von Wegen zu vergleichen. Überschreitet die Weglänge $w_d(x,y)$ das Produkt aus dem Wert der minimalen Weglänge $w_{d,\min}(x,y)$ und einem vorgegebenen Faktor $\alpha \ge 1$, so wird der Weg aus der Wegemenge entfernt. Diese Wegemenge wird als **einfach relativ beschränkte Wegemenge** $P_{d,E,rel}(x,y)$ bezeichnet (25).

$$P_{d,E,rel}(x,y) = \left\{ p_d(x,y) \in P^*(x,y) \mid w_d(x,y) \le w_{d,\min}(x,y) \cdot \alpha \right\} \quad \textbf{(25)}$$

Die **Eigenschaften** der einfach beschränkten Wegemengen sind:

– Alle Wege p(x,y) mit minimaler Weglänge sind enthalten.

– Wege p(x,y) über z mit Zyklen durch z sind eingeschränkt enthalten. Ist die Weglänge des Zyklus durch z kleiner als $\Delta(x,y)$ bzw. der Quotient aus der Weglänge des Zyklus durch z und der minimalen Weglänge des gesamten Weges kleiner als $(\alpha-1)$, so ist der Weg p(x,y) in der Wegemenge enthalten.

Ist das Inkrement $\Delta(x,y)$ größer oder gleich dem Produkt aus der minimalen Weglänge $w_{d,\min}(x,y)$ und dem Faktor α, so ist die einfach relativ beschränkte Wegemenge eine Teilmenge der einfach absolut beschränkten Wegemenge (26).

$$\Delta(x,y) \ge w_{d,\min}(x,y) \cdot \alpha \;\Rightarrow\; P_{d,E,rel}(x,y) \subseteq P_{d,E,abs}(x,y) \quad \textbf{(26)}$$

Eine **Beurteilung** der einfach beschränkten Wegemengen kann anhand unterschiedlicher Aspekte erfolgen. Die Definition der absoluten Beschränkung über das Inkrement $\Delta(x,y)$ ist aufgrund seiner Abhängigkeit von den Knoten x und y nicht besonders geeignet. Hier ist die Definition einer relativen Beschränkung mit einem von den Knoten x und y unabhängigen Faktor α zweckmäßiger. In den einfach beschränkten Wegemengen sind alle Wege mit "kleinen" Umwegen enthalten, welches für die aktuelle Problemstellung als Nachteil zu werten ist. Auch alternative Wege, deren Verlauf sich durch mehrere "kleine" Umwege vom Verlauf des minimalen Weges unterscheiden, sind Wege der einfach beschränkten Wegemengen. Alle Wege mit "großen" Umwegen sind in den einfach beschränkten Wegemengen nicht enthalten. In bezug auf die in der Literatur häufig erwähnte Wegemenge der k kürzesten Wege bieten die einfach

beschränkten Wegemengen klare Vorteile, da sie nicht auf die Definition einer festen Anzahl zu bestimmender Wege angewiesen sind. Die Anzahl der alternativen Wege zwischen zwei Knoten richtet sich allein nach der Struktur des Graphen.

4.1.3 Die elementar beschränkte Wegemenge

Die einfach beschränkten Wegemengen verwenden als Vergleichswerte die Weglängen der gesamten Wege. Die **elementar beschränkte Wegemenge** $P_{d,EL}(x,y) \subseteq P^*(x,y)$ wird dadurch definiert, dass das einschränkende Kriterium für alle Teilwege $p_d(a,b)$ mit den Weglängen $w_d(a,b)$ auf dem Weg $p_d(x,y)$ seine Gültigkeit behält (27).

$$P_{d,EL,rel}(x,y) := \left\{ p_d(x,y) \in P^*(x,y) \mid \bigwedge_{Teilwege} \left(w_d(a,b) \le w_{d,\min}(a,b) \cdot \alpha \right) \right\} \quad \textbf{(27)}$$

Die **Eigenschaften** der elementar beschränkten Wegemenge sind:

– Alle Wege p(x,y) mit minimaler Weglänge sind enthalten.

– Alle Wege p(x,y) über z mit Zyklen durch z sind nicht enthalten. Ist ein Teilweg p(z,z) ein Zyklus, so besitzt der Teilweg eine Weglänge $w_d(z,z)$ größer Null. Die minimale Weglänge $w_{d,\min}(z,z)$ ist gleich Null. Die Bedingung $w_d(a,b) \le w_{d,\min}(a,b) \cdot \alpha$ mit $\alpha \ge 1$ wird nie erfüllt.

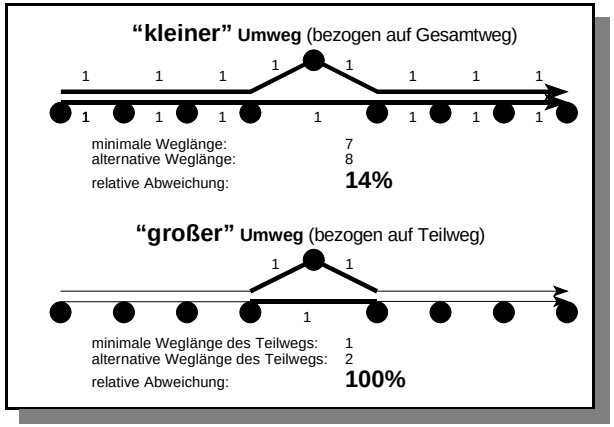

Abbildung 22: "Kleiner" Umweg und "großer" Umweg

Die **Beurteilung** der elementar beschränkten Wegemenge ergibt, dass eine Verwendung der elementar beschränkten Wegemenge gegenüber den einfach beschränkten Wegemengen zweckmäßiger erscheint, da in der elementar beschränkten Wegemenge zum einen Wege mit Zyklen nicht enthalten und zum anderen Wege mit "kleinen" Umwegen nur eingeschränkt enthalten sind. Die aus einem Umweg resultierende Abweichung der Weglänge ist nicht mehr von der minimalen Weglänge des gesamten Weges sondern von der minimalen Weglänge der zugehörigen Teilweges abhängig. "Kleine" Umwege auf einem alternativen Weg bezogen auf die minimale Weglänge des gesamten Weges werden zu "großen" Umwegen in bezug auf die minimale Weglänge des zugehörigen Teilweges (Abbildung 22). Alle Wege mit "großen" Umwegen sind in der elementar beschränkten Wegemenge nicht enthalten.

4.2 Fuzzy-bewertete Wegemengen

Grundgedanke der Fuzzy-Theorie ist es, mit "unscharfen" Werten, die im Bereich des nicht bekannten Optimums liegen, und einfachen Algorithmen "unscharfe" Lösungen zu erhalten, die im Bereich der optimalen Lösung liegen. Fuzzy-bewertete Wege können mit Hilfe von Fuzzy-Zahlen und einer Fuzzy-Arithmetik beschrieben werden [Böhme, 1993]. In bezug auf **alternative Wege** ist die Vorgehensweise aus folgendem Grund interessant. Bei der Verwendung klassischer "scharfer" Bewertungen von Wegen berechnen Minimale-Wege-Algorithmen genau einen Weg bzw. mehrere Wege mit minimaler Bewertung. Es stellt sich die Frage, ob mit denselben Minimale-Wege-Algorithmen durch eine "unscharfe" Bewertung eine Menge "ungefähr minimaler Wege" als alternative Wege bestimmt werden können.

Die wesentlichen Aspekte der Fuzzy-Arithmetik für Wegaufgaben werden im folgenden **Kapitel** zusammengestellt. Im anschließenden Kapitel werden Fuzzy-bewertete Wege und Fuzzy-bewertete Wegemengen erläutert. Den Abschluss bildet die Definition der minimalen Fuzzy-bewerteten Wegemenge sowie eine Untersuchung deren Brauchbarkeit.

4.2.1 Fuzzy-Arithmetik

Für die folgenden Betrachtungen wird eine **Fuzzy-Zahl** wie folgt definiert. Jede Fuzzy-Zahl a wird mit einer Funktion $\mu_a(s) \in [0.0, 1.0]$ vom Typ LR beschrieben. Die Referenzfunktion $L_a(s)$ gilt für den Bereich $s \leq a$. Die Referenzfunktion $R_a(s)$ gilt für den Bereich $s \geq a$ (28).

$$\begin{gathered}
\mu_a(s) := \begin{cases} L_a(s) & \text{für } s \leq a \\ R_a(s) & \text{für } s \geq a \end{cases} \\
0 \leq L_a(s) \leq 1 \\
0 \leq R_a(s) \leq 1 \\
L_a(a) = R_a(a) = 1 \\
L_a(s) \text{ ist monoton steigend} \quad R_a(s) \text{ ist monoton fallend}
\end{gathered} \tag{28}$$

Ist die Funktion $\mu_a(s)$ für alle $s < 0$ Null, dann ist die Fuzzy-Zahl a positiv. Die Fuzzy-Zahl ist negativ, wenn die Funktion $\mu_a(s)$ für alle $s > 0$ Null ist. Die Menge der Fuzzy-Zahlen vom Typ LR wird mit $\mathcal{F}_{LR}$ bezeichnet. Die Menge aller positiven Fuzzy-Zahlen heißt $\mathcal{F}_{LR}^{+}$.

In der einfachsten **Form** entspricht die Fuzzy-Zahl a vom Typ LR einer Dreiecksfunktion. Über die Parameter γ und β wird der Verlauf der Funktion definiert. Sind die Parameter γ und β gleich Null, so ist die Fuzzy-Zahl a exakt und entspricht der reellen Zahl a. Die Menge der Fuzzy-Zahlen mit einem dreiecksförmigen Funktionsverlauf ist eine Teilmenge von $\mathcal{F}_{LR}$ und wird mit $\mathcal{F}_{\Delta}$ bezeichnet. Die Fuzzy-Menge aller dreiecksförmigen positiven Fuzzy-Zahlen ist eine Teilmenge von $\mathcal{F}_{LR}^{+}$ und heißt $\mathcal{F}_{\Delta}^{+}$. Abbildung 23 zeigt den Verlauf der beschriebenen Dreiecksfunktion $\mu_a(s)$.

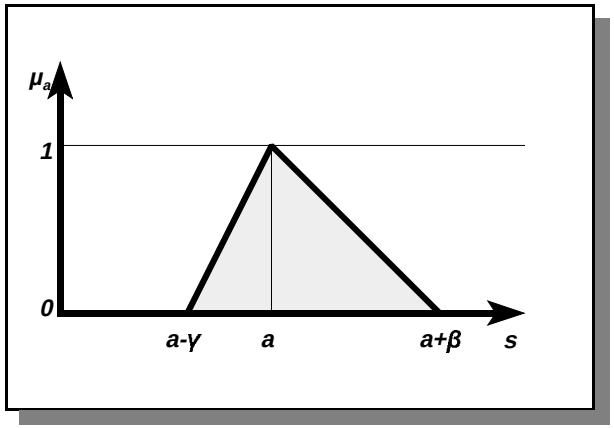

Abbildung 23: Funktion μ der Fuzzy-Zahl a

Als **arithmetische Operationen** innerhalb von Wegaufgaben sind wie bei den reellen

Zahlen Definitionen für die Addition und die Minimumfunktion erforderlich. In den nächsten Abschnitten werden die arithmetischen Operationen für die Fuzzy-Zahlen definiert.

Die **Addition** c = a + b zweier Fuzzy-Zahlen a und b vom Typ LR liefert als Ergebnis eine Fuzzy-Zahl c vom Typ LR und erfolgt nach dem folgenden Schema. Die Referenzfunktionen $L_c(s)$ und $R_c(s)$ der Fuzzy-Zahl c werden punktweise aus den Referenzfunktionen $L_a(s)$ und $R_a(s)$ der Fuzzy-Zahl a und $L_b(s)$ und $R_b(s)$ der Fuzzy-Zahl b gebildet. Für jedes Niveau α mit $0 \leq \alpha \leq 1$ werden die Werte der Referenzfunktionen betrachtet. Der Wert s_c mit $L_c(s_c) = \alpha$ berechnet sich aus der Addition der Werte s_a mit $L_a(s_a) = \alpha$ und s_b mit $L_b(s_b) = \alpha$ (29). Analog werden die Werte der Referenzfunktion $R_c(s)$ bestimmt.

$$\begin{aligned} L_a(s_a) = \alpha \wedge L_b(s_b) = \alpha &:\Rightarrow L_c(s_a+s_b)=\alpha \\ R_a(s_a) = \alpha \wedge R_b(s_b) = \alpha &:\Rightarrow R_c(s_a+s_b)=\alpha \end{aligned} \qquad \textbf{(29)}$$

Abbildung 24 zeigt das Ergebnis der Addition zweier Fuzzy-Zahlen, die durch eine Dreiecksfunktion beschrieben werden.

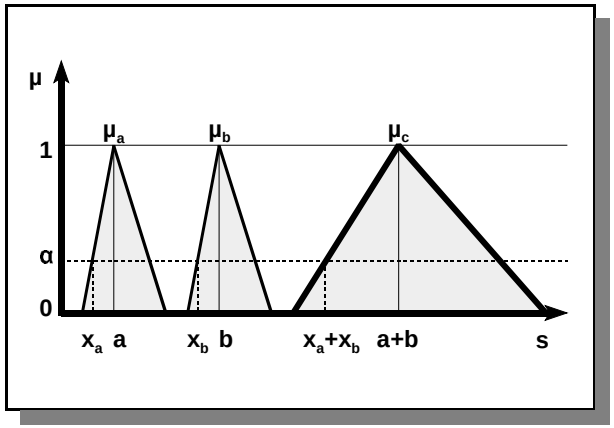

Abbildung 24: Addition von Fuzzy-Zahlen

Das **Minimum** c = Min {a,b} zweier Fuzzy-Zahlen a und b vom Typ LR liefert als Ergebnis eine Fuzzy-Zahl c vom Typ LR. Die Referenzfunktionen $L_c(s)$ und $R_c(s)$ der Fuzzy-Zahl c werden punktweise aus den Referenzfunktionen $L_a(s)$ und $R_a(s)$ der Fuzzy-Zahl a und $L_b(s)$ und $R_b(s)$ der Fuzzy-Zahl b gebildet. Für jedes Niveau α mit $0 \leq \alpha \leq 1$ werden die Werte der Referenzfunktionen betrachtet. Der Wert s_c mit $L_c(s_c) = \alpha$

berechnet sich aus dem Minimum der Werte s_a mit $L_a(s_a) = \alpha$ und s_b mit $L_b(s_b) = \alpha$. Analog werden die Werte der Referenzfunktion $R_c(s)$ bestimmt (30).

$$\begin{aligned} L_a(s_a) = \alpha \wedge L_b(s_b) = \alpha &:\Rightarrow L_c(Min\{s_a, s_b\})=\alpha \\ R_a(s_a) = \alpha \wedge R_b(s_b) = \alpha &:\Rightarrow R_c(Min\{s_a, s_b\})=\alpha \end{aligned} \qquad \textbf{(30)}$$

Abbildung 25 zeigt das Ergebnis der Minimumfunktion zweier Fuzzy-Zahlen, die durch eine Dreiecksfunktion beschrieben werden. Der Funktionsverlauf der Fuzzy-Zahl c ist im vorliegenden Fall nicht mehr dreiecksförmig. Die Referenzfunktion $L_c(s)$ entspricht der Referenzfunktion $L_a(s)$. Die Referenzfunktion $R_c(s)$ setzt sich aus Teilen der Referenzfunktionen $R_a(s)$ und $R_b(s)$ zusammen.

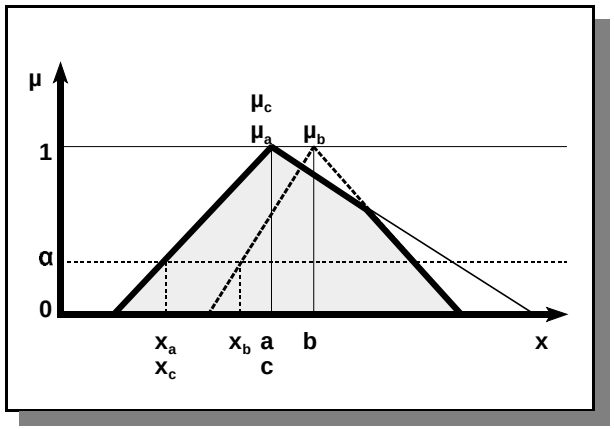

Abbildung 25: Minimumoperation zweier Fuzzy-Zahlen

Die **relationale Verknüpfung** a < b ("a kleiner b") mit den Fuzzy-Zahlen $a,b \in \mathscr{F}_{LR}$ ist genau dann wahr, wenn für jedes Niveau α die Koordinate s_a mit $L_a(s_a) = \alpha$ kleiner als die Koordinate s_b mit $L_b(s_b) = \alpha$ ist und die Koordinate s_a mit $R_a(s_a) = \alpha$ kleiner als die Koordinate s_b mit $R_b(s_b) = \alpha$ ist. Analog werden die Verknüpfungen a > b ("a größer b"), $a \leq b$ ("a kleiner gleich b") und $a \geq b$ ("a größer gleich b") definiert.

Für eine Menge von Fuzzy-Zahlen werden **Ordnungsrelationen** definiert (32).

$$a < b :\Leftrightarrow \bigwedge_{\alpha} (s_a < s_b \mid L_a(s_a) = L_b(s_b) = \alpha) \wedge \bigwedge_{\alpha} (s_a < s_b \mid R_a(s_a) = R_b(s_b) = \alpha) \quad \textbf{(32)}$$

$$a \leq b :\Leftrightarrow \bigwedge_{\alpha} (s_a \leq s_b \mid L_a(s_a) = L_b(s_b) = \alpha) \wedge \bigwedge_{\alpha} (s_a \leq s_b \mid R_a(s_a) = R_b(s_b) = \alpha)$$

$$a > b :\Leftrightarrow \bigwedge_{\alpha} (s_a > s_b \mid L_a(s_a) = L_b(s_b) = \alpha) \wedge \bigwedge_{\alpha} (s_a > s_b \mid R_a(s_a) = R_b(s_b) = \alpha) \quad \textbf{(32)}$$

$$a \geq b :\Leftrightarrow \bigwedge_{\alpha} (s_a \geq s_b \mid L_a(s_a) = L_b(s_b) = \alpha) \wedge \bigwedge_{\alpha} (s_a \geq s_b \mid R_a(s_a) = R_b(s_b) = \alpha)$$

Mit Hilfe der Minimumoperation lassen sich die Ordnungsrelationen $\geq$ und $\leq$ formulieren (33).

$$a \leq b \Leftrightarrow a = Min\ \{a,\ b\} \qquad a \geq b \Leftrightarrow b = Min\ \{a,\ b\} \quad \textbf{(33)}$$

Die Ordnungsrelationen <, >, $\leq$ und $\geq$ sind in der Menge $\mathscr{F}_{LR}$ der Fuzzy-Zahlen nicht total. Das Beispiel in Abbildung 25 zeigt, dass weder a = Min {a,b} noch b = Min {a,b} gilt.

4.2.2 Fuzzy-bewertete Wege

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf einen **einfach Fuzzy-bewerteten Pfeilgraphen**. Der einfach Fuzzy-bewertete Pfeilgraph ist das Gebilde (V, K; a, e; u_F). Jeder Kante k der Kantenmenge K des Pfeilgraphen wird eindeutig als Kantenlänge eine positive dreiecksförmige Fuzzy-Zahl über die Bewertungsfunktion $u_F \in \mathscr{F}_{\Delta}^{+}$ zugeordnet (34).

$$G := (V,K;a,e;u_F) \qquad u_F\colon K \rightarrow \mathscr{F}_{\Delta}^{+} \quad \textbf{(34)}$$

Einem **Fuzzy-bewerteten Weg** $p_F(x,y)$ vom Anfangsknoten $x \in V$ zum Endknoten $y \in V$ als eine Folge von Kanten kann eindeutig eine positive Fuzzy-Zahl als Weglänge $w_F(x,y) \in \mathscr{F}^{+}$ zugeordnet werden. Die Weglänge $w_F(x,y)$ wird als Addition der Kantenlängen u_F der Kanten des Weges $p_F(x,y)$ definiert (35). Nach den Regeln der Addition von Fuzzy-Zahlen der Menge $\mathscr{F}_{\Delta}^{+}$ ist auch die Summe eine Fuzzy-Zahl in der Menge $\mathscr{F}_{\Delta}^{+}$. Der leere Weg $p_F(x,x) = \lambda$ ohne Kanten besitzt die Weglänge Null ($\mu_0(0) = 1$, $\mu_0(s) = 0$ für alle $s \neq 0$).

$$p_F(x,y) = \langle k_1, \ldots, k_n \rangle \qquad w_F(x,y) := \sum_{i}^{n} u_{Fk_i} \in \mathscr{F}_{\Delta}^{+} \quad \textbf{(35)}$$

Die **relationale Verknüpfung** von Fuzzy-Zahlen für die Weglängen kann auf die Wege übertragen werden. Ein Weg $p_{F,k}(x,y)$ heißt "kürzer" ("länger") als ein Weg $p_{F,l}(x,y)$, wenn die Weglänge $w_{F,k}(x,y)$ kleiner (größer) als die Weglänge $w_{F,l}(x,y)$ ist. Mit Hilfe der Symbole $\sqsubset$ ("kürzer") und $\sqsupset$ ("länger") werden die relationalen Verknüpfungen formuliert (36).

$$p_{F,k}(x,y) \sqsubset p_{F,l}(x,y) :\Leftrightarrow w_{F,k}(x,y) < w_{F,l}(x,y) \qquad p_{F,k}(x,y) \sqsupset p_{F,l}(x,y) :\Leftrightarrow w_{F,k}(x,y) > w_{F,l}(x,y) \quad \textbf{(36)}$$

Die **Fuzzy-bewertete Wegemenge** $P_F(x,y)$ besteht aus einer Menge von Wegen $p_F(x,y)$ und läßt sich anhand der Weglängen $w_F(x,y)$ der Wege $p_F(x,y)$ ordnen. Die Wegemenge $P_F(x,y)$ läßt sich im Gegensatz zur deterministisch bewerteten Wegemenge $P_d(x,y)$ nicht linear ordnen. Das Gebilde ($P_F(x,y)$; $\sqsubset$) mit der Relation $\sqsubset$ heißt daher eine geordnete Wegemenge. Jeder nicht leeren Wegemenge $P_F(x,y)$ wird die minimale Weglänge $w_{F,min}(x,y)$ als das Minimum der Weglängen der in der Wegemenge enthaltenen Wege zugeordnet (37).

$$P_F(x,y) = \{ p_{F,1}(x,y), \ldots, p_{F,n}(x,y) \}$$
$$w_{F,\min}(x,y) := Min \{ w_{F,1}(x,y), \ldots, w_{F,n}(x,y) \} \quad \textbf{(37)}$$

Die **minimale Weglänge** $w_{F,min}(x,y)$ der Wege einer Wegemenge $P_F(x,y)$ ist eine Fuzzy-Zahl und wird mit der Minimumoperation berechnet. Eine Referenzfunktion L(s) der Weglänge eines Weges liefert einen Abschnitt zu der Referenzfunktion der minimalen Weglänge $L_{min}(s)$, wenn für ein α-Niveau der Wert s der Referenzfunktion L(s) = α kleiner oder gleich dem Wert s_{min} der Referenzfunktion $L_{min}(s_{min}) = \alpha$ ist. Jede Referenzfunktion R(s) liefert einen Abschnitt zu der Referenzfunktion der minimalen Weglänge $R_{min}(s)$, wenn für ein α-Niveau der Wert s der Referenzfunktion R(s) = α kleiner oder gleich dem Wert s_{min} der Referenzfunktion $R_{min}(s_{min}) = \alpha$ ist. Das Ergebnis der Minimumoperation ist im allgemeinen Fall eine Fuzzy-Zahl der Menge $\mathcal{F}_{LR}^{+}$. Somit ist auch die Weglänge $w_{F,min}(x,y)$ eine Fuzzy-Zahl der Menge $\mathcal{F}_{LR}^{+}$. In Abbildung 25 ist dies zu erkennen. Der Funktionsverlauf der Fuzzy-Zahl c = Min {a,b} ist in diesem Beispiel nicht mehr dreiecksförmig. Die Referenzfunktion $L_c(s)$ entspricht der Referenzfunktion $L_a(s)$. Die Referenzfunktion $L_c = L_{min}$ beschreibt die "bestmöglichen" Wege mit minimaler Länge. Die Referenzfunktion $R_c(s)$ setzt sich abschnittsweise aus Teilen der Referenzfunktionen $R_a(s)$ und $R_b(s)$ zusammen. Die Referenzfunktion $R_c = R_{min}$ beschreibt die "schlechtestmöglichen" Wege mit minimaler Länge.

Eine Fuzzy-bewertete Wegemenge mit alternativen Wegen ist die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge. Im folgenden **Kapitel** wird diese Wegemenge behandelt und bezüglich der Eigenschaften und der Anwendbarkeit für die in dieser Arbeit gestellten Aufgaben beurteilt.

4.2.3 Die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge

Als Teilmenge der vollständigen Wegemenge P*(x,y) enthält die **minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge** $P_{F,min}(x,y)$ alle Wege, deren Weglängen $w_F(x,y)$ nicht größer als die minimale Weglänge $w_{F,min}(x,y)$ sind (38).

$$P_{F,\min}(x,y) := \{ p_F(x,y) \in P^*(x,y) \mid \neg (w_F(x,y) > w_{F,\min}(x,y)) \} \quad \textbf{(38)}$$

Die **Eigenschaften** der minimalen Fuzzy-bewerteten Wegemenge sind:

– Alle Wege p(x,y) mit minimaler Weglänge sind enthalten.

– Alle Wege p(x,y) über z mit Zyklen durch z sind nicht enthalten. Würde ein Weg einen Zyklus beinhalten, so wäre seine Weglänge nicht minimal, da ein zyklenfreier Weg mit geringerer Weglänge existieren müßte.

Eine **Beurteilung** ergibt, dass bedingt durch die Aufgabe, eine Beschreibung einer Menge alternativer Wege zu formulieren, die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge eine brauchbare Lösung für das gestellte Problem ist. Sie enthält mehr als einen Weg und beinhaltet alternative Wege, deren Weglängen von der Weglänge des minimalen Weges abweichen. Alternative Wege mit "kleinen" Umwegen sind in Abhängigkeit der Weglänge enthalten. Die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge liefert die "bestmöglichen" und die "schlechtestmöglichen" Wege mit minimaler Weglänge im Sinne der Fuzzy-Arithmetik. Wege, deren "bestmögliche" Weglänge und "schlechtestmögliche" Weglänge nur geringfügig größer als die minimale Weglänge sind, d.h. sie unterscheiden sich durch einen "kleinen" Umweg, sind in der Wegemenge nicht enthalten. Die Anzahl der alternativen Wege zu einem Knoten in der minimalen Fuzzy-bewerteten Wegemenge wird nur durch die Weglängen bzw. die Struktur des Graphen bestimmt. Alle Wege mit "großen" Umwegen sind nicht enthalten.

4.3 Beispiele

Zur Veranschaulichung der Definitionen der Wegemengen werden in diesem Kapitel anhand eines kleinen **Beispielnetzes** die Eigenschaften der unterschiedlichen Wegemengen gezeigt. In Abbildung 26 ist ein kleines Netz mit den typischen topologischen Merkmalen wie

– Zyklen,
– parallele Wege,
– "kleine" Umwege,
– Umwege und
– "große" Umwege

dargestellt. Die Balken an den Kanten repräsentieren die Kantenlängen u_d, aus denen sich die Weglängen w_d berechnen. Die Kantenlängen orientieren sich an den Luftlinienentfernungen zwischen den Knoten.

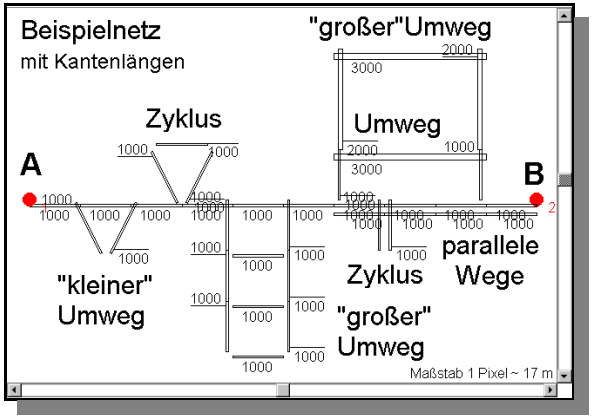

Abbildung 26: Wegebeispiel: Wegenetz mit Kantenlängen

Für die Berechnung der minimalen Fuzzy-bewerteten Wegemenge wird für jede Kante ein **Kantenlängenbereich** b definiert. Die Referenzfunktion L(s) der Fuzzy-Zahl μ_s, mit der eine Kantenlänge u_F beschrieben wird, gilt für den Bereich $u_d - b/2 \leq s \leq u_d$. Die Referenzfunktion R(s) der Fuzzy-Zahl μ_s, mit der eine Kantenlänge u_F beschrieben wird, gilt für den Bereich $u_d \leq s \leq u_d + b/2$. Der Definitionsbereich der Fuzzy-Zahl einer Kantelänge u_F ist $u_d \pm b/2$. In der Abbildung 26 werden die Kantenlängenbereiche der Kanten im Beispielnetz dargestellt. Während für den direkten Weg hohe Kantenlängenbereichen (Erhöhung um 150%) definiert werden, so erhalten die Umwege geringere Kantenlängenbereiche (Erhöhung um 10%).

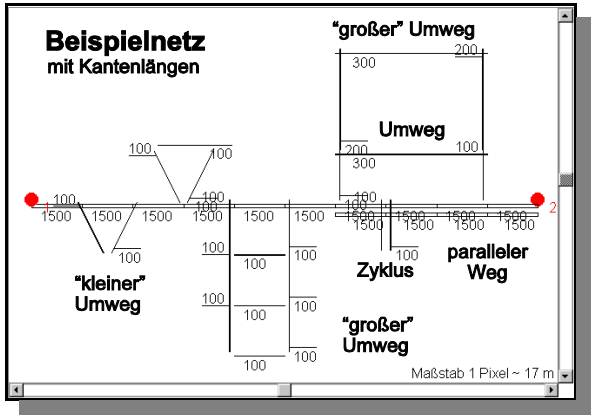

Abbildung 26: Wegebeispiel: Wegenetz mit Kantenlängen-bereichen

In den folgenden **Beispielen** werden die minimalen, einfach beschränkten und elementar beschränkten Wege vom Knoten A zum Knoten B bestimmt. Für die Darstellung der berechneten Wege wird eine Einsnachfrage proportional zur Weglänge auf die alternativen Wege verteilt.

In der **minimalen Wegemenge** sind alle Wege enthalten, deren Weglänge identisch mit der minimalen Wegelänge sind. Die Lösungsmenge enthält in diesem Beispiel mehr als einen Weg. Alle alternativen Wege, deren Weglänge größer als die minimale Weglänge sind, sind in der Wegemenge nicht enthalten (Abbildung 27).

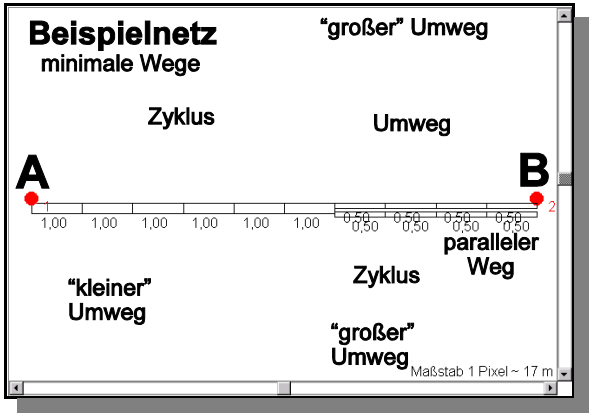

Abbildung 27: Wegebeispiel: minimale Wege

In der **einfach beschränkten Wegemenge** sind neben den minimalen Wegen auch Wege mit “kleinen” Umwegen und Wege mit Zyklen enthalten (Abbildung 28 und 29). Die alternativen Wege werden in Abhängigkeit des gewählten Faktors α bestimmt.

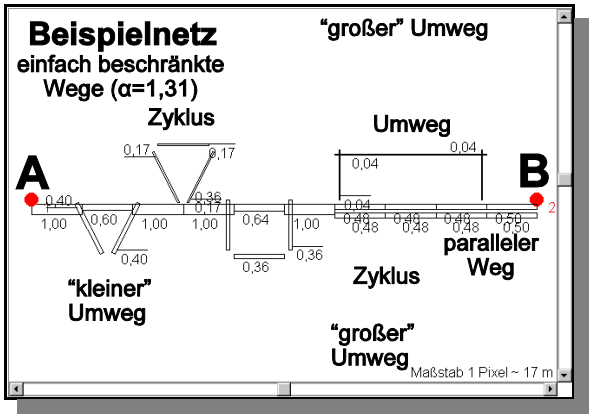

Abbildung 28: Wegebeispiel: einfach beschränkte Wege, α=1,31

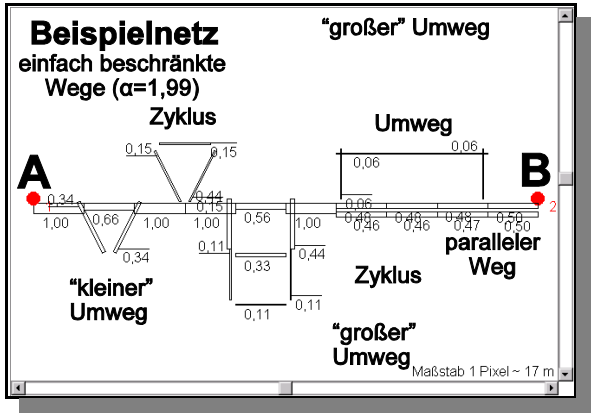

Abbildung 29: Wegebeispiel: einfach beschränkte Wege, α=1,99

In den Abbildungen 30 und 31 ist zu erkennen, dass die **elementar beschränkte Wegemenge** für jedes α eine Teilmenge der einfach beschränkten Wegemenge ist. Die Wege mit Zyklen sind nicht mehr in der Wegemenge enthalten. Auch “kleine” Umwege werden aus der elementar beschränkten Wegemenge entfernt.

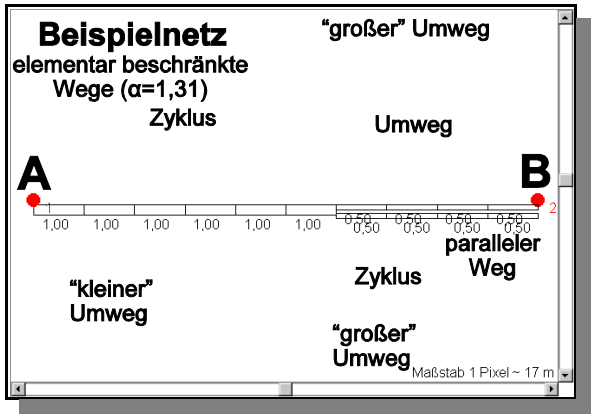

Abbildung 30: Wegebeispiel: elementar. beschränkte Wege, α=1,31

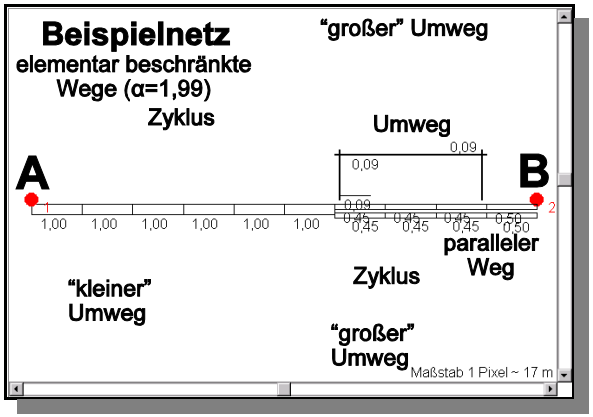

Abbildung 31: Wegebeispiel: elementar. beschränkte Wege, α=1,99

Die **minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge** enthält neben den minimalen Wegen auch alternative Wege, welche den bestmöglichsten minimalen Wegen und den schlechtestmöglichen minimalen Wegen entsprechen (Abbildung 32).

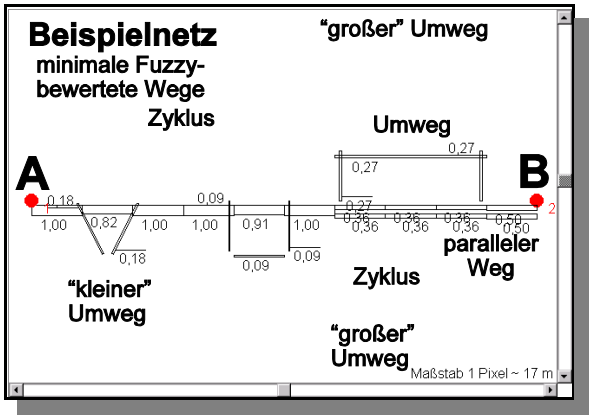

Abbildung 32: Wegebeispiel: min. Fuzzy-bewertete Wege

4.4 Bewertung aus Sicht der Verkehrsplanung

Die **Anforderungen aus der Verkehrsplanung** an alternative Wege lassen sich durch die Aussagen

- keine Vorgabe einer festen Anzahl,
- keine Zyklen,
- begrenzte Anzahl von Umwegen und
- keine "großen" Umwege

umschreiben.

Aufgrund der unterschiedlichen Dichte von Verkehrsnetzen innerhalb eines Untersuchungsraumes ist die Angabe einer **festen Anzahl** alternativer Wege zu einem Knoten nicht sinnvoll. Die einfach beschränkte Wegemenge, die elementar beschränkte Wegemenge und die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge berechnen alternative Wege ohne die Vorgabe einer festen Anzahl.

Eine klare Forderung für die Wege in einem Verkehrsnetz sind Wege **ohne Zyklen**. Sowohl die elementar beschränkte Wegemenge als auch die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge enthalten nur Wege ohne Zyklen.

Alternative Wege, deren Umwege sich aus einer Vielzahl minimaler Umwege zusammensetzen, entsprechen nur dann dem Verhalten von Verkehrsteilnehmern, wenn jeder einzelne Umweg um eine bestimmte Länge von der Länge des minimalen Weges abweicht. Die elementar beschränkte Wegemenge und die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge enthalten nur Wege mit einer **begrenzten Anzahl von Umwegen**, die in Abhängigkeit vom minimalen Weg bestimmt werden.

Die alternativen Wege, die in einem Verkehrsnetz abweichend vom minimalen Weg gewählt werden, liegen in einem spezifischen Bereich, der sich an der Weglänge des minimalen Weges orientiert. Alternative Wege, die durch **"große" Umwege** gekennzeichnet sind, sind aus der Lösungsmenge der alternativen Wege zu eleminieren. Durch die Definition eines maximalen Grenzwertes erfüllen diese Anforderung sowohl die einfach beschränkte Wegemenge als auch die elementar beschränkte Wegemenge und die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, das die elementar beschränkte Wegemenge und die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge die Anforderungen der Verkehrsplanung für alternative Wege erfüllen. Die Weglängen der alternativen Wege und somit auch deren Anzahl sind unabhängig von einer festen Vorgabe. In den Wegemengen sind nur zyklenfreie Wege enthalten. Der Wertebereich der Weglängen

aller alternativen Wege liegt in einem fest definierten Bereich, dessen unterer Grenzwert die Weglänge des jeweils minimalen Weges ist. Alternative Wege mit “kleinen” Umwegen sind nur in einem begrenzten Maße enthalten

Bei einem Vergleich der elementar beschränkten Wegemenge und der Fuzzy-bewerteten Wegemenge sind die unterschiedlichen Strategien zum Bestimmen von Kantenlängen und den daraus resultierenden Weglängen zu beachten. Im Gegensatz zu der bisher verwendeten klassischen Bewertung von Kanten und Wegen mit Hilfe deterministisch “scharfer” Mittelwerte können den **Fuzzy-bewerteten Elementen** “unscharfe” Bewertungsbereiche zugeordnet werden, welche zu Bestimmen unter Umständen nicht unproblematisch ist. Mit dem Definieren von verkehrsmittelspezifischen bzw. streckenspezifischen Streubreiten der Kantenlängen bei Fuzzy-bewerteten Kanten öffnen sich jedoch Möglichkeiten, mit geringem Rechenaufwand alternative Wege zu bestimmen bzw. für bestimmte Probleme, z. B. Park&Ride-Verkehr, interpretierbare Lösungen zu erhalten. Das Verwenden von Fuzzy-bewerteten Verkehrselementen birgt ein Potential, welches in weiteren detaillierteren Untersuchungen auf seine Brauchbarkeit zu prüfen ist.

5. Wege- und Mehrwegealgorithmen

Für die integrierte Berechnung der Verkehrsaufteilung ist die Suche alternativer Wege Voraussetzung. Hierzu existieren verschiedene Wegealgorithmen, die in diesem Kapitel klassifiziert werden. Aufgrund der entstandenen Übersicht werden Mehrwegealgorithmen spezifiziert, mit denen die elementar beschränkte Wegemenge und die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge bestimmt werden können. Für die entwickelten Mehrwegealgorithmen erfolgt eine Komplexitätsuntersuchung und die Definition des Gültigkeitsbereiches.

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf einen **bewerteten Pfeilgraphen**. Der bewertete Pfeilgraph ist das Gebilde (V, K; a, e; u). Jeder Kante k der Kantenmenge K des Pfeilgraphen wird als Kantenlänge eindeutig eine positive Bewertung über die Bewertungsfunktion u zugeordnet (39). Die Anzahl der Knoten v in der Knotenmenge V wird mit dem Buchstaben N bezeichnet. Die Anzahl der Kanten k in der Kantenmenge K wird mit dem Buchstaben M bezeichnet.

$$G := (V,K;a,e;u) \tag{39}$$

Innerhalb der Graphen werden lichte und dichte Graphen unterschieden. Ein Graph heißt **dichter Graph**, wenn jeder Knoten im Graphen mit vielen anderen Knoten des Graphen über Kanten verknüpft ist. Ein Graph heiß **lichter Graph**, wenn jeder Knoten im Graphen nur mit einigen anderen Knoten im Graphen über Kanten verknüpft ist. Graphen, deren Anzahl von Kanten weniger als N log N ist (N ist die Anzahl der Knoten im Graphen), können als lichte Graphen bezeichnet werden. Verkehrsnetze sind im allgemeinen lichte Graphen. Bei den folgenden untersuchten Wegesuchalgorithmen wird ein allgemeiner Graph als Datenstruktur zugrundegelegt, sofern keine Angaben über die Dichte des Graphen gemacht werden.

Die Abbildung der Relation des Pfeilgraphen kann mit Hilfe unterschiedlicher Datenstrukturen erfolgen. Für die Relation von dichten Graphen eignet sich die Verwendung einer **Adjazenzmatrix**. Die Adjazenzmatrix besteht aus einer quadratischen Matrix, deren Dimension die Anzahl der Knoten des Graphen ist. Jedes Matrixelement entspricht einer Kante zwischen dem Knoten der Spalte und dem Knoten der Zeile. Die Existenz einer Kante wird durch das Belegen des Matrixelements mit einem wahren oder reellen Wert realisiert. Existiert zwischen zwei Knoten keine Kante, so wird das Matrixelement mit einem falschen oder unendlich hohen Wert belegt.

Eine alternative Datenstruktur für lichte Graphen ist die Organisation der Kanten in Form von **Adjazenzlisten**. Für jeden Knoten wird eine Liste der Kanten aufgebaut, die den

Knoten als Anfangsknoten besitzen. Über die Adjazenzlisten werden jedem Knoten die direkten Nachbarknoten zugeordnet.

5.1 Wegealgorithmen

Die **Übersicht** über verschiedene Wegealgorithmen in den nächsten Kapiteln dient zur Entscheidungsfindung, ob für das Bestimmen von elementar beschränkten Wegemengen bzw. von minimalen Fuzzy-bewerteten Wegemengen vorhandene Wegealgorithmen übernommen oder modifiziert werden können. Auf ein genaues Herleiten wird in dieser Arbeit verzichtet und auf die entsprechende Literatur verwiesen.

Die **Wegealgorithmen** können nach verschiedenen Kriterien klassifiziert werden. Ein Unterscheidungsmerkmal ist der Umfang der Wege, die mit einem Algorithmus berechnet werden. Es existieren

- single-pair-Algorithmen,
- single-source-Algorithmen und
- all-pairs-Algorithmen.

Bei den single-pair-, one-to-one- oder 1:1-Algorithmen werden Wege zwischen zwei Knoten eines Graphen berechnet. Das Ergebnis der single-source-, one-to-all- oder 1:N-Algorithmen sind Wege von einem Knoten zu allen anderen Knoten in einem Graphen. Die Verfahren der all-pairs-, all-to-all- oder N:N-Algorithmen bestimmen die Wege zwischen allen Knoten des Graphen.

Eine weitere Einteilung von Wegealgorithmen ist über die Anzahl der jeweils zwischen den Knoten ermittelten Wege möglich. Zu nennen sind

- shortest-path-Algorithmen (Minimale-Wege-Algorithmen) und
- k-shortest-path-Algorithmen (k-kürzeste-Wege-Algorithmen).

Die shortest-path-, Minimale-Wege- oder Kürzeste-Wege-Algorithmen ermitteln die Wege mit der minimalen Länge. Die k-shortest-path- oder k-kürzeste-Wege-Algorithmen beschränken sich nicht auf die Berechnung des minimalen Weges, sondern bestimmen die k-kürzesten Wege.

Die **Voraussetzungen** und Anforderungen an den Graphen, auf dem die Wegealgorithmen arbeiten, sind von den gewählten Algorithmen abhängig. Unter Berücksichtigung der aktuellen Problemstellung können folgende Voraussetzungen definiert werden, die eine Verwendung aller aufgeführten Wegealgorithmen erlauben.

- Der Graph ist ein kantenbewerteter Pfeilgraph.

– Der Graph ist gerichtet und zusammenhängend.
– Innerhalb des Graphen wird die Greedy-Bedingung (lokales Optimum = globales Optimum) eingehalten.

Die Greedy-Bedingung beschreibt die Bedingungen im Zuge lokaler Entscheidungen innerhalb der Wegealgorithmen. Wenn der Wegealgorithmus bei der Suche nach einem Weg an einem Knoten eine lokale Entscheidung treffen muß, so muß diese lokale Entscheidung auch nach Berechnung des vollständigen Weges noch gültig sein. Stellt sich heraus, dass die lokale Entscheidung global gesehen falsch gewesen ist, ist die Greedy-Bedingung nicht erfüllt. Aus der Einhaltung der Greedy-Bedingung folgt, dass die Bewertungen der Elemente des Graphen statisch sein müssen. Es dürfen im Verlauf der Berechnungen von Wegen keine Änderungen an den Bewertungen der Elemente im Graphen vorgenommen werden.

5.1.1 Minimale-Wege-Algorithmen

Die Übersicht über **Minimale-Wegealgorithmen** bzw. Kürzeste-Wege-Algorithmen zeigt, dass zwei unterschiedliche Arten von Wegealgorithmen existieren. Die Algorithmen unterscheiden sich in den Datenstrukturen, auf denen sie arbeiten.

Mit **Matrixalgorithmen** werden Wegealgorithmen bezeichnet, die auf einer Matrix aufbauen, in der die Relationen des Graphen definiert sind (Adjazenzmatrix). Durch Lösen von Gleichungssystemen oder Verknüpfungen von Matrizenelementen werden Wegematrizen mit den Längen von Wegen berechnet. Diese Verfahren besitzen gerade bei größeren Graphen einen hohen Speicherplatzbedarf und eignen sich für dichte Graphen. Wird ein lichter Graph untersucht, d. h. zwischen den Knoten existieren relativ wenig Relationen, enthält die Matrix viele Matrixelemente, die nicht besetzt sind. Zu den Matrixalgorithmen zählen die Verfahren

– von Bellmann-Ford und
– Floyd-Warshall.

Die **übrigen Algorithmen** sind unabhängig von der Datenstruktur der Relation des Graphen. Existierende Algorithmen sind

– der rekursive Tiefensuchalgorithmus,
– der nicht rekursive Tiefensuchalgorithmus,
– der Breitensuchalgorithmus,
– der Wegealgorithmus von Moore und
– der Wegealgorithmus von Dijkstra.

Ein Verfahren, welches auf einer Distanzmatrix (Adjazenzmatrix) aufbaut, ist der

Algorithmus von **Bellmann und Ford** [Brandstädt, 1994]. Bei diesem single-source-shortest-path-Algorithmus werden ausgehend von einem Startknoten die Längen der Wege zu allen anderen Knoten berechnet. In der Distanzmatrix stehen zu Beginn der Berechnungen die Längen der Kanten zwischen den Knoten. Existiert keine Kante zwischen zwei Knoten, so wird ein Wert von $+\infty$ eingetragen. Der Ergebnisvektor, entspricht einer Matrixspalte. Die Elemente des Vektors sind mit $+\infty$ belegt. In die Zeile des Startknotens wird im Ergebnisvektor der Wert Null eingetragen. Durch Vergleiche der Elemente des Ergebnisvektors und der Distanzmatrix werden die Gesamtlängen der minimalen Wege bestimmt. Die Komplexität zur Berechnung der Wege zwischen allen Knoten beträgt für einen allgemeinen Graphen $O(N^2M)$. Um den Verlauf der Wege zu ermitteln sind zusätzliche Funktionalitäten erforderlich.

Die Algorithmen von **Floyd** und **Warshall** [Floyd, 1962; Heun, 1997; Brandstädt, 1994] zur Bestimmung der minimalen Wege in einem Graphen besitzen denselben Aufbau und werden hier zusammen behandelt. Die Verfahren sind all-pairs-shortest-path-Algorithmen. Die Algorithmen bauen auf einer Distanzmatrix auf und berechnen die Längen der minimalen Wege zwischen allen Knotenpaaren. Jedes Matrixelement der Distanzmatrix enthält zu Beginn die Länge zwischen den jeweiligen Knoten des Graphen. Existiert keine Kante zwischen den Knoten, so wird ein Wert von $+\infty$ eingetragen. Durch Vergleiche der Matrixelemente werden in einer Komplexität von $O(N^3)$ die Bewertungen der minimalen Wege berechnet und in die Matrix eingetragen. Für das Konstruieren der Verläufe der berechneten minimalen Wege sind zusätzliche Funktionalitäten in die Algorithmen zu integrieren.

Mit dem **rekursiven Tiefensuchalgorithmus** [Sedgewick, 1992] wird ein single-source-Berechnungsalgorithmus bezeichnet, mit dem innerhalb eines Graphen jeweils Wege von einem Knoten zu allen anderen Knoten gesucht werden. Es werden von einem Knoten immer die Nachbarknoten untersucht. Ein Nachbarknoten ist ein Knoten, der mit dem aktuellen Knoten über eine Kante verbunden ist. Dieser Vorgang wird beginnend am Startknoten rekursiv für den jeweils zuerst besuchten Knoten durchgeführt. Da immer für den zuerst bearbeiteten Knoten die Nachbarknoten untersucht werden, erreicht dieser Algorithmus sehr schnell Knoten, die sich topologisch weit vom Startknoten entfernt befinden. Durch diesen Effekt findet dieser Algorithmus ohne Erweiterungen im allgemeinen nicht die minimalen Wege. Die Wege hängen von der Reihenfolge der Bearbeitung von Nachbarknoten eines Knotens ab. Die Komplexität für die Berechnung der Wege zwischen allen Knoten beträgt bei der Verwendung von Adjazenzlisten $O(N(N+M))$ und bei der Verwendung einer Adjazenzmatrix $O(N^3)$.

Der **nicht rekursive Tiefensuchalgorithmus** [Sedgewick, 1992] unterscheidet sich durch die Umwandlung der rekursiven Funktion in eine Kandidatenliste in Form eines Stapels (Last In, First Out). Für jeden Knoten werden die Nachbarknoten auf dem Stapel abgelegt. Solange dieser Stapel nicht leer ist, wird der jeweils zuletzt eingetragene Knoten zum Startknoten, von dem wiederum die Nachbarknoten gesucht werden. Die

Komplexität für die Berechnung der Wege zwischen allen Knoten beträgt bei der Verwendung von Adjazenzlisten O(N(N+M)) und bei der Verwendung einer Adjazenzmatrix $O(N^3)$.

Der **Breitensuchalgorithmus** [Sedgewick, 1992] aus der Graphentheorie basiert auf einer analogen Struktur wie der Tiefensuchalgorithmus. Auch hier werden die gefundenen Nachbarknoten in einer Kandidatenliste abgelegt, die im Verlauf der Berechnungen abgearbeitet wird. Bei diesem Verfahren wird die Kandidatenliste als Schlange aufgebaut (First In, First Out). Der Unterschied zum Tiefensuchalgorithmus besteht darin, dass beim Breitensuchalgorithmus immer das erste in der Kandidatenliste eingetragene Element für die weiteren Untersuchungen herangezogen wird. Die Folge dieser Vorgehensweise ist, dass zunächst die Knoten in der topologisch näheren Umgebung des Startknotens behandelt werden. Durch die fehlende Berücksichtigung der Bewertungen der Elemente ist auch bei diesem Algorithmus nicht gewährleistet, dass auf Anhieb die minimalen Wege gefunden werden. Wie beim Tiefensuchalgorithmus sind die gefundenen Wege von der Reihenfolge der Überprüfung der Nachbarknoten eines Knotens abhängig. Die Komplexität für die Berechnung der Wege zwischen allen Knoten beträgt bei der Verwendung von Adjazenzlisten O(N(N+M)) und bei der Verwendung einer Adjazenzmatrix $O(N^3)$.

Der **Wegealgorithmus von Moore** [Moore, 1959; Rose, 1996, 1] beinhaltet wie der Breitensuchalgorithmus eine Kandidatenliste, in der die zu untersuchenden Knoten registriert werden. Aus dieser Kandidatenliste wird jeweils ein beliebiger Knoten entnommen, der als bearbeitet markiert wird und dessen Nachbarn als neue Elemente in die Kandidatenliste eingetragen, sofern sie noch nicht als bearbeitet markiert worden sind. Ist die Kandidatenliste leer, sind alle Wege gefunden worden. Im Prinzip ist dieser Algorithmus mit dem Breitensuchalgorithmus oder Tiefensuchalgorithmus aus der Graphentheorie zu vergleichen. Der Unterschied besteht in der Wahl des nächsten Kandidaten. Die Kandidatenliste wird als Menge organisiert. Durch die Wahl eines beliebigen Knoten ist die Wahrscheinlichkeit, dass nicht sofort die minimalen Wege gefunden werden relativ groß, so dass dieser Algorithmus ein längeres Laufzeitverhalten aufweist, wenn die minimalen Wege berechnet werden. Die Komplexität bei der Berechnung der minimalen Wege zwischen allen Quelle-Ziel-Beziehungen ist mit $O(N^4)$ anzusetzen.

Die **Wegealgorithmus von Dijkstra** [Dijkstra 1959; Rose, 1996, 1; Mack, 1996] entspricht im wesentlichen einem Breitensuchalgorithmus. Die Modifikationen, die ihn von einem allgemeinen Breitensuchalgorithmus aus der Graphentheorie unterscheiden, sind in der Organisation der Kandidatenliste zu finden. Der Aufbau der Kandidatenliste erfolgt mit Hilfe einer sortierten Warteschlange, die auch als Prioritätsschlange bezeichnet wird. Die Prioritätsschlange besitzt zwei Eigenschaften, die für eine Minimale-Wege-Suche unbedingt notwendig sind. Neue Elemente werden entsprechend ihrer Bewertung aufsteigend in die Kandidatenliste einsortiert. Wird ein Element

herausgenommen, so wird immer das erste Elemente der Kandidatenliste ausgewählt. Durch das Einsortieren neuer Elemente anhand deren Bewertung ist gewährleistet, dass das Element mit der minimalen Bewertung immer an erster Stelle in der Kandidatenliste steht. Bei der Organisation der Kandidatenliste als Menge ist die Komplexität für diesen Algorithmus für einen allgemeinen Graphen $O(N^3)$, wenn zwischen allen Knoten Wege berechnet werden. Bei der Verwendung einer Prioritätswarteschlange liegt die Komplexität bei O(NM log N).

5.1.2 Mehrwegealgorithmen

Mit den **Mehrwegealgorithmen** werden zwischen Knoten mehrere Wege berechnet. In den folgenden Abschnitten werden die Mehrwegealgorithmen von

- Thomas,
- Schmidtke (Byers/Waterman)
- Minieka / Floyd,
- Hoffman & Pavley, Clarke,
- Azevedo und
- Yen

kurz erläutert. Es werden die Eigenschaften beschrieben und die Komplexität für die Berechnungen von maximal k Wegen zwischen allen Knoten des Graphen ermittelt.

Thomas [Thomas, 1991] beschreibt in einer kurzen Abhandlung eine Möglichkeit, mit einem erweiterten Algorithmus von Dijkstra, mehrere Wege zu einen Knoten zu suchen. Dabei werden abweichend vom Algorithmus von Dijkstra für jeden Knoten nicht nur ein sondern k Vorgänger, d.h. k Wege zu einem Knoten, gespeichert. Die berechneten Wege sind nicht die k-kürzesten Wege. Neben dem kürzesten Weg werden weitere Wege gefunden. Für die Berechnung der k-kürzesten-Wege sind ein mehrfaches Verwenden von Knoten als Kandidaten und eine erweitere Suche des nächsten Knotens in der Kandidatenliste erforderlich. Die Komplexität kann in Abhängigkeit vom Wegealgorithmus von Dijkstra mit $O(N^3k^2)$ oder O(NMk log(kN)) angegeben werden. Die Lösungsmenge der alternativen Wege enthält auch Wege mit Zyklen.

Ein Mehrwegealgorithmus, der alternative Wege berechnet, ist von **Schmidtke** [SCHMIDTKE, 1993] auf der Basis des Algorithmus von Byers/Waterman entwickelt worden. Der Algorithmus entspricht im wesentlichen einem erweiterten Tiefensuchalgorithmus. Durch eine Rückverfolgungsroutine, die Teilwege mit den Elementen in der Kandidatenliste vergleicht, werden alternative Wege berechnet. Als Auswahlkriterium wird die Bewertung der Wege herangezogen. Über einen Umwegfaktor werden alle Wege berechnet, die sich durch einen maximal begrenzten Umweg von dem kürzesten Weg unterscheiden. Die Wege sind schleifenfrei. Durch verschiedene Erweiterungen

sind single-pair-Algorithmen und single-source-Algorithmen entstanden. Eine mathematische Angabe der Komplexität erfolgt in der Arbeit von Schmidtke nicht. Die Komplexität wird anhand der Ausführungen auf $O(aMN^2 \log M)$ mit $a > 1$ geschätzt.

Eine Verallgemeinerung des Algorithmus von Floyd ist das Verfahren von Minieka. Der Algorithmus von **Minieka / Floyd** [Floyd, 1962; Minieka 1974; Mack, 1996] berechnet die k-kürzesten Wege zwischen allen Knoten im Graphen. Voraussetzung für den Algorithmus ist die zusätzliche Bedingung, dass zwei verschiedene Wege nicht die gleiche Bewertung besitzen dürfen. Die Generalisierung des Algorithmus von Floyd besteht in der Erweiterung der Matrixelemente der Distanzmatrizen durch Vektoren der Länge k. In den Vektoren werden die Längen der berechneten Wege abgelegt. Die Komplexität beträgt $O(Nk^3+N^3k^2)$. Durch Optimierung kann ein Wert von $O(Nk (\log k)^2+N^3k \log k)$ erreicht werden. Vorteil dieses Verfahrens ist die geringe Komplexität . Nachteilig wirkt sich die Vorbedingung über die nicht zulässigen Wege gleicher Bewertung aus.

Im Gegensatz zum Verfahren von Minieka ist der Algorithmus von **Hoffman & Pavley** [Hoffman, 1959; Mack, 1996] ein single-pair-k-shortest-path-Algorithmus. Es werden die k-kürzesten Wege zwischen zwei Knoten berechnet. Dabei baut der Algorithmus auf den zuvor zwischen den Knoten berechneten minimalen Wegen auf, die mit anderen Verfahren (z. B. Dijkstra) zu bestimmen sind. Die grundlegende Idee des Algorithmus ist die Aussage, dass jeder k-kürzeste Weg sich durch eine Abweichung vom r-kürzesten Weg unterscheidet, wobei r immer kleiner als k vorausgesetzt wird. Ist ein r-kürzester Weg bestimmt worden, so wird der Weg an jedem Knoten aufgetrennt, mit anderen vorhandenen Kanten am Knoten ergänzt und anhand der zuvor berechneten minimalen Wege um den minimalen Weg vom Zielknoten der eingefügten Kante zum Zielknoten des Weges ergänzt. Die Komplexität für die Berechnungen der Wege zwischen allen Knoten beläuft sich auf $O(N^4k)$. Es ist zu beachten, dass der Algorithmus auch Wege mit Zyklen in der Ergebnismenge zurück liefert.

Der Algorithmus von **Clarke** [Clarke, 1963; Mack, 1996] zeichnet sich durch die Erweiterung aus, dass nur zyklenfreie Wege als Ergebnis zurückgeliefert werden. Aufbauend auf dem Verfahren von Hoffman & Pavley wird mittels internen Zählern die Anzahl der gefundenen zyklenfreien Wege festgehalten und entsprechend mehr k-kürzeste Wege gesucht. Eine Aufwandsabschätzung für diese Erweiterung ist nicht möglich.

Azevedo [Azevedo, 1990; Mack, 1996] hat einen weiteren single-pair-k-shortest-path-Algorithmus entwickelt, der auch dem Prinzip basiert, dass sich der k-kürzeste Weg aus Teilen des r-kürzesten Weges zusammensetzt ($r \leq k$). Auf der Basis eines Ausgangsgraphen G_1 und einem gefundenen minimalen Weg wird der Graph G_1 derart umgebaut, das der minimale Weg im Graphen G_2 dem zweitkürzestem Weg im Graphen G_1 entspricht. Auf diese Weise können k-kürzeste Wege berechnet werden. Der Umbau des

Graphen erfolgt über die Definition von Superknoten (Kopien von Knoten) entlang des zuletzt berechneten minimalen Weges und dem Umhängen des Ziels an einen neu gebildeten Superknoten. In diesem neuen Graphen wird erneut der minimale Weg berechnet. Die Komplexität für die Berechnung von k Wegen zwischen allen Knoten beträgt $O(N^3+N^2Mk)$. Auch dieser Algorithmus bestimmt Wege mit Zyklen.

Das von **Yen** [Yen, 1971; Mack, 1996] entwickelte Verfahren eines single-source-k-shortest-loopless-path-Algorithmus basiert auf der Reduktion des Graphen um Kanten des zuletzt berechneten minimalen Weges. Der minimale Weg wird mit einem Minimale-Wege-Algorithmus bestimmt. Alle Knoten des zuletzt berechneten Weges werden mit den bisher gefundenen Wegen auf einem gemeinsamen Verlauf verglichen. Ist dieser vorhanden, so wird die Kante des zuletzt bestimmten Weges, von dem jeweils kontrollierten Knoten aus dem Graphen entfernt (Bewertung wird ∞). Der neue Weg wird dann durch einen speziellen Minimale-Wege-Algorithmus beginnend an diesem Knoten ermittelt. Der neue minimale Weg darf über keinen Knoten verlaufen, der auf dem zuvor verglichenem Anfang des Weges liegt. Die Komplexität für eine all-pairs-Berechnung liegt bei $O(N^5k)$. Die Ergebnismenge dieses Verfahrens besteht nur aus zyklenfreien Wegen.

5.1.3 Bewertung der Weg- und Mehrwegealgorithmen

Die Übersicht der **Weg- und Mehrwegealgorithmen** läßt zusammenfassende Aussagen zu. Bei den Minimale-Wege-Algorithmen sind kaum noch Optimierungskapazitäten vorhanden. Es existieren all-pairs- und single-source-Verfahren. Die Algorithmen für die k-kürzesten-Wege bauen zumeist auf einer Kombination einer Minimalen-Wegesuche und Modifikationen im Netzgraphen auf. Für alle Knoten im Graphen ist die Anzahl der zu bestimmenden k-kürzesten Wege vor der Berechnung festzulegen. Es existieren all-pairs-, single-source- und single-pair-Verfahren. Die Wahl von alternativen Wegen wird anhand der Bewertung der Wege über deren gesamten Verlauf vorgenommen. Auch liefern die Mehrwegealgorithmen aufgrund ihrer Konstruktionsprinzipien Wege mit Zyklen sowie Wege mit “kleinen“ Umwegen. Während die Wege mit Zyklen durch Modifikationen der Algorithmen in Form einer literalen Bewertung erkannt werden können, ist eine Modifikation zum Erkennen von Wegen mit “kleinen“ Umwegen nicht möglich.

Aufgrund der **Eigenschaften** der beschriebenen Wegealgorithmen

- “Die Anzahl der alternativen Wege für alle Knoten wird fest vorgegeben.”
- “Die Bewertung von gesamten Wegen ist das einzige Kriterium.”
- “Die Lösungsmengen enthalten zum Teil Wege mit Zyklen.”

wird versucht, einen neuen bzw. modifizierten Mehrwegealgorithmus zu entwickeln.

Die Menge von **alternativen Wegen** im Bereich von Verkehrsplanungen kann mit Hilfe der im vorherigen Kapitel definierten elementar beschränkten Wegemenge bzw. minimalen Fuzzy-bewerteten Wegemenge beschrieben werden. Um diese zu bestimmen, sind auch Teilwege von Wegen miteinander zu vergleichen bzw. eine "unscharfe" Bewertung zu berücksichtigen.

Für die Berechnung der **elementar beschränkten Wegemenge** ist ein neuer Mehrwegealgorithmus zu entwickeln. Der neue elementare Mehrwegealgorithmus besitzt die Eigenschaften

- "Die alternativen Wege sind abhängig von der Dichte des Graphen."
- "Die Wegemenge entspricht einer elementar beschränkten Wegemenge.".

Auch zur Bestimmung der **minimalen Fuzzy-bewerteten Wegemenge** ist keiner der aufgeführten Wegealgorithmen in seiner Grundform geeignet. Es ist ein neuer Fuzzy-Mehrwegealgorithmus zu definieren, der durch die Eigenschaften

- "Die alternativen Wege sind abhängig von der Dichte des Graphen."
- "Die Wegemenge entspricht der minimalen Fuzzy-bewerteten Wegemenge."

charakterisiert wird.

5.2 Der neue Mehrwegealgorithmus

Als Basis für den neuen Mehrwegealgorithmus wird der Wegealgorithmus von Dijkstra verwendet. Der Wegealgorithmus von Dijkstra ist kein Matrixalgorithmus und besitzt ein günstiges Rechenzeitverhalten O(M log N). Weiterhin werden durch den Algorithmus von Thomas Möglichkeiten aufgezeigt, auf welche Weise alternative Wege auf der Basis des Algorithmus von Dijkstra bestimmt werden können. Der Umstand, dass dieses Verfahren nur ein single-source-Algorithmus ist, wird durch mehrmaliges Aufrufen für jeden Startknoten im Graphen kompensiert.

Die Entwicklung des neuen Mehrwegealgorithmus gliedert sich in folgende **Unterkapitel**. Nach der Beschreibung eines generellen Mehrwegealgorithmus werden die Mehrwegealgorithmen zur Bestimmung der minimalen Wegemenge, der einfach beschränkten Wegemenge, der elementar beschränkten Wegemenge und der minimalen Fuzzy-bewerteten Wegemenge als Spezialisierungen beschrieben.

5.2.1 Der generelle Mehrwegealgorithmus

Der **generelle Mehrwegealgorithmus** berechnet von einem Startknoten $x \in V$ zu allen anderen Knoten im Graphen alternative Wege. Dabei wird eine Kandidatenliste

verwendet, deren Elemente im Verlauf der Berechnungen abgearbeitet werden. Anstelle der Knoten werden im neuen Wegealgorithmus Tupel innerhalb der Berechnungen verwendet.

Um alternative Wege zu berechnen, wird für das Vorhalten von Weginformationen ein Tupel $p_p(j,k)$ eingeführt. Mit Hilfe der Tupel können durch rekursive Aufrufe die Wege in ihrem Verlauf von einem Knoten bis zum Startknoten des Weges zurückverfolgt werden. Jedes **Tupel $p_p(j,k)$** $=(k_p, w_p(x,k), p_{p-1}(i,j))$ besteht

- aus einer Kante k_p vom Knoten $j \in V$ zum Knoten $k \in V$, welche der letzten Kante der Kantenfolge des Weges entspricht,
- aus einer Weglänge $w_P(x,k)$, deren Wert die Weglänge des Weges vom Startekno-ten x bis zum Endknoten k der Kante k_p umfaßt und
- aus einem Tupel $p_{p-1}(i,j)$, welches den vorherigen Teilweg beschreibt.

Die Abbildung 33 zeigt das Funktionsmodell des generellen Mehrwegealgorithmus.

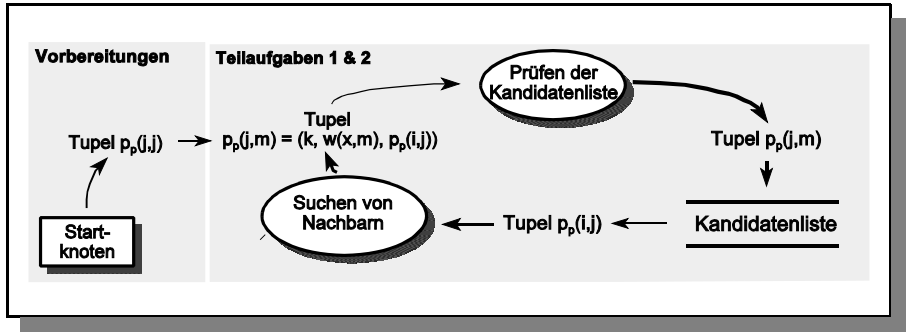

Abbildung 33: Funktionsmodell: Mehrwegealgorithmus mit Kandidatenliste

Der generelle Mehrwegealgorithmus läßt sich in einige wenige **Teilschritte** aufschlüsseln. Der erste Teilschritt besteht darin, ein Tupel $p_0(x,x) = (-, 0, p_0(x,x))$ für den Startknoten x zu definieren und in die Kandidatenliste einzufügen. Die folgenden beiden Teilaufgaben werden anschließend solange wiederholt, bis kein Tupel mehr in der Kandidatenliste vorhanden ist .

Teilaufgabe 1: Für einen Tupel $p_p(i,j)$ der Kandidatenliste, werden ausgehend vom Knoten j die Kanten k zu den Nachbarknoten untersucht. Für die Wege zu jedem Nachbarknoten m werden entsprechende Tupel $p_p(j,m)$ definiert. In Abhängigkeit einer Entscheidungsfunktion $G(p_p(j,m))$ unter Berücksichtigung der Weglänge w(x,m) wird die Kandidatenliste mit dem Tupel $p_p(j,m)$ ergänzt.

Teilaufgabe 2: Das in Teilaufgabe 1 untersuchte Tupel $p_p(i,j)$ wird aus der Kandidatenliste herausgenommen und der zum Knoten j führende Weg als ein alternativer Weg gespeichert.

Aufgrund der Aufgabe der Entscheidungsfunktion, die Kandidatenliste mit neuen Tupeln zu ergänzen, wird über diese Funktion auch das **Abbruchverhalten** des generellen Mehrwegealgorithmus gesteuert. In der Teilaufgabe 1 werden diejenigen Tupel zu der Kandidatenliste hinzugefügt, die einen alternativen Weg repräsentieren, welcher den definierten Eigenschaften entspricht. In den Programmtexten wird dieser Vorgang mit Hilfe der Entscheidungsfunktion *checkPath* und der Methode *listofcandidate.put* umgesetzt. In der zuvor beschriebenen Teilaufgabe 2 wird jeweils ein Tupel aus der Kandidatenliste entfernt. Enthält die Kandidatenliste zu einem Zeitpunkt n Kandidaten, so ist die Kandidatenliste nach n-maligem Durchführen der Teilaufgabe 2 (Methode *get*) leer, sofern keine neuen Tupel der Kandidatenliste hinzugefügt werden. Innerhalb der folgenden Programmtexte entspricht die Teilaufgabe 2 der Methode *listofcandidate.get*.

Klasse:	**graph**	Pfeilgraph	
Klasse:	**node**	Knoten	
	paths.count	Eigenschaft:	Anzahl der Wege zum Knoten
	paths	Eigenschaft:	Liste mit Wegen (Tupeln p_p) zum Knoten
	neighbours	Methode:	Liste der Nachbarknoten (Kanten)
Klasse:	**edge**	Kante	
	q	Eigenschaft:	Quelle bzw. Startknoten der Kante
	z	Eigenschaft:	Ziel bzw. Endknoten der Kante
	w	Kantenlänge	
Klasse:	**listofcandidates**	Kandidatenliste	
	put	Methode:	Element einfügen
	get	Methode:	Element holen und aus der Kandidatenliste entfernen
	empty	Methode:	prüft, ob Liste Elemente enthält
Klasse:	**path**	wegbeschreibendes Tupel	
	e	Kante des Teilweges	
	w	Weglänge bis zum Endknoten der Kante e	
	p	Verweis auf das vorherige Tupel	
Funktion:	**checkPath**	Entscheidungsfunktion	
	path	Parameter	Weg, der zu prüfen ist
Funktion:	**addLength**	berechnet Weglänge aus einer Weg- und Kantenlänge	
	path	Parameter	Weg, dessen Weglänge einfließt
	edge	Parameter	Kante, deren Kantenlänge einfließt

Programmtext 1: Genereller Mehrwegealgorithmus: Klassendefinitionen


```
procedure MEHRWEG (Q node)
var   G1    graph
      V1    node
      K     listofcandidates
      P1    path

      procedure REGISTRIEREN (P path)
      var   P2 path
            E1 edge
      begin
            { Hole alle Kanten zu den Nachbarknoten }
            for E1 in P.e.z.neighbours do begin
                  { Berechnen der Bewertung bis zum Nachbarknoten }
                  P2 = (E1, addLength(P.w,E1.w), P)
                  { Einfügen in Abhängigkeit der Entscheidungsfunktion}
                  if checkPath(P2) then K.put(P2)
            end
      end

begin
      { alle Wege zu Knoten löschen }
      for V1 in G1 do V1.paths.count := 0
      { Bewertung zum Quellknoten q auf Null setzen }
      P1 = (edge(Q, Q), 0, NULL)
      { Nachbarn des Startknoten untersuchen }
      REGISTRIEREN(P1)
      { Abarbeiten der Kandidatenliste }
      while not K.empty do begin
            { Hole ein Tupel aus der Kandidatenliste }
            P1 = K.get
            { alternativen Weg zumKnoten registrieren }
            P1.e.z.paths.count =P1.e.z.paths.count +1
            P1.e.z.paths.add(P1)
            { Nachbarknoten untersuchen }
            REGISTRIEREN(P1)
      end
end
```

Programmtext 2: Genereller Mehrwegealgorithmus: Programmablauf

Die **Komplexität** des generellen Mehrwegealgorithmus läßt sich nur in Abhängigkeit der beschriebenen Funktionen abschätzen. Für eine vollständige Beurteilung der Komplexität sind die Methoden *put* und *get* der Kandidatenliste, die Funktion *checkPath* und eine Funktion f(k) zur Beschreibung der Anzahl von Wegen über eine Kante k zu untersuchen. Die Komplexität des generellen Mehrwegealgorithmus beim Berechnen alternativer Wege zwischen allen Knoten des Graphen G mit der Anzahl der Knoten

N und der Anzahl der Kanten M zeigt (40).

$$O(N \cdot M \cdot f(k) \cdot [\ O(checkPath) + O(put) + O(get)\ ]) \quad (40)$$

Für jeden Knoten als Quellknoten ist jede Kante mit der Häufigkeit f(k) zu untersuchen. Dabei steht die Funktion f(k) für die Anzahl der alternativen Wege, die über eine Kante verlaufen. Für jede Untersuchung wird die Funktion *checkPath* aufgerufen. Für jeden gültigen Weg wird das zugehörige Tupel $p_p(i,j)$ der Kandidatenliste mit der Komplexität O(put) hinzugefügt und später wieder mit einer Komplexität O(get) entnommen.

Die **Funktion f(k)** ist von mehreren Eigenschaften des Graphen und der jeweils betrachteten Wege abhängig, so dass eine genaue Abschätzung nicht möglich ist. Es können jedoch für ausgesuchte Beispiele Aussagen zur Komplexität sowie minimale und maximale Grenzen angegeben werden. Parameter für die Größe der Funktion f(k) sind der Grad P von parallelen Kanten innerhalb des Graphen und die Anzahl L von Kanten auf einem Weg. Der Grad der Parallelität P auf einem untersuchten Weg geht als Basis innerhalb einer Potenzfunktion $P^{(L-1)}$ in den Funktionswert mit ein, dessen Exponent von der Anzahl L der Kanten auf dem aktuell betrachteten Weg abhängt (41).

$$f(k) = P(k)^{L(k)-1} \quad (41)$$

Für die vierte Kante auf einem Weg ist der Funktionswert $f(k) = 3^3 = 27$, wenn zu jeder der drei ersten Kanten jeweils zwei Kanten parallel verlaufen und wenn alle Wegkombinationen mit Hilfe der Funktion *checkPath* als alternative Wege zugelassen werden. Die Funktion f(k) variiert für jede Kante in Abhängigkeit der oben aufgeführten Parameter. Der minimale Wert für die Parallelität P(k) ist der Wert eins, sofern keine parallelen Kanten im Graphen existieren. Der maximale Wert entspricht der Anzahl der Kanten M, wenn alle Kanten des Graphen zueinander parallel verlaufen. Innerhalb eines multimodalen Verkehrsnetzes kann die Parallelität mit der Anzahl der untersuchten Verkehrsmittel (z. B. P(MIV, ÖPNV, Rad, FUSS) = 4) gleichgesetzt werden. Der minimale Wert für die Anzahl von Kanten auf einem Weg beträgt ebenfalls eins, wenn der Weg nur aus einer Kante besteht. Als maximaler Wert ist die Anzahl der Kanten M im Graphen anzugeben, wenn der Weg über alle Kanten im Graphen verläuft. Dieser Fall ist jedoch als sehr unwahrscheinlich anzusehen. Bei den untersuchten Verkehrsnetzen ergab sich eine mittlere Anzahl L der Kanten auf einem Weg von 0,5‰ von der Anzahl der Kanten M. Die mittlere Anzahl L der Kanten auf einem Weg in der Form $L(k) = M^{\alpha}$ ergab bei den untersuchten Verkehrsnetzen einen Wert $\alpha = 0{,}4$. Daraus folgt für L eine Funktion von $L(k) = M^{0,4}$ Auch die Funktion f(k) kann in der Form M^{α} abgeschätzt werden. Bei den betrachteten Verkehrsnetzen ergibt sich ein Wert $\alpha = 0{,}5$. In (42) werden die sich für die Funktion f(k) ergebenden Therme noch einmal dargestellt.

$$\begin{aligned} f(k) &= 1^0 = 1 \approx M^0 && \text{(min) } \textit{einsetzen der minimalen Werte} \\ f(k) &= 4^{0,005 \cdot M} \approx M^{0,5} && \text{(avg) } \textit{einsetzen geschätzer Werte} \\ f(k) &= M^{M-1} && \text{(max) } \textit{einsetzen der maximalen Werte} \end{aligned} \quad (42)$$

Als **Organisationsformen einer Kandidatenliste** stehen der Stapel und die Schlange zur Verfügung. Der Stapel entspricht einer Folge mit dem Prinzip LAST IN, FIRST OUT. Neue Elemente werden an das Ende angehängt und Elemente aus der Kandidatenliste vom Ende entnommen. Die Schlange arbeitet nach dem Prinzip FIRST IN, FIRST OUT. Neue Elemente werden an das Ende angehängt und Elemente aus der Kandidatenliste vom Anfang entnommen. Alternativ zum Anhängen eines neuen Elements an das Ende der Kandidatenliste kann das Element anhand eines Kriteriums in die Folge einsortiert werden. Abhängig von der Art der Entnahme vorhandener Elemente entsteht eine Prioritätsschlange oder ein Prioritätsstapel.

In den folgenden **Kapitel**n werden die Methoden *get* und *put* der Kandidatenliste und die Funktion *checkPath* spezifiziert, um die minimale Wegemenge, die einfach beschränkte Wegemenge, die elementar beschränkte Wegemenge und die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge zu bestimmen.

5.2.2 Die minimale Wegemenge

Zur Bestimmung der minimalen Wegemenge in einem deterministisch ("scharf") bewerteten Graphen sind **Spezifikationen** der Methoden *put* und *get* der Kandidatenliste notwendig sowie die Funktionen *addLength* und *checkPath* zu definieren.

Die **Kandidatenliste** wird in Form einer Prioritätsschlange organisiert. Aufgrund der Eigenschaft einer linear geordneten Wegemenge unterliegt das Einsortieren keinerlei Beschränkungen. Mit der Prioritätsschlange wird gewährleistet, dass der bislang minimale Weg zuerst untersucht wird und die Wege zu den Nachbarknoten auf dem bisher minimalen Weg aufbauen. Im Programmtext 3 werden die Spezifikationen umgesetzt.

Die **Entscheidungsfunktion** *checkPath* hat aufgrund der Organisation der Kandidatenliste als Prioritätswarteschlange nur zu prüfen, ob bereits ein Weg zum Nachbarknoten berechnet wurde bzw. ob die Weglänge des aktuellen Weges gleich der Weglänge des ersten (minimalen) Weges zum Knoten ist. Im Programmtext 3 werden die Spezifikationen umgesetzt.

Die **Berechnung von Weglängen** in der Funktion *addLength* erfolgt über die Addition der Bewertungen der Weg- und Kantenlängen. Im Programmtext 3 werden die Spezifikationen umgesetzt.

Die **Komplexität** (43) des Mehrwegealgorithmus zur Bestimmung aller minimalen Wege in einem Graphen läßt sich durch Einsetzen der Komplexitäten der Methoden f(k), *checkPath* (O(1)), *put* (O(logM)) und *get* (O(1)) bestimmen.

$$O(N \cdot M \cdot f(k) \cdot [\ 1 + \log M + 1\ ]) \approx O(N \cdot M \cdot f(k) \cdot \log M) \qquad \textbf{(43)}$$

Für eine Abschätzung der Komplexität werden in (44) die zuvor bestimmten Grenzwerte der Funktion f(k) innerhalb von (43) eingesetzt.

$$\begin{aligned} &O_{min}(N \cdot M \cdot \log M) \\ &O_{avg}(N \cdot M^{1,5} \cdot \log M) \end{aligned} \qquad \textbf{(44)}$$

```
procedure listofcandidates.put(P path)
begin
        { Einsortieren des Weges anhand seiner Weglänge }
        Insert (P, P.w)
end

path listofcandidates.get
begin
        { erstes Element der Liste holen }
        get = first
        { Element aus der Liste entfernen }
        delete(first)
end

bool checkPath(P path)
begin
        { existiert bereits ein Weg zum Endknoten der Kante oder ist die
        aktuelle Weglänge gleich der minimalen Weglänge }
        checkPath =( P.e.z.paths.count = 0) or (P.w = P.e.z.paths(1).w)
end

real addLength(P path, E edge)
begin
        addLength = P.w + E.w
end
```

Programmtext 3: Genereller Mehrwegealgorithmus: Spezifikation, minimale Wege

Ist als Lösungsmenge nur **genau ein minimaler Weg** zwischen zwei Knoten gefordert, so kann die Funktion *checkPath* auf die Überprüfung der Anzahl der vorhandenen Wege reduziert werden. Aufgrund der Eigenschaft, zu jedem Knoten nur genau einen Weg

zu berechnen, enthält die Kandidatenliste zu jedem Knoten genau eine Kante, so dass sich die Komplexität der Methode *put* zu O(logN), die Komplexität der Funktion f(k) zu O(1) und die Komplexität der gesamten Berechnungen zu O(NM(logN)) ändert. Der hier spezifizierte Algorithmus zur Bestimmung eines minimalen Weges zwischen allen Knoten entspricht dem Wegealgorithmus nach Dijkstra.

5.2.3 Die einfach beschränkte Wegemenge

Zur Bestimmung der einfach beschränkten Wegemenge in einem bewerteten Graphen sind **Spezifikationen** der Methoden *put* und *get* der Kandidatenliste notwendig sowie der Funktion *addLength* und *checkPath* zu definieren.

Die **Kandidatenliste** wird in Form einer Prioritätsschlange organisiert. Aufgrund der Eigenschaft einer linear geordneten Wegemenge unterliegt das Einsortieren keinerlei Beschränkungen. Mit der Prioritätsschlange wird gewährleistet, dass der bislang minimale Weg zuerst untersucht wird. Im Programmtext 3 werden die Spezifikationen umgesetzt.

Die **Entscheidungsfunktion** *checkPath* hat zu prüfen, ob die Weglänge des neuen Weges im Gültigkeitsbereich der Weglänge des minimalen Weges liegt. Durch die Prioritätswarteschlange wird gewährleistet, dass der minimale Weg zu einem Knoten immer der erste Weg ist, der zu einem Knoten berechnet wird. Im Programmtext 3 werden die Spezifikationen umgesetzt.

Die **Berechnung von Weglängen** in der Funktion *addLength* erfolgt über die Addition der Bewertungen der Weg- und Kantenlängen. Im Programmtext 3 werden die Spezifikationen umgesetzt.

Die **Komplexität** (45) des Mehrwegealgorithmus zur Bestimmung aller einfach beschränkten Wege in einem Graphen läßt sich durch Einsetzen der Komplexitäten der Methoden f(k), *checkPath* (O(1)), *put* (O(logM)) und *get* (O(1)) bestimmen.

$$O(N \cdot M \cdot f(k) \cdot [\ 1 + \log M + 1\ ]) \approx O(N \cdot M \cdot f(k) \cdot \log M) \qquad \textbf{(45)}$$

Für eine Abschätzung der Komplexität werden in (46) die zuvor bestimmten Grenzwerte der Funktion f(k) innerhalb von (45) eingesetzt.

$$\begin{aligned} &O_{min}(N \cdot M \cdot \log M) \\ &O_{avg}(N \cdot M^{1,5} \cdot \log M) \end{aligned} \qquad \textbf{(46)}$$

```
procedure listofcandidates.put(P path)
begin
        { Einsortieren des Weges anhand seiner Weglänge }
        Insert (P, P.w)
end

path listofcandidates.get
begin
        { erstes Element der Liste holen }
        get = first
        { Element aus der Liste entfernen }
        delete(first)
end

bool checkPath(P path)
begin
        { die Wegleänge des neuen Weges ist maximal α% länger als die Weg-
        länge des ersten Weges (minimalen Weges oder der Weg ist der erste
        Weg (minimale Weg) }
        if P.e.z.paths.count > 0 then
                checkPath = (P.w - P.e.z.paths(1).w) / P.e.z.paths(1).w ≤ α
        else    checkPath = true
end

real addLength(P path, E edge)
begin
        addLength = P.w + E.w
end
```

Programmtext 4: Genereller Mehrwegealgorithmus: Spezifikation, einfach relativ beschränkte Wege

5.2.4 Die elementar beschränkte Wegemenge

Zur Bestimmung der elementar beschränkten Wegemenge in einem bewerteten Graphen sind **Spezifikationen** der Methoden *put* und *get* der Kandidatenlistenotwendig sowie der Funktionen addLength *und checkPath* zu definieren.

Die **Kandidatenliste** wird in Form einer Prioritätswarteschlange organisiert. Aufgrund der Eigenschaft einer linear geordneten Wegemenge unterliegt das Einsortieren keinerlei Beschränkungen. Mit der Prioritätsschlange wird gewährleistet, dass der bislang minimale Weg zuerst untersucht wird. Im Programmtext 5 werden die Spezifikationen umgesetzt.


```
procedure listofcandidates.put(P path)
begin
        { Einsortieren des Weges anhand seiner Weglänge }
        Insert (P, P.w)
end

path listofcandidates.get
begin
        { erstes Element der Liste holen }
        get = first
        { Element aus der Liste entfernen }
        delete(first)
end

bool checkPath(P path)
var     P1      path
begin
        { alle Teilwege auf dem aktuellen Weg prüfen }
        checkPath = true
        P1 = P
        { Weg zurückvefolgen, Abbruchkriterium ist Start-Tupel p(x,x) }
        while P1.p.e.q ≠ P1.p.e.z do
                checkPath =checkPath and
                        ((P1.w - w_min(P1.e.z,P.e.z) / w_min( P1.e.z,P.e.z) ≤ α)
                P1 = P1.p
        end
end

real addLength(P path, E edge)
begin
        addLength = P.w + E.w
end
```

Programmtext 5: Genereller Mehrwegealgorithmus: Spezifikation, elementar beschränkte Wege

Die **Entscheidungsfunktion** *checkPath* hat anhand der Weglänge und des Verlaufs des neuen Weges zu prüfen, ob der Weg ein elementar beschränkter Weg ist. Dazu sind die Weglängen der Teilwege mit den Weglängen der minimalen Teilwege zu überprüfen. Dafür wird die minimale Weglänge der Wege zwischen dem Anfangs- und Endknoten des Teilweges als bekannt vorausgesetzt. Für die Berechnung der minimalen Weglängen können die im Kapitel 5.1.1 diskutierten Minimale-Wege-Algorithmen verwendet werden.

Durch die Eigenschaften des Mehrwegealgorithmus, die Wege beginnend von einem

Startknoten aufzubauen, kann durch die Anwendung der Prioritätswarteschlange innerhalb der Funktion *checkPath* vorausgesetzt werden, dass der Weg zum Anfangsknoten der Kante des zu untersuchenden Tupels elementar beschränkt ist. Es sind nur die Teilwege zu überprüfen, die durch Hinzufügen der neuen Kante entstehen. Beginnend vom Anfangsknoten der neuen Kante bis zum Startknoten des untersuchten Weges werden Teilwege gebildet. Jeder Teilweg beginnt an einem Knoten auf dem zu prüfenden Weg und endet am Endknoten der neuen Kante. Für jeden Teilweg werden die aktuelle Weglänge und die minimale Weglänge miteinander verglichen. Im Programmtext 5 werden die Spezifikationen umgesetzt.

Die **Berechnung von Weglängen** in der Funktion *addLength* erfolgt über die Addition der Bewertungen der Weg- und Kantenlängen. Im Programmtext 5 werden die Spezifikationen umgesetzt.

Die **Komplexität** (47) des Mehrwegealgorithmus zur Bestimmung aller elementar beschränkten Wege in einem Graphen läßt sich durch Einsetzen der Komplexitäten der Methoden f(k), *checkPath*, *put* (O(logM)) und *get* (O(1)) bestimmen. Die Komplexität der Methode *checkPath* hängt von der Anzahl der Kanten L ab, aus denen ein Weg besteht. Hinzu kommen die notwendigen Berechnungen zum Bestimmen aller minimalen Wege im Graphen.

$$O(N \cdot M \cdot \log N + N \cdot M \cdot f(k) \cdot [\, L + \log M + 1 \,]) \approx O(N \cdot M \cdot [\, \log N + f(k) \cdot [\, L + \log M \,] \,]) \quad \textbf{(47)}$$

Der erste Summand von (47) beschreibt die Komplexität für die Berechnungen der minimalen Wege zwischen allen Knoten des Graphen. Der zweite Summand entspricht der Komplexität der Berechnungen zur Bestimmung der elementar beschränkten Wege. Für eine Abschätzung der Komplexität werden in (48) die zuvor bestimmten Grenzwerte der Funktion f(k) und der mittleren Weglänge L innerhalb von (47) eingesetzt.

$$O_{min}(N \cdot M\, [\log N + \log M]) \qquad O_{avg}(N \cdot M\, [\log N + M^{0,9} + M^{0,4} \cdot \log M]) \quad \textbf{(48)}$$

5.2.5 Die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge

Beim Berechnen der Fuzzy-bewerteten Wege besteht die Kantenlänge *w* der Klasse *edge* und die Weglänge *w* der Klasse *path* aus **Fuzzy-Zahlen** vom Typ LR. Die Referenzfunktionen L(s) und R(s) werden näherungsweise durch ein Feld von n Punkten definiert. Jeder Punkt repräsentiert den Wert s für ein spezielles α-Niveau (siehe Kapitel 4.2).

Zur Bestimmung der minimalen Fuzzy-bewerteten Wegemenge sind **Spezifikationen** der Methoden *put* und *get* der Kandidatenliste notwendig sowie der Funktionen *addLength* und *checkPath* zu definieren.

```
procedure listofcandidates.put(P path)
begin
        { Einsortieren des Weges anhand der Weglänge }
        Insert (P, P.w)
end

path listofcandidates.get
begin
        { erstes Element der Liste holen }
        get = first
        { Element aus der Liste entfernen }
        delete(first)
end

bool checkPath(P path)
var     i       integer
begin
        checkPath = false
        { Schleife über α-Niveaus der L- und R-Funktion der Fuzzy-Zahl}
        for i=0 to n do begin
                if not (P.w[i] > P_min.w[i]) then begin
                        checkPath = true
                        P_min.w[i] = P.w[i]
                end
        end
end

real[] addLength(P path, E edge)
var     i       integer
begin
        for i=0 to n do
                addLength[i] = P.w[i] + E.w[i]
end
```

Programmtext 6: Genereller Mehrwegealgorithmus: Spezifikation, minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge

Die **Kandidatenliste** wird in Form einer Prioritätsschlange organisiert. Da die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge nicht linear geordnet werden kann, ist beim Einsortieren die Ordnungsrelation ¬> (nicht größer) zu verwenden und die Kandidatenliste vom Ende beginnend linear zu durchlaufen. Mit der Prioritätsschlange wird gewährleistet,

dass der bislang minimale bestmögliche Weg zuerst untersucht wird. Im Programmtext 7 werden die Spezifikationen umgesetzt.

Die **Entscheidungsfunktion** *checkPath* hat zu prüfen, ob die Weglänge des neuen Weges nicht länger als die minimale Weglänge ist. Durch Überprüfen der α-Niveaus der Referenzfunktionen L(s) und R(s) wird dies realisiert. Im Programmtext 7 werden die Spezifikationen umgesetzt.

Die **Berechnung von Weglängen** in der Funktion *addLength* erfolgt über die Addition der Werte der α-Niveaus der Weg- und Kantenlängen gemäß der Definition im Kapitel 4.2. Im Programmtext 7 werden die Spezifikationen umgesetzt.

Die **Komplexität** (49) des Mehrwegealgorithmus zur Bestimmung aller minimalen Wege in einem mit Fuzzy-Zahlen bewerteten Graphen läßt sich durch Einsetzen der Komplexitäten der Methoden f(k), *checkPath*, *put* (O(M)) und *get* (O(1)) bestimmen. Die Komplexität der Funktion *checkPath* entspricht der doppelten Anzahl der α-Niveaus, anhand derer die Referenzfunktionen L(s) und R(s) mit den Referenzfunktionen der minimalen Wegelänge verglichen werden.

$$O(N \cdot M \cdot f(k) \cdot [\ 1 + M + O(checkPath)\ ]) \approx O(N \cdot M^2 \cdot f(k)) \qquad \textbf{(49)}$$

Für eine Abschätzung der Komplexität werden in (50) die zuvor bestimmten Grenzwerte der Funktion f(k) innerhalb von (49) eingesetzt.

$$O_{min}(N \cdot M^2) \qquad O_{avg}(N \cdot M^{2,5}) \qquad \textbf{(50)}$$

5.2.6 Gültigkeitsbereich

Entspricht der Netzgraph einem kantenbewerteten Pfeilgraphen, können mit den neuen Mehrwegealgorithmen **alternative Wege** von einem Startknoten zu allen Zielknoten im Graphen berechnet werden. In Abhängigkeit von der Entscheidungsfunktion werden

- ein minimaler Weg,
- alle minimalen Wege,
- einfach beschränkte Wege,
- elementar beschränkte Wege und
- minimale Fuzzy-bewertete Wege

berechnet. Die Lösungsmengen enthalten mit Ausnahme der Menge mit einem minimalen Weg auch Wege mit gleicher Weglänge. Wege mit Zyklen können in der einfach beschränkten Wegemenge enthalten sein.

Die elementar beschränkte Wegemenge setzt voraus, dass die **minimalen Wege** zwischen allen Knoten bekannt sind. Eine Implementation des entwickelten Mehrwegealgorithmus für große Graphen ist aus diesem Grund nur bedingt durchführbar, da entweder entsprechend große Datenstrukturen für das Vorhalten von N^2 Bewertungen der minimalen Wege angelegt werden müssen oder während der Berechnungen entsprechend häufig für lokale Beziehungen ein Minimale-Wege-Algorithmus aufgerufen werden muß.

6. Das integrierte Modal-Split-Modell

Mit dem **integrierten Modal-Split-Modell** wird die Trennung von Verkehrsaufteilung und Verkehrsumlegung aufgehoben. Durch Berücksichtigung multimodaler Wege im Rahmen der Wegesuche und die Verteilung von Fahrten auf alternative Wege wird innerhalb der Verkehrsumlegung implizit die Verkehrsaufteilung bestimmt. Das integrierte Modal-Split-Modell berechnet ausgehend von einer Gesamtverkehrsnachfrage stationäre Knoten- und Streckenbelastungen in einem multimodalen Netz.

Bezogen auf die **Modellarchitektur** (Kernmodell, Prozessormodell, Nutzermodell; Kapitel 1) besteht das integrierte Modal-Split-Modell aus einem Kernmodell und einem korrespondierenden Prozessormodell. Das Kernmodell beinhaltet die Datenstrukturen, mit denen das multimodale Verkehrsnetz beschrieben wird. Im Prozessormodell wird die Verkehrsumlegung durchgeführt.

Das **Kapitel** gliedert sich in verschiedene Unterkapitel. Zu Beginn erfolgt die Beschreibung des Kernmodells. Die Transformation und das Prozessormodell werden in weiteren Kapiteln erläutert. Die Definition von Eingangsgrößen schließt sich in einem weiteren Kapitel an. Es folgt eine Aufstellung der Einflußfaktoren für die Wege- und Verkehrsmittelwahl. Den Abschluss bildet eine Komplexitäts- und Gültigkeitsuntersuchung.

6.1 Das Kernmodell

Das **Kernmodell** baut auf dem in Kapitel 3, multimodale Netzmodellierung, entwickelten Netzmodell auf. Zu den besonderen Anforderungen an das Netzmodell zählen bei einem integrierten Modal-Split-Modell die Bereiche

- gegenseitige Beeinflussung der Verkehrsmittel,
- alternative Wege,
- liniengebundene Verkehrsmittel und Parallelverkehr,
- gebrochener Verkehr und
- die Verkehrsnachfrage.

Im Kapitel 6.1.1 werden die sich gegenseitig beinflußenden Verkehrsmittel in einem multimodalen Verkehrsnetz betrachtet. Besondere Aspekte im Zusammenhang mit alternativen Wegen im multimodalen Verkehrsgeschehen werden im Kapitel 6.1.2 diskutiert. Die spezifischen Eigenschaften des öffentlichen Personenverkehrs werden in den Kapiteln 6.1.3 und 6.1.4 angesprochen. In den Kapiteln 6.1.5 und 6.1.6 wird das Netzmodell auf seine Anwendbarkeit in den Bereichen “gebrochener Verkehr” und “Verkehrsnachfrage” untersucht.

6.1.1 Gegenseitige Beeinflussung der Verkehrsmittel

Das in Kapitel 3 beschriebene multimodale Netzmodell besteht aus Netzobjekten, die mit Funktionen bzw. Attributen bewertet werden können. Eine gegenseitige Beeinflussung der Verkehrsmittel auf Streckenabschnitten ist nicht modelliert worden. Das Netzmodell ist zu erweitern.

Die **Beeinflussung der Verkehrsmittel untereinander** läßt sich durch Bewertungsgrößen realisieren, die für mehrere oder alle Verkehrsmittel auf einer realen Strecke denselben Wert beinhalten. Ein Beispiel ist die Reisezeit für den Kfz-Verkehr und den Linienbusverkehr als abhängige Größe vom Auslastungsgrad der Straße. Die Verkehrsmittel werden bedingt durch die Liniengebundenheit des Linienbusverkehrs über parallele Kanten im Netzmodell abgebildet. Für beide Verkehrsmittel wird die Reisezeit auf einer Straße nahezu identisch sein, da sie auf der Strecke miteinander konkurrieren.

Einen **Lösungsansatz** bietet die objektorientierte Modellierung. Durch die Integration einer Klasse *Attribut* in das Netzmodell können Attribute mit mehreren Netzobjekten (z. B. Knotenpunkt, Haltestelle, Straße) verknüpft werden.

Das im Kapitel *Multimodale Netzmodellierung* (Kap. 3) entwickelte **Klassenmodell** wird um eine Klasse *Attribut* für Attribute erweitert. Zwischen den Klassen der Netzobjekte

- Weiche,
- Schienenweg,
- Haltestelle,
- Knotenpunkt,
- Straße,
- Radwegknoten,
- Radweg,
- Gehwegknoten und
- Gehweg

sowie den Klassen der Verkehrsmittel

- zu Fuß gehen,
- Fahrrad,
- Pkw,
- liniengebundener Personenverkehr und
- nicht liniengebundener Personenverkehr

und der Klasse *Attribut* wird eine 1:n-Aggregation modelliert. Jedes Netzobjekt besteht aus einer Menge von Attributen. Um die gegenseitige Beeinflussung der Verkehrsmittel

abzubilden, muß zusätzlich zwischen der Klasse *Attribut* und den Klassen der Netzobjekte (s.o.) eine 1:n-Assoziation eingeführt werden. Jedes Attribut kann mehreren Netzobjekten zugeordnet werden. Die Abbildung 34 zeigt am Beispiel von einigen Netzobjekten die neu definierte Klasse und deren Beziehungen.

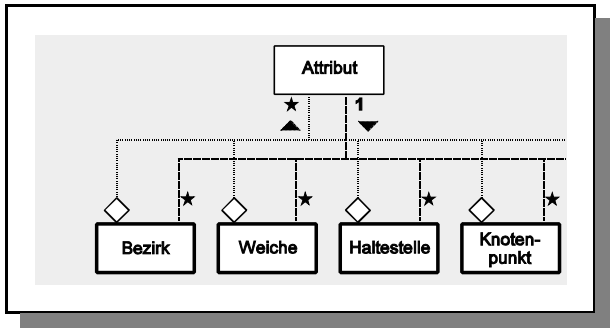

Abbildung 34: Beziehungen der Klasse Attribut

Weitere Modellierungsmöglichkeiten durch die Auslagerung der Attribute in eigenständige Objekte sind die Abbildung von Abhängigkeiten zwischen Knoten und Streckenelementen. Haltezeiten auf einem Knotenpunkt können mit den Verkehrsbelastungen der angeschlossenen Strecken in Beziehung gesetzt werden. Das Modell erhält zusätzlich eine offene Architektur, da die Anzahl und die Art der Attribute eines Netzobjektes nicht begrenzt werden.

Die **Attribute** der einzelnen Elemente dienen innerhalb der Wegesuche als Entscheidungskriterien. Von ihnen hängt die Wahl des jeweils günstigsten Weges und der alternativen Wege ab. Sie werden als statische Größen den Netzobjekten zugeordnet, um die Greedy-Bedingung einzuhalten (lokales Optimum = globales Optimum; Kapitel 5.1). Änderungen von Bewertungen, z. B. belastungsabhängige Reisezeiten, können nur durch ein iteratives Verfahren, bei dem die Wegesuche mehrmals durchgeführt wird, berücksichtigt werden (z. B. Gleichgewichtsverfahren, Kapitel 2.1.3).

6.1.2 Alternative Wege

Bei der Suche von alternativen Wegen in **unimodalen Verkehrsnetzen** kann als einziges Kriterium die Bewertung eines Weges verwendet werden. Es reicht im allgemeinen aus, die k-kürzesten Wege in den weiteren Berechnungen zu berücksichtigen, sofern alle diese Wege als verkehrsplanerisch sinnvolle Wege bezeichnet werden können.

In **multimodalen Verkehrsnetzen** ist die Bewertung von Wegen als Kriterium bei der Suche alternativer Wege nicht ausreichend. Durch die Berücksichtigung der verschiedenen Verkehrsmittel in einem Verkehrsnetz muß gewährleistet werden, dass in der Menge der berechneten Wege die verschiedenen Verkehrsmittel entsprechend berücksichtigt werden. Im Zusammenhang mit einer eingeschränkten Verkehrsmittelverfügbarkeit muß die Lösungsmenge auch Wege enthalten, deren Bewertung schlechter ist als z. B. die der k-kürzesten Wege. Die Anforderung kann mit Hilfe von zwei Vorgaben formuliert werden.

– Für alle Verkehrsmittel, mit denen ein Ziel erreicht werden kann, muß mindestens ein Weg bestimmt werden, auf dem das Ziel mit dem Verkehrsmittel erreicht wird.

– Für alle Verkehrsmittel, mit denen eine Fahrt an einer Quelle beginnen kann, muß mindestens ein Weg gefunden werden, auf dem die Fahrt an der Quelle mit dem Verkehrsmittel begonnen wird.

Aufgrund der Vorgabe eines bewerteten Verkehrsnetzes kann die erste Bedingung zur Gewährleistung der erforderlichen alternativen Wege mit Hilfe entsprechender Bewertungen realisiert werden. Theoretisch mögliche Wege sind nur dann akzeptabel, wenn deren Bewertungen sich in einem spezifischen Wertebereich befinden. Die zweite Vorgabe kann nur mit Hilfe eines geeigneten Wege- bzw. Mehrwegealgorithmus gewährleistet werden. Deshalb sind alle sinnvollen Verkehrsmittelkombinationen bei der Wegesuche durch Berechnen entsprechender Wege zu berücksichtigen.

Tabelle 1: Mögliche Verkehrsmittelkombinationen

1. Verkehrs-mittel	weitere Verkehrsmittel	1. Verkehrs-mittel	weitere Verkehrsmittel
FUSS -	ÖPV ÖPV - FUSS ÖPV - MIV (Taxi) ÖPV - RAD	MIV -	FUSS RAD (Stadtrad) ÖPV ÖPV - MIV (Taxi) ÖPV - FUSS
RAD -	ÖPV ÖPV - FUSS ÖPV - RAD (Stadtrad) ÖPV - MIV (Taxi) FUSS FUSS - ÖPV	ÖPV -	MIV (Taxi) FUSS RAD (Stadtrad)

Sind zwei Verkehrszellen z. B. sowohl mit dem motorisierten Individualverkehr (MIV) als auch mit dem öffentlichen Personenverkehr (ÖPV) erreichbar, so muß der Wegealgorithmus Wege berechnen, auf denen am Beginn des Weges die Verkehrsmittel

MIV und ÖPV benutzt werden. Die sich anhand der Bewertungen ergebenen möglichen **Verkehrsmittelkombinationen** zwischen den Verkehrszellen sind in diesem Beispiel MIV, ÖPV, MIV - ÖPV, ÖPV - MIV (Taxi), MIV - ÖPV - MIV (Taxi) und ÖPV - MIV (Taxi) - ÖPV. Mögliche Kombinationen von Verkehrsmitteln auf Wegen bei der Integration von motorisiertem Individualverkehr (MIV), öffentlichem Personenverkehr (ÖPV) und nicht motorisiertem Individualverkehr (RAD, FUSS) zeigt die Tabelle 1.

Die **Realisierung** der Unterscheidung alternativer Wege im integriertem Modal-Split-Modell erfolgt mit Hilfe des in Kapitel 4 entwickelten Mehrwegealgorithmus. Durch die im Kapitel 6.3.4 beschriebenen Erweiterungen werden die gewünschten alternativen Wege berechnet.

6.1.3 Liniengebundene Verkehrsmittel

Die Klassifizierung der Verkehrsmittel ergab eine Unterteilung in **liniengebundene Verkehrsmittel** und nicht liniengebundene Verkehrsmittel. Liniengebundene Verkehrsmittel, z. B. Linienbusse, fahren auf fest vorgegebenen Strecken. Nicht liniengebundene Verkehrsmittel wählen die Strecken auf ihrem Weg anhand der aktuellen Verkehrssituation und des Ziels der Fahrt.

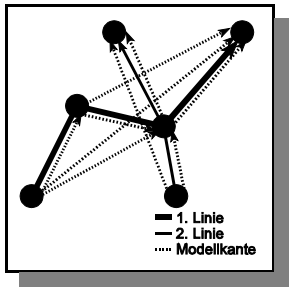

Abbildung 35: Liniengebundene Modellierung: Kanten

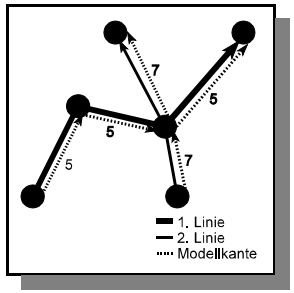

Abbildung 36: Liniengebundene Modellierung: Identifikatoren

Das im Kapitel 3 entwickelte Klassenmodell bietet keine Möglichkeit, liniengebundenen Verkehr sinnvoll abzubilden. **Lösungsansätze** für eine Modellierung liniengebundener Verkehrsmittel sind

– das Erzeugen von Kanten zwischen allen Haltestellen einer Linie, die jeweils alle zwischen den Haltestellen liegenden Teilstrecken einer Linie repräsentieren (Abbildung 35) und

– das Zuordnen eines zusätzlichen Identifikators, der auf jeder Teilstrecke die jeweilige Linie bzw. das Verkehrsmittel beschreibt (Abbildung 36).

Aufgrund der in der Realität vorkommenden parallelen Nutzung von Strecken durch mehrere Verkehrsmittel und deren gegenseitige Beeinflussung ist der Lösungsansatz mit Hilfe von zusätzlichen Strecken bzw. Kanten nicht zweckmäßig, da eine Beziehung zwischen den sich beeinflussenden Strecken im Modell nur sehr schwer hergestellt werden kann. Liniengebundener Verkehr wird in diesem Modell über einen zusätzlichen Identifikator modelliert, welcher im Rahmen von Berechnungen berücksichtigt werden muß. Diese **Realisierung** bietet den Vorteil, dass die parallele Nutzung von Strecken durch verschiedene Verkehrsmittel in Form von parallelen Kanten modelliert werden kann. Auch kann die Zahl der erforderlichen Kanten zum Abbilden eines Verkehrsnetzes im Vergleich zu der Abbildung durch zusätzliche Kanten reduziert werden.

6.1.4 Parallelverkehr

Eine weitere Besonderheit im öffentlichen Personenverkehr ist der **Parallelverkehr**. Verkehren zwischen zwei Haltestellen mehrere Verkehrsmittel oder Linien eines Verkehrsmittels, so entsteht Parallelverkehr. Für den Verkehrsteilnehmer verkürzt sich die Wartezeit an der Einstiegshaltestelle aufgrund der aus seiner Sicht erhöhten Bedienungshäufigkeit. Die Abbildung von Parallelverkehr ist durch Einfügen von zusätzlichen Kanten oder der Verknüpfung von Attributen vorhandener Kanten möglich.

Beim Einführen **zusätzlicher Kanten** sind deren Attribute aus den Attributen der parallelen Kanten abzuleiten. Abhängig von der Bedeutung der Attribute können diese

– direkt (z. B. Länge, Wartezeit anhand von Bedienungshäufigkeiten),
– als Mittelwert (z. B. Plätze) oder
– als Summe (z. B. Bedienungshäufigkeiten)

übernommen werden. Eine Modifikation der Wegealgorithmen ist bei der Verwendung dieses Ansatzes nicht erforderlich.

Bei der **Verteilung** der Fahrten auf die berechneten Wege ist zu gewährleisten, dass sofern die zusätzlichen Kanten Bestandteil eines Weges sind, kein weiterer Weg über die Kanten verläuft, die zur Berechnung der zusätzlichen Kanten herangezogen wurden. Durch eine entsprechende Transformation der Ergebnisse zwischen dem Prozessormodell und dem Kernmodell kann dieses Problem gelöst werden. Durch die Einführung

zusätzlicher Attribute für die Netzattribute ist es möglich, die berechnete Verkehrsbelastung der zusätzlichen Kanten auf die zugrunde gelegten parallelen Kanten zu verteilen. Bei der Verteilung der Belastungswerte auf die einzelnen parallelen Kanten können z. B. die Anteile der Bedienungshäufigkeiten jeder Kante bezogen auf die Gesamtbedienungshäufigkeit in Form von Faktoren berücksichtigt werden.

Ein zweiter Lösungsansatz ist die Definition **zusätzlicher Attribute**. Jede Kante, die im Rahmen von Parallelverkehr berücksichtigt werden soll, wird um entsprechende Attribute ergänzt, die als Verweise auf Attribute paralleler Kanten zeigen. Dadurch kann für jede Kante die verkürzte Wartezeit anhand der für jede Kante bekannten Gesamtbedienungshäufigkeit berechnet werden. Positiver Effekt ist der Verzicht auf die Einführung neuer Kanten, die bei der Wegsuche berücksichtigt werden müssen. Nachteil dieser Variante ist die Modellierung eines Überangebots, da auf jeder Kante die Gesamtbedienungshäufigkeit vorgehalten wird. Auch die Anteile der einzelnen Bedienungshäufigkeiten der parallelen Kanten an der Gesamtbedienungshäufigkeit der Verbindung werden nicht berücksichtigt.

Mit dem Kernmodell des integrierten Modal-Split-Modells ist eine **Realisierung** beider Lösungsansätze möglich. Die Abbildung 37 verdeutlicht noch einmal die oben aufgeführten Lösungsansätze.

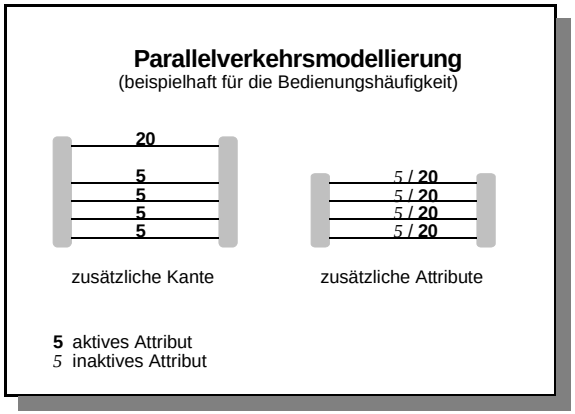

Abbildung 37: Modellierung von Parallelverkehr

6.1.5 Gebrochener Verkehr

Als **gebrochener Verkehr** werden die Fahrten bezeichnet, bei denen mehr als ein Verkehrsmittel zum Erreichen des Ziels der Fahrt benutzt werden. Klassische Formen

des gebrochenen Verkehrs sind Park&Ride und Bike&Ride.

Die **Bestandteile der Fahrt** im gebrochenen Verkehr auf der Ebene der Verkehrswege bestehen neben den Knoten und Strecken der auf der Fahrt verwendeten Verkehrsmittel und aus weiteren Objekten. Diese Objekte sind speziell beim Wechsel der Verkehrsmittel von Bedeutung. Beim Park&Ride-Verkehr ist das zusätzliche Element der Park&Ride-Parkplatz, auf dem der Pkw abgestellt wird.

Das entwickelte **Klassenmodell** wird mit einer neuen Klasse erweitert. Die Klasse *Parkplatz* ist eine Spezialisierung der Basisklasse *Knoten*. Diese Klasse repräsentiert Netzobjekte, die zum Abstellen von Verkehrsmitteln herangezogen werden. Für den Pkw-Verkehr und den Radverkehr sind das Parkplätze, Parkhäuser bzw. Abstellanlagen für Fahrräder. Die Klasse *Parkplatz* wird mit allen Verkehrsmitteln über eine 1:n-Assoziation in Beziehung gesetzt, zwischen denen ein Wechsel stattfinden kann (Abbildung 38). Dazu zählen die Verkehrsmittel

- zu Fuß gehen,
- Fahrrad (Stadtrad),
- Pkw (Taxi, Car-Sharing) und
- liniengebundene und nicht liniengebundene öffentliche Verkehrsmittel.

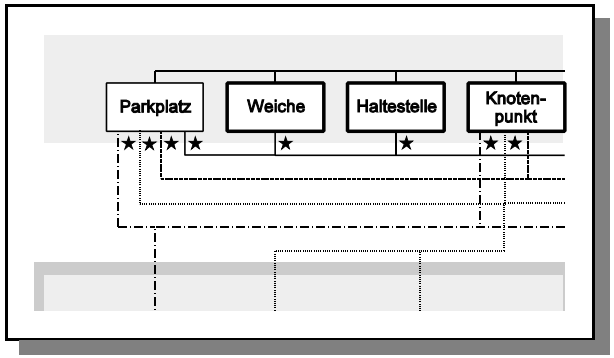

Abbildung 38: Klasse Parkplatz

6.1.6 Verkehrsnachfrage

In Abhängigkeit von der **Aggregation** der Gesamtverkehrsnachfrage kann eine Erweiterung der Netzstrukturen erforderlich sein. Existieren für die in der Verkehrsnachfrage definierten Quellen und Ziele keine entsprechenden Knoten im modellierten Verkehrsnetz, so müssen zusätzliche Punkte in die Netzstruktur integriert werden. Diese

Punkte werden im weiteren Verlauf als Bezirke oder Bezirksknoten bezeichnet.

Die **Bezirksknoten** stellen die Verbindung zwischen der Netzstruktur und der zumeist räumlich strukturierten Verkehrsnachfrage her. Müssen Bezirksknoten eingefügt werden, sind auch Verbindungen in das Netzmodell zu integrieren, die ein Einsteigen in das Verkehrsnetz und das Verlassen des Verkehrsnetzes ermöglichen. Außerdem ist zu gewährleisten, dass die Bezirksknoten im Rahmen einer Wegesuche nur als Start und Ziel eines Weges verwendet werden dürfen.

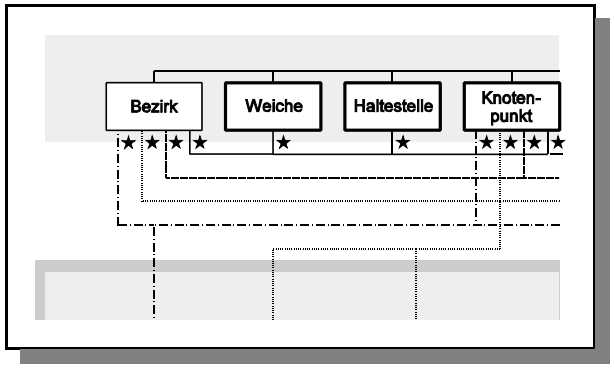

Abbildung 39: Klasse Bezirk

Die Integration von Bezirksknoten in das **Klassenmodell** erfolgt durch die Definition einer zusätzlichen Klasse *Bezirk* als Spezialisierung der Basisklasse *Knoten* (Abbildung 39). Zwischen den Verkehrsmitteln und der Klasse *Bezirk* wird eine 1:n-Assoziation definiert. Die im vorherigen Absatz gestellte Anforderung, dass Bezirksknoten nur am Anfang und am Ende eines Weges auftreten dürfen, wird mit diesem Lösungsansatz nicht erfüllt. Die Bedingung ist durch Lösungen im Rahmen der Berechnungen von Wegen zu überprüfen oder durch die Wahl geeigneter Attribute für die Netzobjekte zu gewährleisten.

6.2 Transformation

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln das Kernmodell des integrierten Modal-Split-Modell beschrieben wurde, erfolgt in diesem Kapitel die **Transformation** der Daten in das korrespondierende Prozessormodell (siehe Kapitel 6.3). Eine Transformation ist notwendig, da das Kernmodell aus den drei Ebenen *Verkehrsaufkommen*, *Verkehrsmittel* und *Verkehrswege* besteht. Das Prozessormodell, dessen Funktion die Anwendung der in Kapitel 5 entwickelten Mehrwegealgorithmen ist, setzt als Basiss-

truktur einen kantenbewerteten Pfeilgraphen voraus. Die Daten des Kernmodells sind in einen kantenbewerteten Pfeilgraphen zu transformieren.

Ein Vergleich zwischen dem Klassenmodell des **Kernmodells** und einem Pfeilgraphen zeigt, dass die Beziehungen zwischen den Basisklassen der Ebene *Verkehrswege* im Kernmodell den Beziehungen in einem Pfeilgraphen entsprechen. Die Mengen der Knoten und Strecken des Kernmodells entsprechen den Mengen der Knoten und Kanten im Pfeilgraphen. Eine Transformation der Verkehrswege in die Struktur eines Pfeilgraphen ist möglich. Eine Transformation der Ebene Verkehrsaufkommen ist nicht notwendig, da diese Informationen für die Wegesuche in multimodalen Verkehrsnetzen nicht von Bedeutung sind. Sie fließen im Rahmen der Verteilung von Fahrten auf die berechneten Wege in Form einer Verkehrsnachfragematrix in das Prozessormodell mit ein. Bei der Transformation der Ebene der Verkehrsmittel ist folgender Aspekt zu beachten.

Im Kernmodell werden die Streckenelemente der Verkehrsnetze, die Verkehrswege, mit den auf ihnen verkehrenden Verkehrsmitteln verknüpft. Durch die unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten werden einigen Streckenelementen mehrere Verkehrsmittel zugeordnet (z. B. Pkw und Fahrrad benutzen Straßen). Die resultierenden verkehrsmittelspezifischen **parallelen Verbindungen** zwischen zwei Knoten im Verkehrsnetz müssen bei der Wegesuche entsprechend berücksichtigt werden (nicht zu Verwechseln mit dem Parallelverkehr im öffentlichen Personenverkehr).

Die erste Möglichkeit zur Lösung dieses Teilproblems ist die Definition von **verkehrsmittelspezifischen Attributen** für jedes Streckenelement. Ein Streckenelement im Verkehrsnetz steht für alle Verkehrsmittel auf dem abzubildenden Verkehrsweg und wird durch eine Kante im Pfeilgraphen repräsentiert. Vorteil dieses Ansatzes ist, dass die Beeinflussung der Verkehrsmittel untereinander auf einem Streckenelement einfach zu modellieren ist. Als ein Nachteil ist zu bewerten, dass Wegealgorithmen nur Wege auf der Basis der Kanten des Graphen berechnen und somit das Bestimmen multimodaler paralleler Wege nicht möglich ist. Die Verkehrsumlegung liefert für jedes Streckenelement einen Ergebniswert. Für ein nachträgliches Aufteilen der Streckenbelastung auf die vorhandenen Verkehrsmittel fehlen die erforderlichen Informationen. Durch die Einschränkung auf einen Ergebniswert je Streckenelement kann jedes Streckenelement nur von einem Verkehrsmittel genutzt werden.

Ein zweiter Lösungsansatz besteht in der Modellierung der parallelen Verbindungen durch **parallele Streckenelemente**. Jedes Streckenelement repräsentiert ein Verkehrsmittel auf dem abzubildenden Verkehrsweg und wird durch eine Kante im Pfeilgraphen dargestellt. Es findet eine Verknüpfung der Verkehrsmittel und der Verkehrswege statt. Der Vorteil dieser Variante ist die uneingeschränkte Modellierung multimodaler Wege, da die Verkehrsumlegung für jede Kante als eine Verkehrsmittel-Verkehrsweg-Kombination Ergebnisse berechnen kann. Parallele Wege mit parallel verkehrenden

Verkehrsmitteln können abgebildet werden. Nachteil dieses Modells ist die Modellierung der sich beeinflussenden Verkehrsmittel, da die Verkehrsmittel auf unabhängigen Streckenelementen modelliert werden.

Die **Entscheidung** für das integrierte Modal-Split-Modell fällt auf den zweiten Lösungsansatz mit der Modellierung paralleler Streckenelemente, da das Einbeziehen aller potentiellen multimodalen Wege innerhalb der Wegesuche eine fundamentale Funktion besitzt. Das Problem der Abhängigkeiten von Verkehrsmitteln auf einem Streckenelement wird durch das erweiterte Klassenmodell (Klasse Attribut) gelöst, mit dem die Bewertungen für jedes Streckenelement auch unter Berücksichtigung anderer Streckenelemente ermittelt werden können.

Werden die in diesem Modell betrachteten Verkehrsmittel verglichen, so zeigt der **öffentliche Personenverkehr** eine Besonderheit. Bevor mit einem Bus oder einem Zug gefahren werden kann, tritt vor dem Einsteigen im Mittel eine Wartezeit auf, die erst in die Berechnung eingehen darf, wenn der Knoten bzw. die Haltestelle wieder verlassen wird. Für das Integrieren von Wartezeiten im öffentlichen Personenverkehr in auf der Graphentheorie aufbauende Wegealgorithmen existieren mehrere Lösungsansätze. Wird das Verkehrsnetz als kantenorientierter Graph modelliert, gehen die Wartezeiten als Attribute von Umsteigebeziehungen an Haltestellen in die Berechnungen ein. Eine Alternative besteht in der Modellierung eines knotenorientierten Graphen, bei dem entweder die Knoten differenziert aufgelöst oder die Berechnungsalgorithmen erweitert werden müssen. Alle drei Lösungsansätze werden in den folgenden Kapiteln diskutiert.

6.2.1 Der kantenorientierte Graph

Der **kantenorientierte Graph** erhält seinen Namen aufgrund der Objekte, welche durch die Knoten im Graphen abgebildet werden. In einem kantenorientierten Graphen werden mit den Knoten des Graphen streckenartige Objekte modelliert. Innerhalb der Verkehrsplanung werden die Straßen, Gleise, Radwege, Gehwege und Linienabschnitte als Knoten im Graphen definiert. Die Umsteigebeziehungen an den Haltestellen und die Abbiegebeziehungen an den Knotenpunkten, Radwegknoten, Weichen und Gehwegknoten bilden die Kanten des Graphen. Dieses Modell wird auch als Kantenmodell bezeichnet.

Bei der Transformation der **Bewertungen** müssen die im Verkehrsnetz vorhandenen Attribute mit einer Bewertungsfunktion zu einer Gesamtbewertung für jedes Netzobjekt zusammengeführt werden. Die Bewertungen infolge der verschiedenen Aktionen (Fahren, Einsteigen, Aussteigen, Überfahren, siehe Kapitel 6.5.6) können den jeweiligen Kanten im Graphen zugeordnet werden. Einige Beispiele werden in den Abbildungen 49 und 52 im Anhang gezeigt. Jede Kante im Graphen erhält genau einen Bewertungswert, auf dessen Basis die Wegesuche durchgeführt wird. Die Bewertungsgrößen der

Kanten des Graphen hängen von der Modellierung einer Umsteigebeziehung bzw. Abbiegebeziehung oder des Überfahrens eines Verkehrsknotens ab. Die Bewertungen der Aktionen *"Fahren", "Einsteigen"* und *"Aussteigen"* werden bei Umsteige- bzw. Abbiegebeziehungen und die Bewertung der Aktionen *"Fahren"* und *"Überfahren"* beim Überfahren von Knoten übernommen.

Wird der öffentliche Personenverkehr betrachtet, so fallen gerade an zentralen Umsteigehaltestellen die Vielzahl der möglichen **Umsteigebeziehungen** auf. Auch das Umsteigen in die Rückrichtung ist theoretisch zulässig. Im Rahmen von Optimierungen wurde untersucht, inwieweit Restriktionen im Rahmen der möglichen Umsteigevorgänge sich auf den Umfang des Netzes und die Berechnungsergebnisse auswirken. In mehreren Teilschritten wurden Umsteigebeziehungen bei der Transformation nicht mehr berücksichtigt und die Berechnungsergebnisse mit Hilfe des Anfangszustands kontrolliert. Durch die durchgeführten Optimierungen konnte die Zahl der zulässigen Umsteigemöglichkeiten auf 50% der theoretisch möglichen Umsteigebeziehungen reduziert werden. Im Rahmen der Optimierungen wurde das Umsteigen in die Rückrichtung und das Umsteigen in die Rückrichtung eines anderen Verkehrsmittels unterdrückt (Abbildung 40).

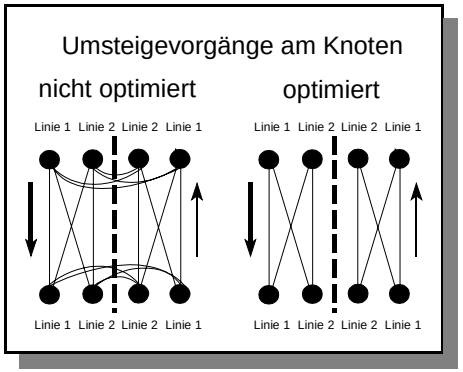

Abbildung 40: Mögliche Umsteigevorgänge bei zwei Linien

Die **Transformation** wird in drei Teilschritte unterteilt: Der erste Teilschritt besteht aus dem Erzeugen der Knoten des Graphen anhand der vorhandenen Strecken im Verkehrsnetz. Danach werden für die Umsteigebeziehungen an den Haltestellen und die Abbiegemöglichkeiten an den Knoten im Verkehrsnetz Kanten im Graphen definiert. Der dritte Teilschritt ist optional und hängt von der Aggregation der Verkehrsnachfrage ab. Bei der Transformation des Kantenmodells ist zu beachten, dass die Verkehrsnachfrage auf der Basis von Knoten vorliegt. Dieser Umstand hat zur Folge, dass sämtliche Quell- und Zielknoten im Kantenmodell in einem dritten Teilschritt als zusätzliche

Knoten abgebildet werden müssen. Zwischen diesen Matrixknoten im Graphen und den Knoten des Graphen sind Verbindungen zu definieren, damit der Zugang zum Netz und das Verlassen des Netzes ermöglicht wird.

6.2.2 Der knotenorientierte Graph

Der **knotenorientierte Graph** erhält seinen Namen durch die Funktion der Knoten des Graphen bei der Abbildung von Netzen. Werden die Knoten bzw. punktartigen Objekte einer Netzstruktur durch die Knoten des Graphen repräsentiert, so entsteht ein knotenorientierter Graph. Die Beziehungen zwischen den Knoten, die Verbindungen der zu modellierenden Netzstruktur, werden mit der Relation zwischen den Knoten des Graphen, den Kanten, abgebildet. Im Rahmen des integrierten Modal-Split-Modells werden bei der Verwendung eines knotenorientierten Graphen die Haltestellen, Weichen, Gehwegknoten, Radwegknoten und Knotenpunkte mit Hilfe der Knoten des Graphen modelliert. Die Relation des Graphen wird mit den Straßen, Gleisen, Linienabschnitten, Rad- und Gehwegen aufgebaut. Dieses Datenmodell wird auch als Knotenmodell bezeichnet.

Wie auch beim kantenorientierten Graphen sind bei der Transformation die **Bewertungen** der im Verkehrsnetz vorhandenen Attribute mit einer Bewertungsfunktion in Gesamtbewertungen für jedes Netzobjekt zu aggregieren. Probleme bei der Transformation der Bewertungen eines multimodalen Verkehrsnetzes in einen knotenorientierten kantenbewerteten Pfeilgraphen bereiten die Umsteigebeziehungen im öffentlichen Personenverkehr. Die bei jedem Umsteigevorgang auftretende Wartezeit vor dem Einsteigen in das nächste Verkehrsmittel ist einer Kante zuzuordnen und auch nur dann, wenn tatsächlich ein Umsteigevorgang stattfindet. Aufgrund der in diesem Modellansatz in einem Knoten zusammengefaßten Umsteigebeziehungen ist der Umsteigevorgang erst zu erkennen, wenn im Graphen die nächste entsprechende Kante untersucht wird. Um alle Bewertungsattribute der Verkehrsmittel in einen knotenorientierten Graphen abzubilden, sind Bewertungsgruppen zu definieren oder die Knoten des Verkehrsnetzes differenziert aufzulösen.

Eine Möglichkeit zur Modellierung der Umsteigebeziehungen in einem knotenorientierten Graphen ist die Verlagerung der Problematik in den Wegealgorithmus. Durch Bilden von **Bewertungsgruppen** werden alle relevanten Attribute dem Graphen übergeben. Die Wegealgorithmen sind zu modifizieren, damit sie die definierten Bewertungsgruppen entsprechend berücksichtigen (siehe Kapitel 6.3.3). Der knotenorientierte Graph mit integrierten Bewertungsgruppen wird im weiteren Verlauf als **einfaches Knotenmodell** bezeichnet.

Eine alternative Abbildung der Umsteigevorgänge an Knoten ist das **Auflösen von Knoten** in verkehrsmittelspezifische Knoten, zwischen denen die Umsteigebeziehungen

als Kanten abgebildet werden. Jeder Umsteigebeziehung kann neben einem Fußweg auch die Wartezeit bis zum Einsteigen in das nächste Verkehrsmittel zugeordnet werden. Wegealgorithmen sind in diesem Fall nicht zu modifizieren. Bei den weiteren Betrachtungen wird diese Variante als das **erweiterte Knotenmodell** bezeichnet.

Die **Transformation** besteht in der Übertragung der Haltestellen und Knotenpunkte auf die Knoten des Graphen und dem Aufbau der Relation zwischen den Knoten mit Hilfe der Straßen, Linienabschnitte, Rad- und Gehwege.

6.2.3 Beurteilung

Die Abbildung 41 zeigt eine **Gegenüberstellung** eines einfachen Knotenmodells und eines Kantenmodells. Weitere Beispiele für die Modellierung von Fahrten im Verkehr mit einem knotenorientierten Graphen (einfaches Knotenmodell) und einem kantenorientierten Graphen (Kantenmodell) befinden sich im Anhang (Abbildung 48 - 53).

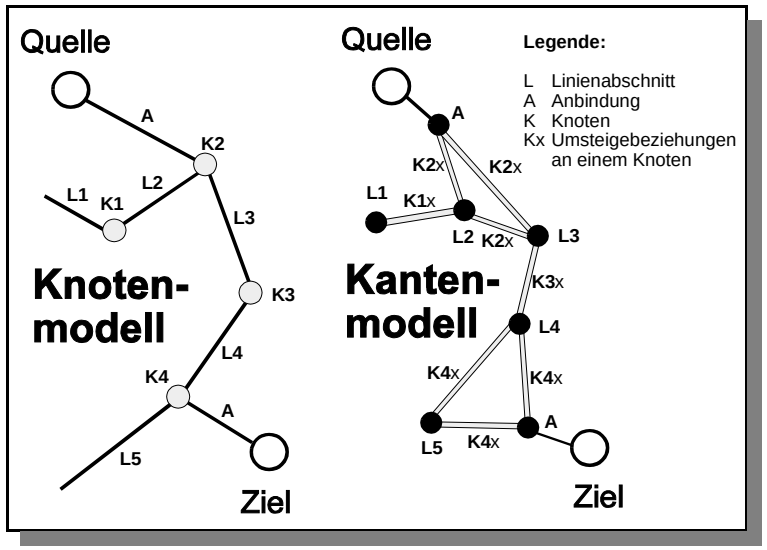

Abbildung 41: Knoten-/Kantenmodell: Gegenüberstellung

Das einfache Knotenmodell unterscheidet sich vom Kantenmodell sowie vom erweiterten Knotenmodell im wesentlichen durch die Anzahl der Elemente. Durch die Vielzahl an möglichen **Umsteigebeziehungen** im öffentlichen Personenverkehr und Abbiegebeziehungen im Straßen-, Fußgänger- und Radverkehr steigt die Anzahl der Kanten in Abhängigkeit der Anzahl der Knoten N in beiden Modellen um den Faktor N^b

mit $b \leq 2$. Die Anzahl der Kanten im erweiterten Knotenmodell ist dabei doppelt so hoch wie die Anzahl der Kanten im Kantenmodell. Auch wenn durch die in Kapitel 6.2.1 durchgeführten Optimierungen die Menge der Kanten im Kantenmodell und im erweiterten Knotenmodell reduziert werden konnte, bleibt das Verhältnis der Anzahl der Kanten zum einfachen Knotenmodell bestehen. Abbildung 42 zeigt eine Gegenüberstellung der Anzahl der Knoten und Kanten des einfachen Knotenmodells und des Kantenmodells im Untersuchungsraum Erfurt.

Als positiv ist zu bewerten, dass sowohl das Kantenmodell als auch das erweiterte Knotenmodell mit einem **Bewertungswert** für jedes Element auskommen, während im einfachen Knotenmodell der Wegealgorithmus für den öffentlichen Personenverkehr erweitert werden muß. Gegen das Kantenmodell und das erweiterte Knotenmodell spricht die hohe Anforderung von **Speicherplatz**, die in direktem Zusammenhang mit der Zahl der Elemente im Graphen steht. Die **Rechenzeiten** hängen stark von der Dichte des zugrunde gelegten Graphen ab. Werden Netze des öffentlichen Personenverkehrs untersucht, die aus einer Vielzahl paralleler Verbindungen bestehen, sind die Rechenzeiten des Kantenmodells sowie des erweiterten Knotenmodells höher. Für Straßennetze kann festgestellt werden, dass das Kantenmodell schneller Ergebnisse liefert als das einfache Knotenmodell. Der Zeitaufwand für die Transformation des Verkehrsnetzes in den Graphen liegt beim Kantenmodell wesentlich höher.

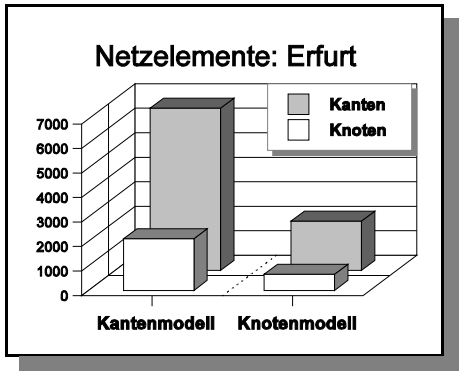

Abbildung 42: Knotenmodell/Kantenmodell: Vergleich der Anzahl der Knoten und Kanten

Zusammenfassend läßt sich feststellen, dass alle Modelle bei der Suche von minimalen Wegen identische Ergebnisse liefern. Während das Kantenmodell und das erweiterte Knotenmodell erhöhte Speicherplatzanforderungen stellen, muß für das einfache Knotenmodell der Wegealgorithmus um Bewertungsgruppen erweitert werden. Die Rechenzeiten hängen stark von der Anzahl paralleler Kanten im Graphen ab. Eine

Gegenüberstellung von Fahrten im motorisierten Individualverkehr und öffentlichen Personenverkehr und deren Abbildung in einem kantenorientierten Graphen und einem knotenorientierten Graphen befindet sich im Anhang (Abbildung 48 - 53).

6.3 Prozessormodell

Die **Aufgabe** des Prozessormodells im integrierten Modal-Split-Modell ist die Durchführung einer Verkehrsumlegung. Diese besteht aus der Berechnung von alternativen Wegen zwischen zwei Knoten in einem multimodalen Verkehrnetz und der Verteilung von Fahrten einer vorgegebenen Verkehrsnachfragematrix auf die gefundenen Wege.

Grundlage der Berechnung von alternativen Wegen sind die in Kapitel 4 entwickelte elementar beschränkte Wegemenge und die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge. Die Bereitstellung der Netzstrukturen erfolgt über die im vorherigen Kapitel beschriebenen Transformationen.

Die Suche der alternativen Wege in einem multimodalen Verkehrsnetz bildet das Kernstück des integrierten Modal-Split-Modells. Mit den in Kapitel 5 entwickelten **Mehrwegealgorithmen** werden von einem Knoten alternative Wege zu allen anderen Knoten in einem Graphen bestimmt. Dabei werden nicht die k-kürzesten Wege berechnet, sondern alternative Wege, die sich in ihrer Bewertung vom kürzesten Weg unterscheiden. Die Mehrwegealgorithmen setzen bewertete Kanten in einem Graphen voraus. Die Berechnung der Bewertung für die Kanten des Graphen erfolgt anhand der in Kapitel 6.3.1 entwickelten Bewertungsfunktion.

Sind die Wege berechnet worden, werden in einem zweiten Schritt die vorhandenen Fahrten der Verkehrsnachfrage auf die berechneten Wege verteilt. Für die **Verteilung** der Fahrten auf eine oder mehrere alternative Wege stehen verschiedene Verteilungsfunktionen aus der Literatur zur Verfügung. Dazu gehören die Verteilungsfunktionen

- Verteilung nach Kirchhoff,
- Logit-Verteilung,
- Verteilung nach Kirchhoff-Logit,
- 4:1-Verteilung und
- Verteilung nach DIAL.

Während für die Verteilung nach DIAL nur eine Minimale-Wege-Suche durchgeführt werden muß, setzen die anderen Verteilungsfunktionen alternative Wege voraus.

Nach der Entwicklung einer Bewertungsfunktion für die Transformation der Bewertungen des Kernmodells in das Prozessormodell werden der kantenorientierte Graph und der knotenorientierte Graph in bezug auf die Funktion des Prozessormodells

untersucht. Weiterhin wird in diesem **Kapitel** die Umsetzung der in Kapitel 5 entwickelten Mehrwegealgorithmen erläutert. Den Abschluss bildet eine Bewertung der Verteilungsfunktionen unter dem Gesichtspunkt der integrierten Verkehrsaufteilung.

6.3.1 Bewertungsfunktionen

Die Kriterien bei der Wegesuche in den **existierenden Berechnungsmodellen** basieren im wesentlichen auf dem Kriterium Reisezeit, welches in einigen Fällen mit den Kosten eines Weges ergänzt wird. Sollen weitere Kenngrößen in den Wegealgorithmus einbezogen werden, so müssen sie in eine der vorhandenen Einheiten umgerechnet werden.

Das **Modell** in dieser Arbeit versucht einen anderen Ansatz. Für die Berechnung der Wege wird eine Bewertungsgröße herangezogen, die sich aus Kenngrößen beliebiger Einheiten zusammensetzt. Dieser Modellansatz ist wichtig, da durch den objektorientierten Modellaufbau nicht zwingend erforderlich ist, dass alle Netzobjekte die gleichen Eigenschaften besitzen, die für eine Wegesuche herangezogen werden. Der Ansatz, Netzobjekten eine flexible Bewertungsstruktur zuzuordnen, hat den Vorteil, dass für jedes Netzobjekt nur die relevanten Bewertungskriterien definiert werden müssen. Während für einen Linienabschnitt die Bedienungshäufigkeit ein wichtiges Kriterium ist, ist der gleiche Wert für eine Straße nicht relevant.

Bei der Verwendung unterschiedlichster Attribute aus der Realität ist darauf zu achten, dass die Dimensionen der Attribute nicht vermischt werden. Aus diesem Grund werden die einzelnen Attribute normiert. Durch den Vorgang der **Normierung** werden alle Attribute zu dimensionslosen Größen, die innerhalb der Berechnungen ohne Einschränkungen einsetzbar sind. In Abhängigkeit eines maximalen Referenzwertes w_{max} und dem absoluten Wert w wird der normierte Werte w_n nach (51) bestimmt.

$$w_n = \frac{w}{w_{max}} \qquad \textbf{(51)}$$

Das Minimum des Wertebereiches der normierten Werte muß der Wert Null sein, um zu gewährleisten, dass für alle Attribute, deren Wert größer Null ist, auch ein normierter Wert größer Null zugeordnet wird und keine negativen normierten Werte entstehen.

Die fehlende Beschränkung auf spezifische Einheiten hat den **Vorteil**, dass schwierige Umrechnungen entfallen können. Auch erhält das Modell eine offene Architektur, da die Art und der Umfang der Kenngrößen, die für eine Bewertung herangezogen werden sollen, vom Anwender festgelegt werden können. Durch die variable Gestaltung der Bewertungen der Netzobjekte können für die jeweilige Problemstellung die relevanten Parameter ausgewählt werden.

Der **Nachteil** dieser Methode ist die Aussagekraft der Bewertungsgröße. Durch die Vermischung unterschiedlichster Einheiten und die Normierung lassen sich die Einflüsse der einzelnen Werte auf die Bewertungsgröße nicht mehr ableiten. In Abhängigkeit von der Anzahl der gewählten Kenngrößen, auf welche die Bewertung aufbaut, wird die Bewertungsgröße zu einer abstrakten Zahl, die sich nicht oder nur sehr schwer beschreiben läßt.

Die in dieser Arbeit entwickelten Mehrwegealgorithmen bauen auf einem kantenbewerteten Pfeilgraphen als Datenstruktur auf. Die Bewertungen der Kanten des Graphen bestehen aus einer positiven Kenngröße. Da in Verkehrsnetzen die Netzobjekte vielschichtige Attribute besitzen, ist eine **Bewertungsfunktion** zu entwickeln, mit der die Bewertungsgrößen der Netzobjekte in einen Bewertungswert für die Kanten im Pfeilgraphen umgerechnet werden. Aufgrund der Definition von Wegen in Kapitel 4 wird für die Berechnung der abstrakten Bewertungsgröße, der Gesamtbewertung eines Netzobjekts, die Addition verwendet.

Bei Verwendung der **Addition** (52) werden alle normierten Kenngrößen w_n der Attribute eines Elements zu einer Gesamtkenngröße $w_{n,Gesamt}$ addiert.

$$w_{n,Gesamt} = \sum_i w_{n,i} \qquad \textbf{(52)}$$

Negativer Nebeneffekt dieses Ansatzes ist, dass der Einfluß der einzelnen Kenngrößen proportional zu deren absoluten Werten ist. Dieser Ansatz reagiert empfindlich, sofern die normierten Werte der Attribute stark differieren. Kleine Werte verlieren ihren Einfluß. Fehlende Attribute für ein Element gehen implizit mit dem Summanden 0.0 in die Bewertung eines Elements ein.

Um die unterschiedlichen Größenordnungen der Attribute zu relativieren, sind die verschiedenen Größen so zu normieren, dass deren normierte Werte sich in demselben Wertebereich befinden. Die **Normierung** der Attribute erfolgt in mehreren Teilschritten (Tabelle 2). Für ein Attribut wird der maximale Wert definiert, so dass sich als Mittelwert der normierten Werte eine vorgegebene Größe ergibt (Tabelle 2, 1. Schritt). Nach der Wahl des Attributs wird für alle Attribute derselben Einheit der gleiche Grenzwert festgelegt (Tabelle 2, 2. Schritt). Der nächste Teilschritt besteht aus der Wahl eines Attributs einer anderen Einheit und der Anpassung dessen normierter Werte (Tabelle 2, 3. Schritt). Ein Kriterium für die Anpassung ist das arithmetische Mittel aller normierten Werte des Attributs. Sind die Mittelwerte des zuerst gewählten und des aktuellen Attributs gleich, werden für alle Attribute derselben Einheit des zuletzt gewählten Attributs die Grenzwerte angepaßt (Tabelle 2, 4. Schritt). Dieser Vorgang wiederholt sich für alle Einheiten und Attribute, die innerhalb der Wegesuche berücksichtigt werden sollen. Die Tabelle 2 zeigt den Ablauf der Normierung von zwei Attributen mit zwei unterschiedlichen Einheiten. Dieses Verfahren der Normierung gewährleistet, dass die Einflüsse von Attributen unterschiedlicher Einheiten bei der Wegesuche unabhängig

von ihren absoluten Werten zueinander sind und die Attribute gleicher Einheiten gemäß ihren absoluten Werten berücksichtigt werden. Es wird implizit eine Gewichtung der normierten Attribute durchgeführt.

Tabelle 2: Normieren von Attributen: Vorgehensweise

	Attribut	Min.	Max.		normierter Mitterwert
1. Schritt:	*Setzen des Definitionsbereiches für ein Attribut*				
	Reisezeit [s]	0	**3600**	←	0,50
	Wartezeit [s]	0	99999999		-1
	Kosten [DM]	0	99999999		-1
	Fahrschein [DM]	0	99999999		-1
2. Schritt:	*Anpassen der Attribute gleicher Einheit*				
	Reisezeit [s]	0	3600		0,50
	Wartezeit [s]	0	**3600**	→	**0,67**
	Kosten [DM]	0	99999999		-1
	Fahrschein [DM]	0	99999999		-1
3. Schritt:	*Anpassen eines Attributs einer anderen Einheit*				
	Reisezeit [s]	0	3600		0,50
	Wartezeit [s]	0	3600		0,67
	Kosten [DM]	0	**35,5**	←	**0,50**
	Fahrschein [DM]	0	99999999		-1
4. Schritt:	*Setzen des Definitionsbereiches für ein Attribut*				
	Reisezeit [s]	0	3600		0,50
	Wartezeit [s]	0	3600		0,67
	Kosten [DM]	0	35,5		0,50
	Fahrschein [DM]	0	**35,5**	→	**1,23**

6.3.2 Der kantenorientierte Graph

Bei der Verwendung eines kantenorientierten Graphen können die in Kapitel 5 beschriebenen Wegealgorithmen und die neu entwickelten Mehrwegealgorithmen ohne Modifikationen für die **Wegesuche** in einem multimodalen Verkehrsnetz angewendet werden.

Durch die differenzierte Modellierung der Vorgänge innerhalb eines Knotenpunktes bzw. einer Haltestelle (Abbiegevorgänge, Umsteigevorgänge) ist die Abbildung der **Bewertungen** der Netzobjekte des Verkehrsnetzes auf einen kantenbewerteten Pfeilgraphen möglich. Auf die Bewertung von Knoten kann verzichtet werden.

6.3.3 Der knotenorientierte Graph

Bei der Anwendung des erweiterten Knotenmodells sind die in Kapitel 5 beschriebenen

Weg- und Mehrwegealgorithmen ohne Einschränkungen einsetzbar. Wird ein knotenorientierter Graph in Form eines einfachen Knotenmodells (siehe 6.2.2) als Datenbasis der Wegealgorithmen verwendet, so werden die Vorgänge innerhalb der Knoten nicht bei der **Wegesuche** berücksichtigt.

Wird eine Fahrt mit dem **öffentlichen Personenverkehr** betrachtet, so sind die Wartezeiten an den Haltestellen bei Umsteigevorgängen von großer Bedeutung für die Berechnung der Reisezeit. Da die Wartezeit nur in spezifischen Situationen an Knoten auftritt, können die Anteile der Wartezeiten nicht uneingeschränkt in die Bewertung der Kanten integriert werden. Es sind Bewertungsgruppen zu definieren. Abweichend von den Definitionen des Pfeilgraphen in Kapitel 5 sind die Kanten mit einer den Bewertungsgruppen entsprechenden Menge von Bewertungsfunktionen zu erweitern. Jede Bewertungsfunktion liefert für jede Kante die Bewertung der Kante für eine Bewertungsgruppe.

An einem Knoten treten im Zusammenhang mit den unterschiedlichen Verkehrsmitteln zwei Situationen ein. Es besteht die Möglichkeit, dass Verkehrsmittel zu wechseln (Umsteigen) oder das bisherige Verkehrsmittel weiter zu benutzen (Durchfahren, “Sitzen bleiben”). In diesem Zusammenhang werden die Attribute der Netzobjekte einer der vier **Bewertungsgruppen** *"immer"*, *"vor Wechsel"*, *"nach Wechsel"* und *"kein Wechsel"* zugeordnet. Die Definition der Bewertungsgruppen ermöglicht es, im Rahmen von Umsteigevorgängen nur die relevanten Parameter bei der Wegesuche zu berücksichtigen. Für die Berechnung der Bewertung zum Erreichen des Endknotens b einer vom Knoten a wegführenden Kante k(a,b) werden Bewertungen der zuführenden Kante k(x,a) und der wegführenden Kante k(a,b) betrachtet (Abbildung 43).

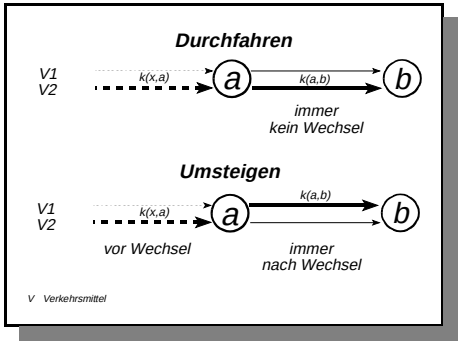

Abbildung 43: Anteile der Bewertung

Wird das Verkehrsmittel nicht gewechselt (Durchfahren, “Sitzen bleiben”), so werden in der Berechnung der Weglänge zum Knoten b die Attribute des Typs “immer” und “kein Wechsel” der Kante k(a,b) berücksichtigt. Bei einem Umsteigevorgang, d.h. am

Knoten a wird das Verkehrsmittel gewechselt, gehen die Attribute des Typs “vor Wechsel” der Kante k(x,a) und die Attribute des Typs “immer” und “nach Wechsel” der Kante k(a,b) in die Berechnung der Weglänge zum Knoten b ein.

Die **Wegealgorithmen** sind bei der Verwendung dieser differenzierten Bewertungsgrößen zu erweitern. Die Erweiterung betrifft die Berechnung der Bewertung bei der Untersuchung von Nachbarknoten bzw. Kandidaten. Während bei der klassischen Berechnung lediglich die Bewertung der Kante zum Erreichen des Nachbarknotens zu der bisherigen Weglänge addiert wird, muß jetzt die Bewertung der vorletzten Kante des bisher bestimmten Weges bei der Prüfung eines Kandidaten mit einbezogen werden (Abbildung 43).

Einschränkungen bei der Berechnung der Bewertung existieren am Ziel einer Fahrt. Ein Wechsel des zuletzt benutzen Verkehrsmittel auf das Verkehrsmittel nach dem Ziel, welches nicht existiert, kann nicht modelliert werden. Bei der Berechnung der Bewertung des Weges zu einem Nachbarknoten ist nicht bekannt, ob dieser Knoten ein Knoten auf dem aktuellen Weg oder das Ziel des aktuellen Wege ist. Daraus folgt für das letzte Teilstück eines Weges, dass die Bewertungsgruppe *“vor Wechsel”* nicht berücksichtigt werden kann. Die Abbildung des Wechsels des nicht existenten Verkehrsmittels vor dem Start auf das erste Verkehrsmittel der Fahrt ist möglich. Aufgrund der Erwartungskonformität bei der Beschreibung der Einflußbereiche der einzelnen Bewertungsgruppen erscheint die Berücksichtigung dieser Situation nicht sinnvoll. Die Bewertungsgruppe *“nach Wechsel”* auf dem ersten Teilstück eines Weges bleibt unberücksichtigt.

6.3.4 Der erweiterte generelle Mehrwegealgorithmus

Der generelle **Mehrwegealgorithmus** berechnet die Wege unter Berücksichtigung der Bewertung der Wege. Die in Kapitel 5 beschrieben Spezifikationen des generellen Mehrwegealgorithmus setzen voraus, dass die Bewertungen aller Wege, die in der Wegemenge enthalten sein sollen, sich im Bereich der Bewertung des minimalen Weges befinden. Für das Berechnen alternativer Wege in unimodalen Verkehrsnetzen erfüllt der generelle Mehrwegealgorithmus die geforderten Kriterien in bezug auf alternative Wege. Im Rahmen von multimodalen Verkehrsnetzen ist der Algorithmus nur bedingt anwendbar. Eine Charakteristik multimodaler Verkehrsnetze ist die Existenz beziehungsbezogener verkehrsmittelspezifischer Bewertungsklassen.

Voraussetzung für die Berechnung der **Verkehrsaufteilung** in einem multimodalen Netz ist die Gewährleistung, dass auch für alle möglichen Verkehrsmittel und Verkehrsmittelkombinationen Wege im Verkehrsnetz gefunden werden. Für die Begrenzung möglicher alternativer Wege ist eine maximale Bewertung sinnvoll. Eine Verknüpfung der alternativen Wege mit dem minimalen Weg ist ohne weitere Modifikationen nicht

sinnvoll.

Die beziehungsbezogenen verkehrsmittelspezifischen **Bewertungsklassen** haben ihren Ursprung in den verkehrsmittelbedingten Grundbewertungen, wie z. B. der Reisezeit bzw. der Geschwindigkeit. Werden als Ausschnitt der öffentliche Personenverkehr und der motorisierte Individualverkehr betrachtet, so sind die gefahrenen Geschwindigkeiten im motorisierten Individualverkehr im Mittel höher als die des öffentlichen Personenverkehrs. Mit den auf einem kantenbewerteten Pfeilgraphen aufbauenden Mehrwegealgorithmen kann in diesem Ausschnitt nicht gewährleistet werden, dass der öffentliche Personenverkehr auf allen Beziehungen berücksichtigt wird, zwischen denen Wege mit dem öffentlichen Personenverkehr möglich sind.

Lösungsansätze für das Problem sind die Modifikation der Bewertungen der Kanten des Graphen oder die Entwicklung eines erweiterten Mehrwegealgorithmus.

Bei der **Modifikation der Bewertungen** werden die Kantenbewertungen bei der Transformation der Bewertungen der Netzobjekte verkehrsmittelspezifisch normiert. Ein Vorteil ist bei diesem Ansatz, dass die Mehrwegealgorithmen unverändert verwendet werden können. Der Nachteil dieser Methode liegt in ihrer Anwendbarkeit. Um eine Normierung vorzunehmen, müssen Berechnungsergebnisse bereits vorhanden sein, um die verkehrsmittelspezifische Gewichtung der verkehrsmittelspezifischen Bewertungen festzulegen. Existieren keine Ergebnisse, sind die Gewichte auf andere Art und Weise festzulegen, so dass Fehler in die Berechnungen einfließen, die nur schwer abgeschätzt werden können. Durch eine weitere Normierung verlieren die Bewertungen weiter an Transparenz.

Für eine Lösung der Problematik der verkehrsmittelspezifischen Bewertungsklassen ist der generelle Mehrwegealgorithmus zu modifizieren. Beim generellen Mehrwegealgorithmus werden die berechneten alternativen Wege über die Definition der Tupel den Knoten zugeordnet. Im **erweiterten generellen Mehrwegealgorithmus** werden die berechneten alternativen Wege über die Definition der Tupel den jeweils zum Knoten hinführenden Kanten zugeordnet. Die Kanten erhalten anstelle der Knoten die Eigenschaften *paths* und *paths.count* (siehe Kapitel 5.2.1). Analog werden die Zugriffe auf Knoten in der in den Kapiteln 5.2.2f definierten Spezifikationen der Funktion *checkPath* auf die Zugriffe auf Kanten umgestellt. Das Problem der verkehrsmittelspezifischen Bewertungsklassen wird mit diesem erweiterten Algorithmus gelöst, da über jede Kante zu einem Knoten mindestens ein Weg bestimmt wird.

Um den Rechenaufwand zu beschleunigen, ist eine **vereinfachte Entscheidungsfunktion** integriert worden. Die Formulierung der vereinfachten Entscheidungsfunktion baut auf der Kontrolle der Tupel in der Kandidatenliste auf. In Abhängigkeit einer maximalen Anzahl von Wegen werden zu jedem Knoten im generellen Mehrwegealgorithmus bzw. zu jeder Kante im erweiterten generellen Mehrwegealgorithmus m Tupel

als Kandidaten in die Kandidatenliste aufgenommen. Bereits eingetragene aber noch nicht bearbeitete Kandidaten werden durch Kandidaten mit einer besseren Bewertung ersetzt. Der so modifizierte generelle Mehrwegealgorithmus berechnet zu jedem Knoten m Wege, in denen der minimale Weg enthalten ist. Die alternativen Wege unterscheiden sich um mindestens ein Element vom minimalen Weg. Gleichlange Wege werden gefunden. Durch die Angabe des Grenzwertes m werden unter Umständen nur die zufällig m ersten gleichlangen Wege im weiteren Verlauf berücksichtigt. Der Programmtext 7 zeigt die vereinfachte Entscheidungsfunktion.

Bezogen auf den vorgestellten Berechnungsalgorithmus ist für die Integration der vereinfachten Entscheidungsfunktion die **Klasse der Kandidatenliste** *listofcandidate* zu erweitern. Mit der Methode *countofcandidate(path)* wird die Anzahl von Tupeln in der Kandidatenliste bestimmt, deren Weg mit derselben Kante endet wie der des Parameters *path*. Die Weglänge des am schlechtesten bewerteten Tupels, welches mit derselben Kante endet wie der Weg des Parameters *path*, liefert die Methode *worstCandidate(path)*. Die Methode *delete* dient zum Löschen eines Kandidaten aus der Kandidatenliste.

```
bool function checkPath(P path)
{max:     maximale zulässige Anzahl der Kandidaten eines Elements }
var
        k           int
begin
        k = K.countofcandidate(P)
        if (k = max) and (P.w besser als K.worstCandidate(P))  then begin
                K.delete(K.worstCandidate(P))
                k = k - 1
        end
        checkPath = k < max
end
```

Programmtext 7: Vereinfachte Entscheidungsfunktion

Als **Nachteil** der vereinfachten Entscheidungsfunktion ist zu bewerten, dass die berechneten Wegemengen nicht mehr durch einen eindeutige Regel beschrieben werden können. Die Lösungsmenge kann nur mit Wegealgorithmen, die auf einer Kandidatenliste aufbauen, bestimmt werden. Ein **Vorteil** des modifizierten Wegealgorithmus ist, dass die Kenntnis der minimalen Wege zwischen allen Knoten nicht notwendig ist. Die berechnete Wegemenge der alternativen Wege enthält bei geeigneter Wahl der maximalen zulässigen Anzahl von gleichen Kandidaten in der Kandidatenliste aus Sicht der Verkehrsplanung sinnvolle alternative Wege.

6.3.5 Verteilungsfunktionen

Die **Integration der Verkehrsaufteilung** in die Verkehrsumlegung erfolgt über die Verteilung der Fahrten auf die berechneten alternativen multimodalen Wege. Die multimodalen Wege stehen zum einen für Fahrten im gebrochenen Verkehr und zum anderen für alternative Wege mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln.

Generell können alle **Verkehrsaufteilungsmodelle** (z. B. Logit-Modell, siehe Kapitel 2.1.2) als Verteilungsfunktionen in das Prozessormodell integriert werden. Die Charakteristiken der Verkehrsaufteilungsmodelle hinsichtlich der alternativen Wege bleiben bestehen. Im Unterschied zu den Verkehrsaufteilungsmodellen werden im integrierten Modal-Split-Modell auch multimodale Wege berücksichtigt.

6.4 Eingangsgrößen

Für die Modellierung und Berechnung von Verkehrsbelastungen in multimodalen Verkehrsnetzen werden neben einer bewerteten Netzstruktur **Eingangsgrößen** vorausgesetzt. Die Struktur der Eingangsgrößen ist netzunabhängig. Die Verbindung der Eingangsgrößen und der Verkehrsnetze erfolgt durch das Prozessormodell. Eingangsgrößen für die Lösung der gestellten Aufgabe, Verkehrsaufteilung und Verkehrsumlegung in multimodalen Verkehrsnetzen, sind

- die Verkehrsnachfrage (erforderlich) und
- die Verkehrsmittelverfügbarkeiten (optional).

Das integrierte Modal-Split-Modell setzt eine gegebene **Verkehrsnachfrage** voraus, die für den zu untersuchenden Zeitraum erstellt werden muß. Die Werte der Verkehrsnachfrage repräsentieren immer Fahrten von Personen, da das Verkehrsmittel für die Fahrt nicht explizit festgelegt ist. Verkehrsnachfragematrizen mit anderen Einheiten, z. B. Pkw/h, sind umzurechnen. Für das Verkehrsnetz sind zwischen allen zu untersuchenden Quellen und Zielen die vorhandenen Fahrtenwünsche zu bestimmen.

Sowohl der Start als auch das Ende einer Fahrt müssen durch Punkte im **Verkehrsnetz** repräsentiert werden. Diese Punkte können Haltestellen, Straßen, Parkplätze oder spezielle Schwerpunkte (Bezirksknoten) sein. Eine zeitliche Verteilung der Fahrten über den zu untersuchenden Zeitraum, z. B. in Form von Tagesganglinien, findet in diesem Modell nicht statt. Als Abfahrtszeitpunkt sämtlicher Fahrten wird der Beginn des definierten Zeitintervalls festgelegt, für den die Verkehrsnachfrage erstellt worden ist. Alle Fahrten einer Verkehrsbeziehung werden in einem Vorgang mit Hilfe der Verteilungsfunktion auf die berechneten alternativen Wege verteilt.

Mit der **Verkehrsmittelverfügbarkeit** als optionale Eingangsgröße wird festgelegt, ob

eine Person eine Fahrt mit einem bestimmten Verkehrsmittel durchführen kann. Da nicht alle Verkehrsteilnehmer z. B. einen Pkw oder ein Fahrrad besitzen, ist die freie Verkehrsmittelwahl eingeschränkt, sofern für alle Verkehrsmittel Wege gefunden werden. Die Verkehrsteilnehmer werden in Personengruppen mit spezifischen Eigenschaften eingeteilt. Die Einschränkungen sind für jede Quelle getrennt zu betrachten, um eine genaue Abbildung zu erhalten.

Eine **Personengruppe** repräsentiert einen Anteil von Verkehrsteilnehmern mit ihren Möglichkeiten, sich im Untersuchungsraum zu bewegen. Jeder Personengruppe werden die Verkehrssysteme zugeordnet, mit denen sie eine Fahrt beginnen kann. Bei der Verteilung der Fahrten auf die berechneten alternativen Wege wird anhand der zugelassenen Verkehrsmittel eine Vorauswahl durchgeführt. Auf die alternativen Wege, welche mit den jeweils zulässigen Verkehrsmitteln begonnen werden können, wird der personengruppenspezifische Anteil der Verkehrsnachfrage mit Hilfe der gewählten Verteilungsfunktion umgelegt.

6.5 Bewertungsgrößen

In diesem Kapitel werden die Fahrten mit den Verkehrsmitteln Pkw, Fahrrad, zu Fuß sowie der öffentliche Personenverkehr näher beschrieben und deren Elemente analysiert. Des weiteren wird eine Untersuchung von Einflußfaktoren in bezug auf die Wegewahl durchgeführt. Anschließend werden für die Verkehrssysteme die Attribute aufgeführt, die bei der Wegewahl im Modell berücksichtigt werden. In Anlehnung an die Modellierung von Verkehrsmittel-Verkehrswege-Kombinationen bei der Transformation der Daten des Kernmodells in das Prozessormodell wird bei der Beschreibung der im Modell berücksichtigten Attribute keine Unterscheidung in verkehrsmittelspezifische und verkehrswegespezifische Attribute vorgenommen.

6.5.1 Der Pkw-Verkehr

Der Pkw-Verkehr läßt sich durch spezifische **Eigenschaften** beschreiben. Neben dem im Pkw-Verkehr jederzeit zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel wird dieser durch die individuelle Wegewahl bei jeder Fahrt charakterisiert. Verkehrsmittel, die aufgrund ähnlicher Charakteristiken dem Pkw-Verkehr zugeordnet werden können, sind

- der Motorradverkehr (Moped, etc.),
- das Car-Sharing und
- der Taxi-Verkehr.

Zu **Beginn** einer Fahrt befindet sich das Fahrzeug in unmittelbarer Nähe oder ist durch einen zusätzliche Fußweg zu erreichen. Im Bereich von TAXI-Fahrten tritt unter Umständen eine zusätzliche Wartezeit ein. Auf der **Fahrt** zwischen dem Start- und dem

Zielort werden die einzelnen Streckenabschnitte mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten befahren. Zusätzlich treten an den Knotenpunkten infolge von Lichtsignalanlagen oder Vorfahrtregelungen Haltezeiten auf. Durch den Verbrauch von Kraftstoff erhält die Fahrt in Abhängigkeit von der Länge und der Geschwindigkeit einen monetären Aspekt. Voraussetzung für das Verlassen des Fahrzeugs am **Ziel** ist das Vorhandensein eines Stellplatzes (Ausnahme: Taxi-Verkehr). Diesen zu finden ist von der aktuellen Stellplatzauslastung abhängig. Die Parkplatzsuche nimmt zusätzliche Zeit in Anspruch. Hinzu kommen eventuell anfallende Parkgebühren.

Für die **Wahl der Verbindungen** vom Start zum gewünschten Ziel werden unterschiedliche Kriterien herangezogen. Neben quantifizierbaren Größen, wie

- der Weglänge,
- der Fahrzeit,
- den Fahrtkosten,
- der Auslastung von Straßen,
- des Ausbaugrades der Straßen oder
- der Stellplatzsituation am Ziel

sind auch subjektive Größen , wie

- der Kenntnis über vorhandene Wege,
- des subjektiven Fahrkomforts oder
- der Erfahrungswerte über aktuelle Verkehrsbelastungen

für den Verlauf der Fahrt ausschlaggebend.

Die erforderlichen **Verkehrswege** bestehen aus dem Straßennetz mit Knotenpunkten und Straßenabschnitten, die befahren werden. Für das Straßennetz sind die Kriterien

- Länge der Straße,
- Fahrzeit,
- Haltezeit,
- Auslastungsgrad,
- Leistungsfähigkeit der Knotenpunkte und Straßen,
- Stellplätze,
- Fahrkosten,
- Parkkosten,
- Parkplatzsuchzeiten und
- Ausbaugrad

auf ihre Wichtigkeit zu untersuchen und in eine Bewertung einzubeziehen.

Ein Kriterium, welches für eine sinnvolle Modellierung der Bewertungsgrößen notwendig ist, ist die **Länge** einer Straße. Anhand dieses Wertes können neben den Fahrzeiten auch Kostengrößen berechnet werden. Über die Geschwindigkeit kann unter Einbeziehung der Länge die **Fahrzeit** berechnet werden. Sie beschreibt die Zeit, die benötigt wird, um einen Abschnitt einmal zu durchfahren. Für die Bestimmung der Fahrzeit stehen verschiedene Funktionsansätze zur Verfügung. Ein einfacher Ansatz ist das Verwenden einer mittleren Geschwindigkeit, durch welche die Länge dividiert wird. Zusätzlich können die Beschleunigungs- und Bremsvorgänge in die Berechnung der Fahrzeit mit einbezogen werden. Die Geschwindigkeiten sind anhand der Straßenkategorie manuell zu definieren. Sind Engpässe auf einem Straßenzug bekannt, so können auch zusätzliche **Haltezeiten** auf der Strecke, am Startknoten oder am Zielknoten entstehen, die im Modell abgebildet werden müssen. Auch die Haltezeiten sind individuell festzulegen.

Einen erheblichen Einfluß auf die Fahrzeit hat der **Auslastungsgrad** einer Straße. Der Auslastungsgrad berechnet sich aus dem Quotienten der aktuellen Verkehrsbelastung und der Leistungsfähigkeit der Straße. Abhängig vom Auslastungsgrad sind auf der Strecke die Zustände *nicht gebundener Verkehr*, *teilgebundener Verkehr* und *gebundener Verkehr* zu finden, wobei der gebundene Verkehr auch den Stillstand bzw. Stau repräsentiert. Mit nicht gebundenem Verkehr wird der Verkehrsfluß bezeichnet, in dem die Verkehrsteilnehmer ihre Fahrgeschwindigkeit selbst wählen können und durch andere Verkehrsteilnehmer nicht beeinflußt werden. Von teilgebundenem Verkehr oder gebundenem Verkehr spricht man, wenn die Verkehrsteilnehmer sich gegenseitig in bezug auf die mögliche Fahrgeschwindigkeit beeinflussen. Als erforderliche indirekte Bewertungsgröße ist die **Leistungsfähigkeit** einer Straße oder eines Knotenpunktes vorzugeben. Die Leistungsfähigkeiten müssen für jede Straße manuell festgelegt werden. Auch an Knotenpunkten kann der Auslastungsgrad bzw. die Leistungsfähigkeit für die Wegewahl von Bedeutung sein. Unabhängig von der Leistungsfähigkeit der angeschlossenen Strecken ist eine Modellierung von Knotenpunktauslastungen sinnvoll.

Die **Fahrtkosten** spiegeln die monetäre Seite einer Straße wider. Dabei sind für die Wegewahl nur die Kosten relevant, die beim Benutzen der Straße entstehen. Neben den Kraftstoffkosten können auch Mautgebühren eine Rolle spielen. Die Fahrtkosten können aus den aktuellen Kraftstoffpreisen und der Länge der Straße berechnet werden. Des weiteren ist es auch möglich unter Annahme einer Jahresfahrleistung fixe Kosten, wie z. B. Steuer, Abschreibung und Versicherung, in die Fahrtkosten zu integrieren. Während für den privaten Pkw-Verkehr ein mittlerer Kostenfaktor ausreicht, sind für den TAXI-Verkehr zusätzliche Überlegungen notwendig. Neben zusätzlichen Fixkosten zu Beginn der Fahrt sind ggf. andere mittlere Kostenfaktoren anzusetzen.

Weitere Kosten, die im Pkw-Verkehr entstehen, sind die **Parkkosten**. Sie bestehen im wesentlichen aus den Parkgebühren. Werden spezifische Knoten als Parkhäuser

definiert, so können dort die Kosten für das Parken eingetragen werden. Dabei ist die Höhe der Kosten stark von der Dauer des Aufenthalts abhängig. Parkgebühren in Straßenräumen können unter der Voraussetzung berücksichtigt werden, dass die Parkvorgänge bei einem Wechsel vom Pkw auf ein anderes Verkehrsmittel eindeutig einer Straße zugeordnet werden können.

Soll das Fahrzeug abgestellt werden, können zusätzliche **Parkplatzsuchzeiten** entstehen, bis ein freier Stellplatz genutzt werden kann. Parkplatzsuchzeiten treten immer dort auf, wo im Netz an einem Knoten das Verkehrsmittel Pkw verlassen wird, um auf ein anderes Verkehrsmittel zu wechseln. Unter der Voraussetzung, dass genau an diesem Knoten gewechselt werden soll, muß ein Stellplatz in einer an diesen Knoten angrenzenden Straßen (Kanten) vorhanden sein. Es sind die gerade befahrene zuführende und alle wegführenden Straßen bei der Berechnung des Zeitverlustes bei der Parkplatzsuche zu berücksichtigen. Die Anteile der Parkplatzsuchzeiten bestehen aus dem Suchen des Stellplatzes sowie dem anschließenden Fußweg zum Knoten, an dem auf das neue Verkehrsmittel gewechselt wird.

Für die **Berechnung** der Parkplatzsuchzeiten bieten sich zwei Möglichkeiten an. Die Definition eines festen Wertes für jede Straße setzt die vorherige individuelle Abschätzung der Zeitverluste im Umkreis der Straße voraus. Alternativ kann mit einer Näherung in Abhängigkeit von der Länge der Straße gerechnet werden (53). Hierbei wird als Fahrgeschwindigkeit beim Suchen des Stellplatzes 5 m/s (ca. 18 km/h) angesetzt. Es wird angenommen, dass ein Stellplatz im Mittel auf der halben Straßenlänge L gefunden wird. Für den anschließenden Fußweg zum Umsteigeknoten wird eine Geschwindigkeit von 1 m/s verwendet. Zusätzlich ist die von der Länge der Strecke unabhängige Zeit für den Parkvorgang selbst zu berücksichtigen. Dieser Zeitfaktor kann über die Reduktion der gewählten Geschwindigkeit von 5m/s auf 3m/s in die Berechnung integriert werden.

$$\textit{Stellplatzsuche} + \textit{Erreichen des Umsteigeknotens}$$

$$= \frac{L[m] \cdot 0{,}5}{3\left[\frac{m}{s}\right]} + \frac{L[m] \cdot 0{,}5}{1\left[\frac{m}{s}\right]} = \frac{L[m] \cdot 0{,}5 \cdot (3+1)}{3\left[\frac{m}{s}\right]} = \frac{L[m] \cdot 2}{3\left[\frac{m}{s}\right]} \qquad \textbf{(53)}$$

$$\approx L \cdot 0{,}66[s]$$

Die Parkplatzsuchzeiten sind abhängig von den vorhandenen **Stellplätzen** in der Straße. Ist die Zahl der vorhandenen Stellplätze bekannt, so können über spezifische Funktionsansätze diese Zeiten bestimmt werden. Für die Berechnung der vorhandenen Stellplätze S bieten sich die Optionen einer individuellen manuellen Eingabe der Werte

und einer genäherten pauschalen Angabe an. Bei der unten aufgeführten Überschlagsrechnung wird beispielsweise die Länge eines Stellplatzes mit sechs Meter angesetzt und von der Länge der Straße L 25% für mögliche Stellplätze herangezogen (54).

$$S = \frac{L \cdot 0{,}25}{6} \; [-] \qquad \textbf{(54)}$$

Ein Kriterium, welches zusätzlichen Einfluß auf das Fahrverhalten haben kann, ist der **Ausbaugrad** der Straßen. Als Beispiel sei hier der Zustand der Fahrbahndecke einer Straße als Indikator aufgeführt. Über die Definition von Faktoren kann dieses Attribut in die Bewertung der Elemente eingehen.

Die **Attribute der Klassen** im Pkw-Verkehr teilen sich auf in Attribute für Straßen und Attribute für Knotenpunkte.

Für die Verknüpfungspunkte, die **Knotenpunkte**, werden die Attribute

- Belastung [-],
- Einsteiger [-],
- Aussteiger [-],
- Haltezeit [s],
- Unterbrechung [s],
- Kapazität [-] und
- Knotenauslastung [%]

implementiert. In der Belastung werden alle Fahrten, die über diesen Knotenpunkt führen addiert. Die Attribute Ein- und Aussteiger enthalten die Summen aller Fahrten, die an diesem Knoten das Verkehrsmittel wechseln (Einsteiger und Aussteiger) oder deren Fahrt an diesem Knotenpunkt beginnt (Aussteiger) bzw. endet (Einsteiger). Das Einsteigen bzw. Aussteigen beschreibt den Vorgang aus der Sicht der Knotenpunkte. Als Beispiel wird der Beginn einer Fahrt untersucht. Die Fahrt beginnt mit dem *Einsteigen* in ein Verkehrsmittel und gleichzeitig mit dem *Aussteigen* aus dem Knotenpunkt. Attribute, welche den Aufenthalt auf einem Knotenpunkt beschreiben sind die Haltezeit und die Unterbrechung. Der Unterschied zwischen den Attributen Haltezeit und Unterbrechung ist deren Anwendungsbereich. Während die Haltezeit bei jedem Überfahren des Knotenpunktes in die Bewertung des Weges eingeht, tritt eine Unterbrechung nur im Zusammenhang mit einem Wechsel von Verkehrsmitteln im Bereich des Knotenpunktes ein. Die Knotenauslastung ist der Quotient aus der Belastung des Knotens und der Kapazität.

Die Attribute der Streckenelemente, die **Straßenabschnitte**, sind

- Belastung [-],
- Einsteiger [-],
- Aussteiger [-],
- Länge [m],
- Kapazität [-],
- Straßenauslastung [%],
- Geschwindigkeit [m/s],
- Fahrzeit [s],
- beschleunigte bzw. verzögerte Fahrzeit [s],
- Reisezeit [s],
- Haltezeit [s],
- Kosten [Pf],
- Pkw abstellen [s],
- Pkw vorbereiten [s],
- Stellplätze [-] und
- Parken [s].

Die Belastung beinhaltet alle Fahrten, die über die Strecke verlaufen. Im Attribut Einsteiger werden alle Fahrten addiert, die auf dieser Strecke beginnen oder die von einem anderen Verkehrsmittel auf das Verkehrsmittel dieser Strecke wechseln. Umgekehrt verhält es sich bei dem Attribut Aussteiger. Als Aussteiger werden die Fahrten auf der Strecke bezeichnet, die von dem Verkehrsmittel dieser Strecke auf ein anderes Verkehrsmittel wechseln oder deren Fahrt auf dieser Strecke endet. Mit der Länge und der Angabe einer Geschwindigkeit wird die Fahrzeit berechnet. In der beschleunigten Fahrzeit wird ein Beschleunigungsvorgang am Beginn der Straße und ein Bremsvorgang am Ende der Straße integriert. Als Parameter gehen die Beschleunigung, die Anfangsgeschwindigkeit und die maximale Geschwindigkeit in die Berechnungen ein. Über die Fahrzeit t_0 und die Straßenauslastung als Quotient aus Streckenbelastung q und der Kapazität L sowie die Parameter a und b wird die belastungsabhängige Fahrzeit t_w, die Reisezeit, bestimmt (55) [Steierwald, 1994].

$$t_w = t_0 \cdot \left(1 + a \cdot \left(\frac{q}{L}\right)^b\right) \qquad \textbf{(55)}$$

Ein weiteres längenabhängiges Attribut sind die Kosten. Die Haltezeit kann für beliebige Verzögerungen auf der Strecke verwendet werden. Sind die Anschlußpunkte der Strecke mit Strecken anderer Verkehrsmittel, also multimodal, verbunden, ist die Haltezeit am Anfangsknoten der Strecke auf die Haltezeit der Strecke zu übertragen, um den Gültigkeitsbereich der Haltezeit am Knoten nicht zu überschreiten.

Ein Attribut, welches zu Beginn einer Fahrt in die Bewertung des Weges eingeht, ist das Vorbereiten des Pkw (*Pkw vorbereiten*). Beim Verlassen des Pkw am Ende der Fahrt oder beim Wechseln des Verkehrsmittels berücksichtigt das Modell die Attribute *Pkw abstellen* und *Parken*. Das Abstellen des Pkw besteht aus einem konstanten Zeitwert. Alternativ kann das Attribut Parken bei der Berechnung der Bewertung des Weges verwendet werden. Stehen ausreichend Stellplätze zur Verfügung, besitzt das Attribut Parken einen konstanten Zeitwert. Dieser Zeitwert entspricht dem zuvor beschriebenen *Pkw abstellen*. Sind alle Stellplätze belegt, es erfolgt eine Kontrolle mit Hilfe der Aussteiger am Ende der Strecke, so erhält das Attribut einen maximalen Zeitwert (z. B. 24 Stunden)

6.5.2 Der Radverkehr

Der Radverkehr ist in seinen **Eigenschaften** dem Pkw-Verkehr sehr ähnlich. Sowohl zu Beginn der Fahrt als auch am Ziel der Fahrt sind die gleichen Situationen wie im Pkw-Verkehr näher zu untersuchen. Auch beim Benutzen des Fahrrades können zu Beginn der Fahrt und am Ende der Fahrt zusätzliche Zeitverluste auftreten. Parkgebühren sind theoretisch auch beim Fahrrad denkbar.

Auch die **Wahl der Verbindungen** findet unter den gleichen Gesichtspunkten wie beim Pkw-Verkehr statt, wobei der Auslastungsgrad von Radwegen in Abhängigkeit vom Radverkehrsaufkommen in den meisten Fällen unberücksichtigt bleiben kann. Als zusätzliche nicht zu messende Kenngröße fließt die Umgebung der Radwege in den Verhaltensprozeß mit ein. Auch wenn beim Fahrrad Fahrtkosten entstehen, spielen sie in der Praxis eine eher untergeordnete Rolle. Zusätzliche Einflußgrößen bei der Wahl des Weges sind

- das Wetter (Wind),
- das Gefälle einer Strecke,
- die Anzahl von Lichtsignalanlagen auf der Strecke und
- die Stärke des parallel verlaufenden Kfz-Verkehrs.

Die erforderlichen **Verkehrswege** bestehen neben dem Straßennetz mit Knotenpunkten und Straßenabschnitten zusätzlich aus dem Radwegenetz mit eigenen Knotenpunkten und Radwegen, die jeweils überfahren bzw. befahren werden. Dabei können Straßenkreuzungen und Radwegkreuzungen durch denselben Knotenpunkt im Modell repräsentiert werden. Mögliche Attribute für die Wegewahl im Radverkehr sind

- Länge des Radweges,
- Gefälle,
- Wind,
- Ausbaugrad,

- Umgebung,
- Stärke des parallel verlaufenden Kfz-Verkehrs,
- Fahrgeschwindigkeit und
- Haltezeiten.

Auch im Radverkehr spielt die **Länge** eine wichtige Rolle. Mit der Definition einer mittleren Geschwindigkeit können die Fahrzeiten berechnet werden. Eine Integration von Beschleunigungs- und Bremsvorgängen ist denkbar. Die Geschwindigkeiten müssen individuell festgelegt werden. Da auf Radwegen im allgemeinen keine Geschwindigkeitsbegrenzungen existieren, kann mit einer konstanten mittleren Geschwindigkeit für den gesamten Untersuchungsraum gearbeitet werden. Starken Einfluß auf die Geschwindigkeit hat das Gefälle bzw. die Steigung einer Strecke. Geschwindigkeitsreduktionen von bis zu 50% sind schon bei Steigungen von 3% [Conrad, 1995] zu beachten. Die **Fahrzeiten** und die **Haltezeiten** auf einem Streckenabschnitt und an den Knotenpunkten gehören zu den Hauptkriterien, nach denen eine Weg mit dem Fahrrad bemessen wird. Haltezeiten können zum Beispiel durch das Überqueren von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlagen entstehen. Während die Fahrzeiten anhand vorhandener Geschwindigkeiten und Längen der Wege berechnet werden können, sind die Haltezeiten manuell zu definieren.

Weitere Attribute für die Entscheidungsfindung sind der **Ausbaugrad** der Radwege und die Stärke des vorhandenen parallelen **Kfz-Verkehrs** auf der Strecke. Der Ausbaugrad eines Radwegs kann über Faktoren in eine Bewertung eingehen. Der parallel verlaufende Kfz-Verkehr kann mit Hilfe von Bewertungen modelliert werden, die sowohl für den Radverkehr als auch für den parallel verlaufenden Kfz-Verkehr gelten. Bewertungskriterien, die nur schwer in Zahlen gefaßt werden können, sind die Einflüsse aus der **Umgebung** und des vorliegenden **Wetters**. Die Umgebung kann mit Hilfe individueller Bewertungszahlen beschrieben werden. Das Wetter spielt in Abhängigkeit von dem Ausbaugrad und der Umgebung des Radweges eine Rolle und kann daher nur über manuelle Eingaben von Faktoren dem Radverkehr zugeordnet werden.

Die **Attribute der Klassen** im Radverkehr betreffen nur die Streckenelemente des Radwegenetzes. Den Radwegknoten werden keine Attribute zugeordnet, da sie lediglich für die Verknüpfung von Radwegen benötigt werden. Lichtsignalgesteuerte Radwegknoten können mit Hilfe von Knotenpunkten modelliert werden, die im Kapitel Pkw-Verkehr beschrieben werden. Parallel zu Straßen verlaufende Radwege werden über die gleichen Knotenpunkte verknüpft, welche die Straßen miteinander verbinden.

Für die **Streckenelemente** bzw. Radwege werden die Attribute

- Belastung [-],
- Einsteiger [-],
- Aussteiger [-],

– Länge [m],
– Geschwindigkeit [m/s],
– Fahrzeit [s],
– beschleunigte bzw. verzögerte Fahrzeit [s],
– Haltezeit [s],
– Rad abstellen [s],
– Rad vorbereiten [s],
– Steigung [%] und
– Fahrradreisezeit [s]

implementiert. Die Funktion der Attribute Belastung, Einsteiger und Aussteiger entspricht der Funktion der entsprechenden Attribute im Pkw-Verkehr. Mit Hilfe der Länge und der Angabe einer mittleren Geschwindigkeit wird die Fahrzeit auf dem Streckenelement berechnet. In der beschleunigten Fahrzeit werden Beschleunigungs- und Bremsvorgänge integriert. Die Haltezeit besteht aus den Haltezeiten auf dem Radweg und den Haltezeiten auf dem Anfangsknoten der Strecke, sofern der Anfangsknoten der Strecke auch Strecken anderer Verkehrsmittel verknüpft. Wird auf das Verkehrsmittel Fahrrad gewechselt, wird ein Zeitwert für das Vorbereiten des Fahrrades definiert. Beim Wechsel vom Verkehrsmittel Fahrrad wird für das Abstellen ein weiteres Attribut in die Berechnungen einbezogen. In Abhängigkeit von der Steigung einer Strecke S und der Fahrzeit t_0 kann die Fahrradreisezeit t_S bestimmt werden [Conrad, 1995]. Die Berechnung erfolgt mit einer Exponentialfunktion (56). Diese spiegelt in etwa die Werte der in der Literatur tabellarisch aufgeführten Abhängigkeiten zwischen Steigung und Geschwindigkeit wider.

$$t_S = t_0 * e^{0,225 * S} \qquad \textbf{(56)}$$

6.5.3 Der Fußgängerverkehr

Die **Eigenschaften** des Fußgängerverkehrs zeigen starke Übereinstimmungen mit denen des Pkw-Verkehrs. Wird das "zu Fuß gehen" als ein Verkehrsmittel betrachtet, steht das Verkehrsmittel unmittelbar zu Beginn und bis zum Ende einer Fahrt zur Verfügung.

Als meßbare Kriterien für die **Wahl der Verbindungen** werden

– die Weglänge,
– die Haltezeiten und
– das Wetter

herangezogen. Die Kosten eines Fußweges können vernachlässigt werden. Daneben spielen gerade im Fußgängerverkehr

– der Ausbaugrad des Weges und
– die Umgebung des Weges

eine nicht zu unterschätzende Rolle.

Für den Fußgängerverkehr sind eigene **Verkehrswege**, das Gehwegenetz, erforderlich. Diese bestehen aus Gehwegknoten und Gehwegabschnitten, die jeweils überquert bzw. begangen werden. Häufig werden die Gehwege auch durch Knotenpunkte verknüpft, die in diesen Fällen von mehreren Verkehrsmitteln genutzt werden. Für das Gehwegenetz müssen die Bewertungsparameter

– Länge des Gehweges,
– Haltezeiten,
– Geschwindigkeit,
– Fußwegzeit,
– Pkw-Verkehr,
– Ausbaugrad,
– Wetter und
– Umgebung

betrachtet werden.

In Zusammenhang mit der **Geschwindigkeit** kann über die **Länge** die **Fußwegzeit** berechnet werden. Auch kann die Länge für weitere statistische Auswertungen herangezogen werden. **Haltezeiten** können sowohl auf dem Gehweg als auch an den Knoten für den Fußgänger entstehen.

Der **Ausbaugrad**, das **Wetter** sowie die **Umgebung** können mit Hilfe von Faktoren in die Bewertungen eingehen. Im Gegensatz zum Radverkehr kann der **Pkw-Verkehr** nur über Faktoren Einfluß auf den Fußgängerverkehr haben, da im Verkehrsnetz diese beiden Verkehrsarten sich nicht direkt beeinflussen. Mit Ausnahme der Länge und der Geschwindigkeit sind alle Bewertungsgrößen individuell zu belegen. Die Geschwindigkeit kann im gesamten Untersuchungsraum als konstant angesetzt werden. In Ausnahmefällen, wie z. B. in bergigen Regionen, kann dieser konstante Wert den aktuellen Gegebenheiten angepaßt werden.

Die **Attribute der Klassen** im Fußgängerverkehr beschränken sich auf die Gehwege. Attribute für die Gehwegknoten werden nicht implementiert. Parallel zu Straßen verlaufende Gehwege werden durch die Knotenpunkte verknüpft, welche auch die Straßen miteinander verbinden. Attribute der Gehwege sind

– die Belastung [-],
– die Einsteiger [-],
– die Aussteiger [-],
– die Länge [s],
– die Geschwindigkeit [m/s],
– die Fußwegzeit [s] und
– die Haltezeit [s].

Die Belastung, die Einsteiger und die Aussteiger werden im Kapitel Pkw-Verkehr näher erläutert. Mit der Haltezeit werden vorhandene zeitliche Störungen auf der Strecke und am Anfangsknoten des Gehweges abgebildet. Über die Länge und die Angabe einer Geschwindigkeit wird die Fußwegezeit berechnet.

6.5.4 Der öffentliche Personenverkehr

Im Rahmen des öffentlichen Personenverkehrs werden die **Verkehrsmittel**

– Bus und
– Bahn

näher untersucht. Im Gegensatz zum Individualverkehr (z. B. Pkw-Verkehr) steht zu **Beginn** der Fahrt das Verkehrsmittel nicht unmittelbar zur Verfügung. Es ist ein zusätzlicher Fußweg erforderlich, um die nächstliegende Haltestelle zu erreichen. Ist die Haltestelle erreicht, tritt häufig eine weitere Verzögerung vor Antritt der Fahrt ein. Da die Verkehrssysteme im öffentlichen Personenverkehr nur zu bestimmten Zeiten die Haltestellen anfahren, muß der Fahrgast an der Einstiegshaltestelle auf den nächsten Bus oder die nächste Bahn warten. Die **Fahrt** besteht aus der Benutzung eines oder mehrerer Fahrzeuge auf dem gesamten Linienweg der zugehörigen Linie oder einem Teilstück des Linienweges. Zum Erreichen des Ziels müssen Umwege in Kauf genommen werden. Häufig wird auch ein Umsteigen zwischen Fahrzeugen zweier Linien erforderlich. Infolge von Lichtsignalanlagen, Vorfahrtregelungen, den Einsteige- und Aussteigevorgängen der Fahrgäste oder temporären Störungen entstehen zusätzliche Haltezeiten auf der Strecke bzw. an den Haltestellen oder Knotenpunkten. Fahrtkosten entstehen in Abhängigkeit vom Tarifsystem. Wie schon zu Beginn der Fahrt kann auch das **Ziel** der Fahrt nach dem Verlassen des Verkehrssystems fast immer nur über einen anschließenden Fußweg erreicht werden.

Die **Wahl der Verbindungen** wird zum größten Teil durch die festen Linienverläufe im öffentlichen Personenverkehr gesteuert. Wahlmöglichkeiten entstehen nur durch die Umsteigevorgänge. Durch den Umstand, dass der öffentliche Personenverkehr hauptsächlich aus einer liniengebundenen Struktur besteht, sind **Umsteigevorgänge** unvermeidbar. Bei jedem Umsteigevorgang, d. h. einem Wechsel des Verkehrssystems,

tritt dieselbe Situation wie schon zu Beginn der Fahrt ein. Neben einem eventuell erforderlichen Fußweg muß auch eine zusätzliche Wartezeit mit in den Verlauf des Weges einbezogen werden.

Die **Verkehrswege** bestehen aus den Elementen Haltestelle und Linienabschnitt. Ein Linienabschnitt verbindet zwei Haltestellen miteinander. Als Bewertungskriterien im Bereich des öffentlichen Personenverkehrs sind

– Länge des Linienabschnitts,
– Geschwindigkeit,
– Fahrzeit,
– Haltezeit,
– Wartezeit,
– Bedienungshäufigkeit bzw. Taktzeit,
– Fahrtkosten,
– Sitzplätze,
– staubedingte Haltezeit,
– Umsteigezeit und
– Zu- und Abgangszeit (Fußwege)

zu untersuchen und einzustufen.

Die **Länge** eines Linienabschnitts ist für die Berechnung von Fahrzeiten im Zusammenhang mit Geschwindigkeiten erforderlich. Des weiteren können mit ihr verschiedene Auswertungsgrößen bestimmt werden (z. B. Platzkilometer). Für die Reisezeitenberechnung sind sowohl die von der **Geschwindigkeit** abhängigen **Fahrzeiten** als auch die **Haltezeiten** als wichtige Bewertungsgrößen heranzuziehen. Daneben sind im öffentlichen Personenverkehr die **Zu- und Abgangszeiten** zu berücksichtigen.

In Abhängigkeit von **Bedienungshäufigkeiten** B bzw. **Taktzeiten** können die mittleren **Wartezeiten** W vor der Abfahrt von einer Haltestelle bestimmt werden. Die Anzahl der Fahrzeuge einer Linie, die an einer Haltestelle halten, die Bedienungshäufigkeiten, werden dem Fahrplan entnommen. Taktzeiten können ebenso anhand des Fahrplans bestimmt werden oder mit Hilfe der Bedienungshäufigkeiten und einem Zeitintervall Z, in dem die Fahrten verkehren, berechnet werden. Als mittlere Wartezeit wird die halbe Taktzeit angesetzt (57).

$$W = \frac{Z}{B \cdot 2} \; [s] \qquad \textbf{(57)}$$

Die mittleren berechneten Wartezeiten sind zu korrigieren, wenn sich gerade in

ländlichen Bereichen bedingt durch die geringen Bedienungshäufigkeiten zu hohe Werte ergeben. Ab einer mittleren Taktfrequenz von mehr als zwanzig Minuten wird vorausgesetzt, dass der Beginn der Fahrt sich an den Abfahrtszeiten an der Einstiegshaltestelle orientiert.

Besteht auf Teilstrecken ein **Parallelverkehr**, d.h. mehrere Linien befahren dieselbe Strecke, so erhöht sich die Bedienungshäufigkeit aus der Sicht des Verkehrsteilnehmers. Die reale Wartezeit berechnet sich dann aus der Summe aller Bedienungshäufigkeiten der abfahrenden Verkehrsmittel.

Beim Wechseln der Verkehrssysteme treten unter Umständen zusätzliche **Umsteigezeiten** auf. Diese Umsteigezeiten stehen für Fußwege zwischen der Ausstiegshaltestelle der einen Linie und der Einstiegshaltestelle der zweiten Linie. Sie müssen individuell definiert werden. Alternativ kann mit einem konstanten Mindestaufenthalt bei einem Wechsel der Verkehrsmittel gerechnet werden. Über die Anzahl der Wechsel von Verkehrsmitteln wird der Grad der **Direktheit** einer Fahrt berücksichtigt.

Weitere Bewertungskriterien sind die **Fahrtkosten**. Die Fahrtkosten können entweder als laufende Kosten pro Längeneinheit oder als feste Werte beim Wechseln auf das Verkehrssystem definiert werden. Im letzteren Fall müssen jedoch Umsteigevorgänge zwischen verschiedenen Linien ggf. berücksichtigt werden. Für die Bestimmung der Fahrtkosten ist das Tarifsystem des Untersuchungsraumes zu analysieren.

Das Vorhandensein von **Sitzplätzen** und zusätzliche **Stauzeiten** durch parallelen Kfz-Verkehr spielen außerdem eine Rolle bei der Wahl des Verkehrsmittels. Stauzeiten können in die zuvor beschriebenen Haltezeiten integriert werden. Komfort-Kriterien als Faktoren sind fahrzeugabhängig und unter Umständen nicht immer einem bestimmten Linienabschnitt zuzuordnen, da oftmals verschiedene Fahrzeugtypen auf demselben Linienweg verkehren.

Im öffentlichen Personenverkehr werden die **Attribute für die Klassen** *Haltestelle* und *Linienabschnitt* definiert. Mit der Haltestelle werden die Knoten und mit den Linienabschnitten die Streckenelemente im öffentlichen Personenverkehr modelliert.

Für die **Haltestellen** werden die Attribute

– Belastung [-],
– Einsteiger [-],
– Aussteiger [-],
– Haltezeit [s] und
– Fahrkosten [DM]

implementiert. Die Attribute Belastung, Einsteiger und Aussteiger sind bereits in den

vorangegangenen Kapiteln beschrieben worden. Die Haltezeit beschreibt die Aufenthaltsdauer der Verkehrsmittel an der Haltestelle. Fahrtkosten, die einmalig beim Einsteigen in das Verkehrsmittel entstehen, werden für die Haltestelle definiert. Alternativ können diese Festkosten auch auf die Linienabschnitte bei einer entsprechenden Netzstruktur verlagert werden. Längenabhängige Fahrtkosten werden den Streckenelementen zugeordnet.

Im Bereich der **Streckenelemente** werden die Attribute

– Belastung [-],
– Einsteiger [-],
– Aussteiger [-],
– Fahrzeit [s],
– Haltezeit [s],
– Wartezeit [s] und
– Fahrkosten [DM/m]

bei den Bewertungen berücksichtigt. Eine Beschreibung der Attribute Belastung, Einsteiger und Aussteiger erfolgt im Kapitel Pkw-Verkehr. Die Fahrzeiten stehen für den Zeitbedarf auf den Strecken. Über Haltezeiten werden regelmäßige Verzögerungen auf dem Linienabschnitt modelliert. Bedingt durch den Fahrplan im öffentlichen Personenverkehr müssen Wartezeiten abgebildet werden, die vor Antritt einer Teilfahrt mit einer Linie entstehen. Längenabhängige Kosten werden über ein weiteres Attribut jedem Linienabschnitt zugeordnet.

Im Bereich des **nicht liniengebundenen öffentlichen Personenverkehrs** sind Besonderheiten zu beachten. Diese betreffen die Wartezeit und die Wahl der Verbindungen. Aufgrund einer fehlenden festen Bedienungshäufigkeit läßt sich je nach Betriebsform die Wartezeit nicht anhand der Bedienungshäufigkeit berechnen. Sie muß je nach Lage der Haltestelle und vorhandener Betriebsform der Verkehrsmittel als Mittelwert bestimmt werden. Die Wahl der Verbindungen zwischen zwei Haltestellen läßt sich mit einem Wegealgorithmus nicht bestimmen, da der Fahrweg infolge zusätzlicher Fahrtenwünsche anderer Verkehrsteilnehmer je nach Betriebsform variiert und somit vom optimalen Weg abweicht. Eine Modellierung ist nur möglich, wenn vorausgesetzt wird, dass zwischen der Einstiegshaltestelle und der Ausstiegshaltestelle der optimale Fahrweg benutzt wird bzw. Umwege über gemittelte Zusatzzeiten integriert werden.

6.5.5 Sonstige Verkehrselemente

Bei der ausschließlichen Betrachtung des Personenverkehrs darf der parallel stattfindende **Güterverkehr** nicht außer acht gelassen werden. Gerade auf den Pkw-

Verkehr hat der Güterverkehr einen Einfluß, der nicht vernachlässigt werden kann. Da im multimodalen Netzmodell dieses Verkehrsmittel nicht berücksichtigt wird, sind alternative Maßnahmen zu integrieren, um die vorhandenen Abhängigkeiten abzubilden. Der Einfluß des Güterverkehrs fließt in Form von Schwerlastverkehr auf den Straßen (Lkw-Verkehr) und als Schienengüterverkehr in die Betrachtungen ein. Eine Möglichkeit diese Verkehre in das Modell einzubetten, ist die modellunabhängige Modifikation von Attributen. Sowohl im Straßenverkehr als auch im Schienenverkehr kann durch reduzierte Geschwindigkeiten oder Kapazitäten dem Güterverkehr Rechnung getragen werden. Diese verminderten Mittel- bzw. Grenzwerte sind empirisch zu ermitteln bzw. aus der Literatur zu entnehmen. Eine Alternative ist das Ergänzen des Verkehrsnetzes und des multimodalen Netzmodells mit dem Verkehrsmittel Güterverkehr (Lkw, Güterzug). Nach einer Berechnung einer Güterverkehrsbelastung im Netz mit einem gesonderten Modell können diese Belastungen in die Attribute der übrigen Verkehrsmittel einfließen.

Ein bisher nicht betrachtetes Netzobjekt ist der **Bezirksknoten**. Ein Bezirksknoten repräsentiert eine Verkehrszelle. Die Attribute des Bezirksknotens sind die Eigenschaften der Verkehrszelle. Die Bezirksknoten bzw. die Verkehrszelle finden Verwendung im Zusammenhang mit einer Verkehrsnachfrage, wenn die Verkehrsnachfrage in einer Aggregation vorliegt, welche sich in der Struktur des Verkehrsnetzes nicht wiederfinden läßt. Die Charakteristik eines Bezirksknotens bezogen auf eine Fahrt ist seine ausschließliche Funktion als Start und Ziel von Fahrten.

Attribute der Klasse *Bezirk* sind

– Belastung [-],
– Einsteiger [-],
– Aussteiger [-],
– Aufenthalt [s] und
– Unterbrechung [s].

Die Attribute Belastung, Einsteiger und Aussteiger beschreiben die aktuelle Belastung des Bezirksknotens. Sie werden im Kapitel Pkw-Verkehr näher beschrieben. Mit den beiden Attributen Aufenthalt und Unterbrechung wird gewährleistet, dass der Bezirksknoten nur als Anfangs- und Endpunkt einer Fahrt in Frage kommt. Mit dem Aufenthalt wird ein Zeitverlust modelliert, der beim Überfahren des Bezirks in die Berechnungen eingeht. Mit der Unterbrechung wird eine zusätzliche Zeitstrafe eingeführt, die aktiviert wird, wenn an dem Bezirksknoten das Verkehrsmittel gewechselt wird.

Für die Integration von Bezirksknoten in das Verkehrsnetz sind Verbindungen zwischen den Bezirksknoten und den Netzobjekten der Verkehrsmittel zu definieren, die einen Zugang in das Verkehrsnetz und das Verlassen des Verkehrsnetzes ermöglichen. Diese Verbindungen werden als **Anbindungen** bezeichnet. Die Attribute der Anbindungen

hängen stark von der Modellierung der Zugangsmöglichkeiten in das Verkehrsnetz ab. Im öffentlichen Personenverkehr bestehen sie im wesentlichen aus den Attributen, mit denen Fußwege beschrieben werden. Für den Individualverkehr können die Attribute der jeweiligen Verkehrsmittel herangezogen werden. Bedingt durch die Fixierung der Lage eines Bezirksknoten auf einen Punkt in der Verkehrszelle sind bei der Abbildung der Ein- und Ausstiegsmöglichkeiten folgende Aspekte zu berücksichtigen. Um der Zentralisierung der Fahrgäste in dem Bezirksknoten entgegen zu wirken, sind Anbindungen zu allen Knoten im Verkehrsnetz zu definieren, die im näheren Umkreis des Bezirksknoten liegen und als Ein- und Ausstiegspunkte für die Fahrgäste der Verkehrszelle in Betracht kommen. Bei längenabhängigen Attributen ist zu beachten, dass durch ungünstig liegende Bezirksknoten ausgewählte Anbindungen unabsichtlich favorisiert werden. Hier sollte unter Umständen mit gemittelten konstanten Werten gearbeitet werden.

Im Netzmodell werden die Anbindungen mit den Klassen Gehweg, Radweg und Straße modelliert. Die **Attribute der Klassen** sind analog zu der Beschreibung der Bezirksknoten mit den Attributen Aufenthalt und Unterbrechung zu erweitern. Damit wird gewährleistet, dass das Netzobjekt der jeweiligen Klasse nur als erstes oder als letztes Element eines Weges benutzt wird.

Für die Modellierung des ruhenden Verkehrs sind sowohl für das Parken im Straßenraum als auch für das Parken auf einem **Parkplatz** oder in einem Parkhaus Elemente und Attribute im Netzmodell bereitzustellen. Attribute, die das Parken von Kfz im Straßenraum beschreiben, werden im Kapitel Pkw-Verkehr aufgeführt. Für die Abbildung von Parkplätzen und Parkhäusern für Kfz oder Fahrräder wird eine neue Klasse als Spezialisierung der Basisklasse *Knoten* benötigt. Das Abstellen des Fahrzeugs auf einem Parkplatz bzw. in einem Parkhaus hat immer den Wechsel des Verkehrsmittels zur Folge (Ausnahme: Parkplatz bzw. Parkhaus ist Ziel der Fahrt). Beschreibende Größen für einen Parkplatz oder ein Parkhaus sind

– Kapazität,
– Auslastungsgrad,
– Gebühren und
– Stellplatzsuchzeit.

Die Kapazität beschränkt die Möglichkeit, den Parkplatz oder das Parkhaus zum Abstellen des Kfz oder des Fahrrades zu nutzen. Über den aus der Nutzung und der Kapazität resultierenden Auslastungsgrad kann für die Stellplatzsuchzeit mit ihren Bestandteilen

– Warten vor dem Parkhaus oder Parkplatz und
– Suchen eines Stellplatzes im Parkhaus bzw. auf dem Parkplatz

bestimmt werden. Zusätzlich entstehen Kosten in Form von Parkgebühren.

Die **Attribute der Klasse**, die im Modell implementiert sind, sind

– Belastung [-],
– Einsteiger [-],
– Aussteiger [-],
– Kapazität [-],
– Auslastungsgrad [%],
– Gebühren [Pf] und
– Stellplatzsuchzeit [s].

Belastung, Einsteiger und Aussteiger beinhalten Werte für die aktuelle Belastung (siehe Pkw-Verkehr). Die Auslastung des Parkplatzes bzw. Parkhauses wird mit Hilfe der Einsteiger bestimmt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nur Fahrzeuge zur Berechnung herangezogen werden, die an diesem Knoten das Verkehrsmittel wechseln oder am Ziel ihrer Fahrt angelangt sind. Die Gebühren sind individuell zu definieren. Die Stellplatzsuchzeit muß ebenso individuell als Funktion des Auslastungsgrades definiert werden. Zeitabhängige Kosten werden nicht in das Modell implementiert.

6.5.6 Zusammenfassung

Die vorherige Aufstellung hat gezeigt, dass die Fahrten mit den unterschiedlichen Verkehrsmitteln aus **spezifischen Aktionen** bestehen. Im Pkw-Verkehr läßt sich eine Fahrt wie folgt beschreiben. Am Beginn der Fahrt wird in den Pkw *eingestiegen*. Es werden Straßen *befahren* und Knotenpunkte *überfahren*. Ist das Ziel erreicht oder wird das Verkehrsmittel gewechselt, wird aus dem Pkw wieder *ausgestiegen*. Analog verhält es sich im Radverkehr. Die Fahrt beginnt mit dem *Einsteigen* bzw. Aufsteigen auf das Fahrrad und endet mit dem *Aussteigen* bzw. Absteigen am Ziel oder bei einem Wechsel des Verkehrsmittels. Während der Fahrt werden die Radwege oder Straßen *befahren* und Knotenpunkte *überfahren*. Auch der Fußgängerverkehr läßt sich durch ähnliche Aktionen beschreiben. Der Fußweg kann mit den Aktionen *Einsteigen*, *Fahren* (Gehen), *Überfahren* (Überqueren) und *Aussteigen* gekennzeichnet werden. Beim öffentlichen Personenverkehr besteht eine Fahrt aus dem *Einsteigen*, dem Fahren, dem *Überfahren* und dem *Aussteigen*. Tritt ein Umsteigevorgang auf, kann der Weg in zwei Teilfahrten aufgeteilt werden. Zusammenfassend ist zu erkennen, dass alle Fahrten sich auf die Vorgänge

– Einsteigen,
– Fahren (Gehen),
– Überfahren (Überqueren, Sitzenbleiben) und
– Aussteigen

zurückführen lassen. Alle in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Merkmale einer Fahrt mit einem Verkehrsmittel lassen sich einer der vier aufgeführten Teilaktionen zuordnen.

Wird der Vorgang **Einsteigen** betrachtet, lassen sich zwei unterschiedliche Arten beobachten. Während beim Pkw-, Rad- und Fußgängerverkehr das Verkehrsmittel direkt am Beginn der Fahrt zur Verfügung steht, tritt im öffentlichen Personenverkehr eine zusätzliche Wartezeit ein, bis die Fahrt begonnen werden kann. Das **Aussteigen** unterscheidet sich im Pkw-, Rad-, Fußgängerverkehr und öffentlichen Personenverkehr nicht. Ein weiterer Bestandteil, der bei allen Verkehrsmitteln in gleicher Form auftritt, ist das **Fahren**. Das **Überfahren** von Knotenpunkten oder Knoten wird für die Beschreibung einer Fahrt relevant, wenn der Begriff Fahren sich auf jeweils einen Straßen-, Radweg-, Gehweg-, Gleis- oder Linienabschnitt beschränkt.

Die untersuchten Bewertungsgrößen der einzelnen Verkehrsmittel lassen sich in zwei unterschiedliche Arten einteilen. Zum einen existieren Attribute, die unmittelbar in die Bewertung eingehen, z. B. Fahrzeiten und Haltezeiten. Diese Größen werden als **direkte Attribute** bezeichnet. Eine zweite Gruppe von Kenngrößen, die nur für die Berechnung der direkten Attribute benötigt werden, sind die **indirekten Attribute**. Hier sei als Beispiel die Länge einer Straße genannt.

Die Attribute können durch eine Klassifizierung ihres **zeitlichen Einflusses** unterschieden werden. Es existieren Attribute die

– beim Fahren bzw. Gehen,
– vor dem Einsteigen,
– nach dem Aussteigen und
– beim Wechsel von Verkehrmitteln (Linien, Verkehrssysteme)

in die Bewertung des Weges eingehen. Attribute beim Fahren bzw. Gehen sind längenabhängige Größen, z. B. Fahrzeiten und Fahrkosten. Attribute vor dem Einsteigen sind z. B. die Wartezeiten im öffentlichen Personenverkehr oder das Vorbereiten des eigenen Pkw. Nach dem Aussteigen zu berücksichtigende Größen sind z. B. Parkkosten im Individualverkehr. Attribute beim Wechsel von Verkehrsmitteln sind u.a. Mindestumsteigezeiten oder Parkplatzsuchzeiten.

6.6 Komplexitätsabschätzung

Eine Komplexitätsabschätzung des integrierten Modal-Split-Modells zeigt, dass sich unterschiedliche **Bereiche** unabhängig beurteilen lassen.

Das Kernmodell ist **einfach**, da sich die Beschreibung der Verkehrsabläufe auf den verschiedenen Verkehrsmitteln auf wenige spezifische Aktionen reduzieren läßt. Durch die Definition der vier Aktionen *Einsteigen*, *Fahren*, *Überfahren* und *Aussteigen* können alle untersuchten Verkehrsmittel einfach beschrieben werden. Baut ein Netzmodell auf diesen vier Basisaktionen auf, so ist es möglich, sowohl den motorisierten Individualverkehr, den nicht motorisierten Individualverkehr als auch den öffentlichen Personenverkehr innerhalb eines Netzmodells abzubilden.

Das Kernmodell ist **komplex**, da die Modellierung der vielschichtigen Entscheidungskriterien innerhalb der Verkehrssysteme ein komplexes Problem bildet. Mit dem Modell sind unterschiedlichste Bewertungskriterien abzubilden. Diese Attribute unterscheiden sich nicht nur in ihren Einheiten (z. B. Zeitgrößen, Kostengrößen, dimensionslose Größen), sondern auch in ihren Dimensionen (Wertebereichen). Auch das bestimmte Kriterien nicht für alle Verkehrsmittel anzusetzen sind, erfordert eine flexible Modellstruktur für die Modellierung dieser Werte. Hinzu kommen Abhängigkeiten zwischen einzelnen Attributen, die im Modell berücksichtigt werden müssen. Für die Berechnung der Reisezeit im Individualverkehr ist z. B. der aktuelle Auslastungsgrad von großer Bedeutung.

Die Komplexität des **Prozessormodells** hängt von der Art der Transformation der Netzstrukturen ab. Hierbei werden die Transformation in einen kantenorientierten Graphen und die Transformation in einen einfachen bzw. erweiterten knotenorientierten Graphen unterschieden.

Auf der Grundlage eines **kantenorientierten Graphen** oder eines **erweiterten knotenorientierten Graphen** mit aufgelösten Knoten und Haltestellen ist das Prozessormodell **einfach**. Alle verkehrsrelevanten Daten können mit Hilfe des bewerteten Pfeilgraphen modelliert werden. Sowohl die Wegealgorithmen als auch die Verteilungsfunktionen setzen auf dem bewerteten Pfeilgraphen auf und müssen nicht modifiziert werden. Alle Algorithmen, die für bewertete Pfeilgraphen definiert sind, können für Berechnungen herangezogen werden. Auf der anderen Seite ist die Verwendung dieser Graphen **komplex**, da die Vielzahl von Abbiegebeziehungen an Knotenpunkten und Umsteigebeziehungen an Haltestellen die Komplexität des bewerteten Pfeilgraphen erhöhen. Neben einem erhöhten Speicherplatzbedarf steigen auch die Rechenzeiten aufgrund der erhöhten Anzahl von Netzobjekten.

Werden die Berechnungen im Zusammenhang mit einem **einfachen knotenorientierten Graphen** durchgeführt, so ist das Prozessormodell **komplex**. Die Abbildung des öffentlichen Personenverkehrs mit der zeitlich beschränkten Verfügbarkeit der Verkehrsmittel an den Haltestellen (Wartezeit) ist nur durch Modifikationen der Wegealgorithmen möglich. Durch die Möglichkeit, die Elemente des Kernmodells direkt auf den bewerteten Pfeilgraphen abzubilden, ist die Komplexität des bewerteten Pfeilgraphen **einfach**. Durch die geringere Anzahl von Netzobjekten als bei dem kantenorientierten oder dem erweiterten knotenorientierten Ansatz ist die Topologie klar strukturiert. Sowohl Rechenzeiten als auch Speicherplatzanforderungen sind bei einem einfachen knotenorientierten Ansatz geringer.

6.7 Gültigkeitsbereich

Die Eingrenzung des Gültigkeitsbereiches des **integrierten Modal-Split-Modells** kann mit Regeln und zusätzlichen Erweiterungen und Einschränkungen beschrieben werden. Generell ist es mit dem in Kapitel 3 und Kapitel 6.1 definierten Netzmodell möglich, alle Verkehrsmittel zu modellieren, die

– individuell am Beginn einer Fahrt zur Verfügung stehen und mit denen die Wege an jedem Knoten des Netzes neu gewählt werden kann (z. B. Fußgänger, Radfahrer, Pkw) oder

– liniengebunden sind und die Knoten nur zu bestimmten Zeiten anfahren (z. B. Busse, Bahnen).

Durch die Gleichbehandlung der verschiedenen Verkehrsmittel im Netzmodell sind prinzipiell **gebrochene Verkehre** auf der Basis aller vorhandenen Verkehrsmittel möglich. Durch die Bewertung der einzelnen Netzobjekte werden bei den Wegealgorithmen nur die aus Sicht der Verkehrsplanung relevanten Verkehrsmittelkombinationen berücksichtigt.

Sonderfälle, die im Verkehrswesen auftreten und mit den vorhandenen Strukturen modellierbar sind, sind Scheinknoten, Ringlinien, Schleifen in Linienverläufen und unechte Abbieger.

Das Abbilden von **Scheinknoten**, an denen die Verkehrsmittel nicht gewechselt werden dürfen, kann in diesem Modell durch die Definition von Bewertungsgrößen realisiert. Dadurch wird ein quasi-Umsteigeverbot erreicht. Das Modellieren eines absoluten Umsteigeverbots ist nur durch Erweitern der Netzstrukturen mit parallel verlaufenden verkehrsmittel- bzw. linienspezifischen Knoten möglich, welche jeweils nur Kanten eines Verkehrsmittels verbinden.

Ringlinien sind ohne Erweiterungen in das Modell integrierbar, da liniengebundene

Verkehrsmittel im Modell mit ihren einzelnen Linienabschnitten abgebildet werden. Alle Linienabschnitte, d.h. Kanten mit einer gleichen Kennung, sind innerhalb der Netzstruktur gleichberechtigt. Ein Linienverlauf ergibt sich allein durch die Definition von Nachbarschaftsbeziehungen.

Sich kreuzende Linien bzw. Linien mit **Schleifen** müssen mit Hilfe von aufgelösten Knoten bzw. Haltestellen im Modell implementiert werden, um bei liniengebundenen Verkehrsmitteln nur die Ein- bzw. Ausstiegsmöglichkeiten gemäß dem Linienverlauf zuzulassen.

Das im Bereich von Einspeisungen (Verbindung: Bezirk - Verkehrsnetz) und Ausspeisungen (Verbindung: Verkehrsnetz - Bezirk) von Fahrten an Knoten auftretende Problem der **unechten Abbieger** kann durch Netzmodellierung umgangen werden. Durch die Einspeisung bzw. Ausspeisung an aufgelösten Knoten können die unechten Abbieger identifiziert werden. Durch die Gleichberechtigung aller Strecken im Netz werden auch die unechten Abbieger in etwaige vorhandene Bewertungsfunktionen an Knoten mit einbezogen.

Nicht **liniengebundene öffentliche Verkehrsmittel**, z. B. der Rufbus oder das Anruf-Sammel-Taxi (AST), können unter der Voraussetzung mit dem Modell abgebildet werden, dass die Fahrten zwischen der Einstiegs- und Ausstiegshaltestelle ohne Umwege durchgeführt werden. Die durch das Anfahren von weiteren Bedarfshaltestellen entstehenden Umwege können über mittlere Strafzeiten kompensiert werden. Durch die gleichberechtigte Implementation aller Strecken einer Kennung (hier: Linie) können auch die Betriebsformen Richtungsband - und Flächenbetrieb mit dem Modell modelliert werden.

Die Definition von festen Zwischenpunkten zur Modellierung von **Wegeabhängigkeiten** im gebrochenen Verkehr (z. B. Benutzen desselben Parkplatzes beim P&R auf der Hin- und der Rückfahrt) ist mit diesem Modell nicht möglich. Jede Quelle-Ziel-Beziehung wird unabhängig voneinander betrachtet. Beziehungen zwischen Hin- und Rückfahrten sind in dem in dieser Arbeit vorgestellten Netzmodell nicht vorhanden. Eine Lösung dieses Problems durch Aufteilen der Quelle-Ziel-Beziehung in Teilabschnitte, die bei einer Rückfahrt zu berücksichtigen sind, ist durch Modifikation des Prozessormodells denkbar.

6.8 Zusammenfassung

Das entwickelte **integrierte Modal-Split-Modell** besteht aus einem Kernmodell und einem Prozessormodell. Für die Berechnungen der Wege in multimodalen Verkehrsnetzen und die Verteilung von Fahrten korrespondieren die Teilmodelle im Rahmen von Sukzessiv- und Gleichgewichtsverfahren.

Das **Kernmodell** entspricht dem in dieser Arbeit beschriebenen multimodalen Netzmodell (Kapitel 3), welches um spezifische Klassen erweitert wird. Für die Abbildung von Bewertungskriterien von Netzobjekten wird eine Klasse *Attribut* eingeführt, die mit den Netzobjekten verknüpft wird, so dass z. B. Abhängigkeiten von Beschreibungsgrößen zwischen Verkehrselementen modelliert werden können. Weitere Klassen werden für die Integration von Parkplätzen und Verkehrsbezirken definiert.

Mit dem **Prozessormodell** wird eine Suche von alternativen Wegen in einem kantenbewerteten Pfeilgraphen durchgeführt und eine Verkehrsnachfrage auf die berechneten Wege verteilt. Die Mengen der alternativen Wege zwischen zwei Knoten und die gewählten Mehrwegealgorithmen entsprechen den in den Kapiteln 4 und 5 ermittelten Ergebnissen. Als Verteilungsfunktionen werden die in Kapitel 2 beschriebenen Verteilungsfunktionen integriert. Durch die Berücksichtung aller Verkehrsmittel in einem Graphen und die Verteilung der Fahrten auf alternative Wege wird implizit die Verkehrsaufteilung ermittelt. Um das Problem verkehrsmittelbezogener Beziehungsklassen zu lösen, werden Methoden von Knoten innerhalb einer Definition eines erweiterten generellen Mehrwegealgorithmus auf die Kanten verlagert.

Für die **Verkehrsmittel** motorisierter Individualverkehr, öffentlicher Personenverkehr, Radverkehr und Fußgängerverkehr werden die beeinflussenden Kriterien herausgearbeitet und in Form von Aktionen und Attributen für Verkehrselemente beschrieben. Anhand der Prüfung von Fahrten mit in den Kapiteln 6.5.1 bis 6.5.4 aufgeführten Verkehrsmitteln kann eine Klassifizierung der Aktionen auf einer Fahrt in Einsteigen, Fahren (Gehen), Überfahren (Überqueren) und Aussteigen vorgenommen werden. Alle Attribute können einer Aktion zugeordnet werden. Zusätzlich können die Attribute aufgrund ihres zeitlichen Einflusses eingeordnet werden. Die Einflußbereiche beziehen sich auf Kenngrößen während einer Fahrt, Kenngrößen beim Einsteigen und Aussteigen oder Kenngrößen beim Wechseln von Verkehrsmitteln.

Bei der **Transformation** des multimodalen Netzmodells in einen einfach bewerteten Pfeilgraphen als Datengrundlage für das Prozessormodell werden Vereinfachungen durchgeführt. Für jede Verkehrsmittel-Verkehrsweg-Kombination zwischen zwei Knoten werden entsprechende Objekte im Graphen des Prozessormodells definiert. Es entstehen parallele Kanten im Graphen. Die Umrechnung der Attribute der Verkehrselemente in eine reelle Bewertung für jedes Objekt im Pfeilgraphen erfolgt über eine Addition der normierten Bewertungsgrößen der Attribute der Netzobjekte. Eine Normierung ist erforderlich, um zu gewährleisten, dass alle Kenngrößen dimensionslos und unabhängig von ihren absoluten Größen bei der Wegewahl entsprechend berücksichtigt werden. Bei der Transformation kann ein kantenorientierter Graph (Kantenmodell), ein einfacher knotenorientierter Graph (einfaches Knotenmodell) oder ein erweiterter knotenorientierter Graph (erweitertes Knotenmodell) aufgebaut werden.

Bei einem **kantenorientierten Graphen** entsprechen die Strecken des Ausgangs-

graphen den Knoten des transformierten Graphen und die Wechselbeziehungen innerhalb eines Knotens des Ausgangsgraphen den Kanten des transformierten Graphen. Der kantenorientierte Graph unterscheidet sich vom einfachen knotenorientierten Graphen durch eine stark erhöhte Anzahl von Kanten infolge der bestehenden Wechselbeziehungen.

Bei der Transformation eines **einfachen knotenorientierten Graphen** entsprechen die Knoten des transformierten Graphen den Knoten des Ausgangsgraphen und die Kanten den Kanten des Ausgangsgraphen. Wird der einfache knotenorientierte Graph als Berechnungsgrundlage verwendet, sind die Wegealgorithmen zu erweitern. Da die Greedy-Bedingung (eine lokale Entscheidung ist global gesehen korrekt; lokales Optimum = globales Optimum) nicht erfüllt wird, sind Bewertungsgruppen einzuführen und Attribute zu klassifizieren. Die Bewertungsgruppen “immer”, “vor Umsteigen”, ”nach Umsteigen” und “kein Umsteigen” sind in die Wegealgorithmen bei der Berechnung der Bewertungen von Wegen zu integrieren.

Der **erweiterte knotenorientierte Graph** unterscheidet sich vom einfach knotenorientierten Graphen durch aufgelöste Knoten. Alternativ zum kantenorientierten Graphen werden die Wechselbeziehungen im Knoten durch zusätzliche Kanten abgebildet. Dies setzt voraus, dass die Knoten des Ausgangsgraphen im transformierten Graphen mit Hilfe einer Menge von Knoten modelliert werden, zwischen denen die Kanten der Wechselbeziehungen definiert werden können. Die Anzahl der Elemente des erweiterten knotenorientierten Graphen liegt wiederum höher als die Anzahl der Elemente in einem kantenorientierten Graphen.

Die **Komplexität** des Kernmodells ist zum einen einfach und auf der anderen Seite komplex. Das Netzmodell ist einfach, da sich die Beschreibung der Fahrten auf den verschiedenen Verkehrsmitteln auf wenige spezifische Aktionen während einer Fahrt reduzieren läßt (*Einsteigen*, *Fahren*, *Überfahren* und *Aussteigen*). Es können alle untersuchten Verkehrsmittel einfach abgebildet werden. Die Modellierung der vielschichtigen Entscheidungskriterien mit unterschiedlichen Einheiten und begrenzten Gültigkeitsbereichen steigert die Komplexität des Modells. Zwischen dem Graphen des Prozessormodells und den auf ihm angewendeten Wegealgorithmen besteht eine Wechselbeziehung. Wird eine einfache Datenstruktur verwendet (z. B. ein einfacher knotenorientierter Graph), so werden die Wegealgorithmen komplex, da sie modifiziert werden müssen. Umgekehrt können einfache Wegealgorithmen nur auf komplexeren Datenstrukturen (z. B. kantenorientierter Graph) aufbauen.

Der **Gültigkeitsbereich** erstreckt sich auf die Verkehrsmittel motorisierter Individualverkehr, öffentlicher Personenverkehr, Radverkehr, Fußgängerverkehr und die zwischen den Verkehrsmitteln möglichen gebrochenen bzw. multimodalen Verkehre. Sonderfälle, die mit dem Modell abgebildet werden können, sind Scheinknoten, Ringlinien, Schleifen in Linienverläufen, nicht liniengebundene öffentliche Verkehrsmittel

(bedingt) und unechte Abbieger. Wegeabhängigkeiten (z. B. Parkplatz beim P&R auf Hin- und Rückfahrt) können nicht modelliert werden.

7. Anwendung

In diesem Kapitel wird versucht, vorhandene Ergebnisse den mit dem integrierten Modal-Split-Modell berechneten Ergebnissen gegenüberzustellen, um eine Brauchbarkeit des neuen Modells abzuschätzen. Dabei werden vor allem die Werte der Verkehrsaufteilung und die verkehrsmittelspezifischen Verkehrsnachfragematrizen untersucht. Der Umfang der Anwendung umfaßt neben der Beschreibung der Transformation der Daten in das Modell eine Beurteilung der berechneten Ergebnisse. Als Untersuchungsräume werden die Stadt Erfurt und der Großraum Hannover herangezogen.

7.1 Vorgehensweise

Ziel einer Anwendung des Modells ist im allgemeinen eine **Verifizierung** der implementierten Algorithmen. Dies ist jedoch im Rahmen dieser Arbeit aus unterschiedlichen Gründen nicht durchführbar. Durch die äußeren Rahmenbedingungen dieser Arbeit im Rahmen eines Stipendiums war es nicht möglich, neue Daten für das neue Modell aufzunehmen. Es muß für die Anwendung auf bereits vorhandene Daten zurückgegriffen werden. Da die vorhandenen Daten größtenteils Ergebnisse aus verschiedenen Modellrechnungen sind, muß davon ausgegangen werden, dass auch diese Daten Fehler gegenüber der Realität enthalten. Eine Referenzlösung für die Verifizierung des neuen Modells steht nicht zur Verfügung. Die Anwendung beschränkt sich aus diesen Gründen auf eine Gegenüberstellung von vorhandenen und berechneten Werten.

Die **Beurteilungsgrößen**, anhand derer die Qualität der Modellergebnisse überprüft werden, beziehen sich auf die Verkehrsaufteilung und die Verkehrsnachfrage. Die erste Beurteilungsgröße ist die berechnete Verkehrsaufteilung, die der vorhandenen Verkehrsaufteilung gegenübergestellt wird. Als zweite Beurteilungsgröße wird die Verkehrsnachfrage eines Verkehrsmittels betrachtet. Dabei werden die Fahrten der vorhandenen Verkehrsnachfrage $F_{ij\ vorh}$ und die Fahrten der vom Modell berechneten Verkehrsnachfrage F_{ij} verglichen und die mittlere Abweichung Δ berechnet, die sich aus der mit der vorhandenen Verkehrsnachfrage gewichteten relativen Abweichung δ_{ij} über alle Quelle-Ziel-Beziehungen bestimmen läßt (58).

$$\Delta = \frac{\sum (\delta_{ij} * F_{ij_{vorh}})}{\sum F_{ij_{vorh}}} \qquad mit \qquad \delta_{ij} = \left(\frac{|F_{ij} - F_{ij_{vorh}}|}{F_{ij_{vorh}}} \right) \qquad \textbf{(58)}$$

Eine dritte Beurteilungsgröße für die Qualität der berechneten Ergebnisse ist die Verkehrsarbeit. Sie wird über das Produkt der Fahrten einer Verkehrsnachfrage und der Luftlinienentfernung zwischen den Quellen und Zielen berechnet. Es werden die

Verkehrsarbeiten der verschiedenen Verkehrsmittel gegenübergestellt.

Der **Ablauf** der Anwendung gliedert sich in einzelne Teilaufgaben. In einer ersten Teilaufgabe werden die im Modell definierten Attribute der Netzobjekte sowie die Eingangsgrößen mit den in der Realität vorliegenden Kennwerten belegt. Hierzu zählen die Bestandteile der Reisezeiten, Kosten, Kapazitäten, Größen im Zusammenhang mit dem ruhenden Verkehr sowie die Verkehrsmittelverfügbarkeiten. Auf dieser Datenbasis wird eine Verkehrsumlegung mit einer Gesamtverkehrsnachfrage durchgeführt und die Verkehrsnachfrage für die einzelnen Verkehrsmittel berechnet.

Ein Problem bei der Anwendung des entwickelten integrierten Modal-Split-Modells ist die **Datenbeschaffung**. Bedingt durch die bisher existierenden Berechnungsalgorithmen werden die Verkehrselemente durch “scharfe“ Bewertungen mit einer Menge von festen Mittelwerten beschrieben. Definitionen über Schwankungen, auf deren Basis eine zweiwertige Bewertung als Grundlage für eine “unscharfe“ Fuzzy-Bewertung erstellt werden kann, liegen im allgemeinen nicht vor. Aufgrund der Eigenschaften der vorhandenen Daten der Verkehrsnetze wird bei den Untersuchungen der neuentwickelte Mehrwegealgorithmus auf der Basis eines einwertig “scharf“ bewerteten Graphen verwendet. Anhand von ausgewählten Bewertungsgrößen und definierten Bewertungsbereichen wird parallel geprüft, ob der Lösungsansatz mit einem Fuzzy-bewerteten Graphen und dem entwickelten Fuzzy-Mehrwegealgorithmus vergleichbare Ergebnisse liefert.

7.2 Parameter

Für die Anwendung des Modells werden für einzelne Attribute der Verkehrselemente **konstante Werte** definiert. Diese Werte gelten für alle Untersuchungsräume, sofern keine weiteren Angaben über die Größe der Werte innerhalb der Anwendung der einzelnen Verkehrsnetze gemacht werden.

Im Bereich der **Knoten** werden Attribute für jeden Bezirk konstant vorbelegt. Im Netzmodell werden die Bezirke, Haltestellen und Knotenpunkte gleichberechtigt vorgehalten und über die Kanten miteinander verknüpft. Um die Berechnung von Wegen zu vermeiden, die über einen Bezirk hinaus verlaufen, werden das Umsteigen an einem Bezirk und das Überfahren eines Bezirks mit maximalen Zeitstrafen (24 Stunden) belegt. Die Haltezeiten an Haltestellen und Knotenpunkten werden auf Null gesetzt.

Bei den **Streckenelementen** wird für die Verkehrsmittel auf der Straße, dem Radweg und dem Gehweg eine Haltezeit von Null Sekunden als Standardeinstellung festgelegt. Zeitstrafen beim Wechseln auf ein Verkehrsmittel sind im Pkw-Verkehr (Wechseln auf den Pkw) und im Radverkehr (wechseln auf das Fahrrad) eine maximale Zeitstrafe, da

die Verkehrsmittel normalerweise nur am Anfang einer Fahrt zur Verfügung stehen. Diese Werte werden nicht am Beginn einer Fahrt für die Berechnungen verwendet. Der Wechsel von einem Verkehrsmittel wird beim Pkw-Verkehr (Wechseln von einem Pkw) mit 120 Sekunden und beim Radverkehr (Wechseln vom Fahrrad) mit 180 Sekunden geschätzt. Für die Untersuchungen der Fuzzy-Algorithmen werden für die Reisezeit im motorisierten Individualverkehr und für die Fahrzeit und Wartezeit im öffentlichen Personenverkehr Bewertungsbereiche geschätzt. Die Reisezeiten auf den Straßen erhalten als obere Schranke eine 75 %ige Erhöhung. Sowohl die Fahrzeiten als auch die Wartezeiten im öffentlichen Personenverkehr gehen mit einer Erhöhung von 5 % in die Berechnungen von “unscharfen“ Fuzzy-Zahlen mit ein. Die Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der vordefinierten Werte von Netzobjekten.

Tabelle 3: Konstante Netzattribute (Standardwerte des Modells)

Attributbezeichnung	Wert	Netzobjekt(e)
Aufenthalt [s]	86400	Bezirk
Unterbrechung [s]	86400	Bezirk
Haltezeit [s]	0	Straße Radweg Gehweg Haltestelle Knotenpunkt
Rad vorbereiten [s]	86400 (=24 h)	Radweg
Rad abstellen [s]	180	Radweg
Pkw vorbereiten [s]	86400 (=24 h)	Straße
Pkw abstellen [s]	120	Straße
Reisezeit [s]	obere Grenze bei 175 % des Wertes	Straße
Fahrzeit [s]	obere Grenze bei 105 % des Wertes	Linienabschnitt
Wartezeit [s]	obere Grenze bei 105 % des Wertes	Linienabschnitt

7.3 Untersuchungsraum Erfurt

Die **Grunddaten** der Verkehrnetze der Stadt Erfurt wurden im Rahmen des Verkehrs-

entwicklungsplans durch das Ingenieurbüro Schnüll/Haller mit den Programmen VISUM und VISUM-ÖV erstellt. Für die Anwendung werden die Daten für das Jahr 1991 (Analysejahr) verwendet. Als Ausgangsdaten stehen die Verkehrsnetze für den motorisierten Individualverkehr (MIV) und den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) zur Verfügung. Für beide Verkehrssysteme wird auch eine Verkehrsnachfrage bereitgestellt. Das Verkehrsnetz für den motorisierten Individualverkehr umfaßt den Bereich der Stadt Erfurt (67 Verkehrszellen) sowie die angrenzenden Gemeinden inklusive der in der Nähe vorbeiführenden Bundesautobahn (37 Verkehrszellen). Das Verkehrsnetz des öffentlichen Personenverkehrs beschränkt sich auf das Stadtgebiet (67 Verkehrszellen) und die Stadtrandbereiche (11 Verkehrszellen). Im Rahmen der Anwendung wird das Stadtgebiet Erfurt als Verkehrsraum für die Gegenüberstellung unter Berücksichtung des gesamten Untersuchungsraums herangezogen.

Für die Anwendung des Modells werden die **Arbeitsschritte**

– Gesamtverkehrsnachfrage bestimmen,
– vorhandene Verkehrsnetze importieren und zusammenführen,
– Bewertungsgrößen modifizieren und ergänzen,
– Verkehrsbelastungen und Verkehrsnachfrage berechnen und
– Gegenüberstellung der Ergebnisse

durchgeführt. Die Erstellung der Gesamtverkehrsnachfrage erfolgt über die Addition der Verkehrsnachfrage des motorisierten Individualverkehrs und der Verkehrsnachfrage des öffentlichen Personenverkehrs. Die weiteren Arbeitsschritte werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

Das **multimodale Verkehrsnetz** wird in zwei Teilschritten erstellt. Über Importfunktionen werden die Daten der Verkehrsnetze umgewandelt und in die entwickelte Netzstruktur transformiert. Anschließend werden die importierten Netze in ein Verkehrsnetz zusammengeführt. Hierbei erfolgt eine Kontrolle auf identische Knoten bzw. Haltestellen und Bezirksknoten über einen Vergleich der Koordinaten. Parallelverkehr, aus dem für den Fahrgast eine verkürzte Wartezeit resultiert, wird bei den Untersuchungen nicht berücksichtigt. Aufgrund der weitestgehend unabhängigen Koordinaten der Knoten und Haltestellen innerhalb der Netzstrukturen des motorisierten Individualverkehrs und des öffentlichen Personenverkehrs ist die Berücksichtigung sich gegenseitig beeinflussender Verkehrsmittel nicht möglich.

Optional wird die Verkehrsmittelverfügbarkeit als zusätzliche Eingangsgröße in die Berechnungen mit einfließen. Die **Verkehrsmittelverfügbarkeit** legt die Verkehrsmittel fest, mit denen eine Fahrt begonnen werden kann. Im weiteren Verlauf einer Fahrt benutzte Verkehrsmittel werden von der Verkehrsmittelverfügbarkeit nicht beeinflußt. Im Rahmen der Anwendung werden zur Bestimmung der Verkehrsmittelverfügbarkeit die im Verkehrsentwicklungsplan (VEP) der Stadt Erfurt festgeschriebenen Wege je

Einwohner und Tag und der Motorisierungsgrad als Berechnungsgrundlage herangezogen. Für das Analysejahr 1991 werden als Wege je Einwohner und Tag (Mobilität)

- 0,85 mit dem motorisierten Individualverkehr (Selbstfahrer),
- 0,30 mit dem motorisierten Individualverkehr (Mitfahrer),
- 0,65 mit dem öffentlichen Personenverkehr,
- 0,15 mit dem Fahrrad und
- 1,25 als Fußgänger

angegeben. Der Motorisierungsgrad ist mit 350 Pkw/1000 Einwohner vorgegeben. Als Pkw-Besetzungsgrad ergibt sich anhand der Anteile der Wege ein Wert von 1,3 Personen/Pkw. Die **Berechnung** der Pkw-Verkehrsmittelverfügbarkeit erfolgt in mehreren Teilschritten (59)

$$
\begin{aligned}
PKW\text{-}Besetzungsgrad\ (Mobilität) &= 1{,}3 \\
\frac{Motorisierungsgrad\ (VEP)}{1000\ Einwohner} &= 350 \\
\frac{PKW\text{-}Fahrten\ (Mobilität)}{1000\ Einwohner} &= 359 \\
\frac{ÖPV\text{-}Fahrten\ (Mobilität)}{1000\ Einwohner} &= 203 \\
\frac{Rad\text{-}Fahrten\ (Mobilität)}{1000\ Einwohner} &= 47 \\
\frac{Fußwege\ (Mobilität)}{1000\ Einwohner} &= 391 \\
\frac{pot.\ PKW\text{-}Benutzer}{1000\ Einwohner} &= 350 * 1{,}3 = 455 \\
\frac{andere\ Fahrten\ (pot.\ PKW\text{-}Benutzer)}{1000\ Einwohner} &= 455 - 359 = 96 \\
\frac{ÖPV\ Fahrten\ (pot.\ PKW\text{-}Benutzer)}{1000\ Einwohner} &= 96 * \left(\frac{203}{203+47+391}\right) = 30 \\
\frac{pot.\ PKW\text{-}Benutzer\ (MIV,ÖPNV)}{1000\ Einwohner} &= 359 + 30 = 389 \\
\frac{PKW\text{-}Verfügbarkeit\ (MIV,ÖPNV)}{1000\ Einwohner} &= \frac{389}{359+203} = 0{,}69 \\
PKW\text{-}Verfügbarkeit\ (MIV,ÖPNV) &= 69\ [\%]
\end{aligned}
\qquad \textbf{(59)}
$$

Die Anzahl der potentiellen Pkw-Benutzer berechnet sich aus dem Produkt des Besetzungsgrades und dem Motorisierungsgrad. Aus der Differenz der Zahl der

potentiellen Pkw-Benutzer und der Wege mit dem Pkw anhand der Mobilität berechnet sich der Anteil der potentiellen Pkw-Benutzer, welche nicht mit dem Pkw gefahren sind. Aufgrund des in dieser Untersuchung fehlenden Fußgänger- und Radverkehrs ist der Anteil der potentiellen Pkw-Benutzer zu ermitteln, die ihre Fahrten mit dem öffentlichen Personenverkehr durchführen. Es wird davon ausgegangen, dass sich die potentiellen Pkw-Benutzer, die keine Fahrten mit dem Pkw durchführen, proportional zu den aufgeführten Mobilitäten auf die Verkehrsmittel Fußgänger, Fahrrad und öffentlicher Personenverkehr verteilen. Die Summe des Anteils der Pkw-Fahrten anhand der Mobilität und der berechnete Anteil der potentiellen Pkw-Benutzer, die den öffentlichen Personenverkehr benutzen, ergibt die Zahl der potentiellen Pkw-Benutzer. Dieser Wert bezieht sich auf die Verkehrsmittel motorisierter Individualverkehr und öffentlicher Personenverkehr. Die Pkw-Verfügbarkeit berechnet sich aus dem Quotienten der Zahl der potentiellen Pkw-Benutzer und der Summe der Fahrten für die betrachteten Verkehrsmittel (59). Für 69 % der Einwohner besteht Verkehrsmittelwahlfreiheit. 31 % der Einwohner sind an den öffentlichen Personenverkehr zu Beginn ihrer Fahrt gebunden. Aufgrund der unterschiedlichen Größen der Verkehrsräume, die durch die Verkehrsmittel abgedeckt werden, wird die reduzierte Verkehrsmittelverfügbarkeit nur für den Bereich angesetzt, in dem ein Anschluss an das Netz des öffentlichen Personenverkehrs besteht. Die Fahrgäste aller außerhalb liegenden Verkehrszellen sind an den motorisierten Individualverkehr gebunden.

Nach dem Import der Verkehrsnetze werden zusätzliche **Modifikationen** an den Netzstrukturen vorgenommen. Die Modifikationen beinhalten das Erweitern vorhandener Netzobjekte mit neuen Attributen, das Erzeugen zusätzlicher Netzobjekte und das Bearbeiten vorhandener Attribute.

Vorbereitende Modifikationen waren das Angleichen der Verkehrsnachfragematrizen des motorisierten Individualverkehrs und des öffentlichen Personenverkehrs sowie das Berechnen der Gesamtverkehrsnachfragematrix durch Addition der vorhandenen Verkehrsnachfragematrizen. Die Verkehrsmittelverfügbarkeiten innerhalb der Verkehrszellen, die an den öffentlichen Personenverkehr angeschlossen sind (77 Verkehrszellen), wurden in die Anteile 69% wahlfrei und 31% ÖPNV-gebunden aufgeschlüsselt. Alle Attribute, die innerhalb der Wegesuche berücksichtigt werden, wurden normiert.

Die **Modifikationen der Netzobjekte** sollen hier nur auszugsweise beschrieben werden. Es wird auf die Tabelle 4 verwiesen. Die Kosten für die Verkehrsmittel im öffentlichen Personenverkehr sind 0,60 DM je Fahrt im Stadtbereich und zusätzlich mit 12 Pf pro km beim Benutzen eines Regionalbusses (Fahrplan der Stadt Erfurt, 1991). Für den motorisierten Individualverkehr werden 14,4 Pf pro km (9 l pro 100 km, 1,60 DM pro l) angesetzt. Die Zu- und Abgangszeiten zwischen den Bezirken und Haltestellen bzw. zwischen den Bezirken und Knotenpunkten werden aufgrund der Erfahrungen mit anderen Verkehrsumlegungsmodellen abgeschätzt. Die Fußwegezeiten zu den Haltestellen werden auf maximal 10 Minuten begrenzt. Die Zugangs- und Abgangs-

zeiten des motorisierten Individualverkehrs zum Erreichen des Straßennetzes werden auf maximal ca. 9 Minuten (max. 100 m, 20 km/h) begrenzt. Diese Werte resultieren aus einer Angleichung der vorhandenen Daten (max. Länge von 100m) an die Zu- und Abgangszeiten im öffentlichen Personenverkehr. Zusätzlich werden im motorisierten Individualverkehr Zeitkomponenten am Beginn und am Ende einer Fahrt berücksichtigt. Das Vorbereiten einer Fahrt mit dem Pkw (Attribut: Pkw vorbereiten) wird mit 2 Minuten angesetzt und geht in jede Fahrt mit dem Pkw ein. Ähnlich verhält es sich am Ende einer Fahrt. Für das Abstellen des Pkw (Attribut: Pkw abstellen) wird die Reisezeit um 2 Minuten verlängert. Diese Werte sind Schätzungen, da eine gesicherte Datengrundlage nicht vorliegt. In der Tabelle 4 sind alle durchgeführten Modifikationen und Erweiterungen aufgeführt.

Tabelle 4: Netzmodifikationen, Stadt Erfurt

Gruppe(n)	Bedingung(en)	Attribut(e)/Aktion(en)	Wert(e)
Anbindungen	alle	Fußwegzeit Verkehrsaufteilung	max. 600 [s] deaktiviert
Reg.-Bus, Stadtbus, Strab	spez. Haltestellen	Fahrscheinkosten	60 [Pf]
	alle	Fahrscheinkosten	0,012 x Länge [Pfkm]
Straßen	alle	Pkw abstellen Pkw vorbereiten Kosten	86400 [s] (Vorbelegung) 86400 [s] (Vorbelegung) 0,0144 x Länge [Pfkm]
	Knotenpunkt -> Bezirk	Länge Pkw abstellen Geschwindigkeit	100 [m] 120 [s], Typ IMMER 5,5 [m/s] (=20 km/h)
	Bezirk -> Knotenpunkt	Länge Geschwindigkeit Pkw vorbereiten	100 [m] 5,5 [m/s] (=20 km/h) 120 [s], Typ IMMER

Die **vorhandenen Werte** für die Verkehrsaufteilung lassen sich aus den Verkehrsnachfragematrizen berechnen. Aus den Anteilen des motorisierten Individualverkehrs (MIV) und des öffentlichen Personenverkehrs (ÖPNV) ergibt sich eine mittlere Verkehrsaufteilung von 65 % für den motorisierten Individualverkehr und 35 % für den öffentlichen Personenverkehr. Für das Stadtgebiet (67 Verkehrszellen) verändert sich der Modal-Split zu 58 % MIV und 42 % ÖPNV. Aus den Verkehrsnachfragematrizen berechnen sich die Werte für die verkehrsmittelspezifischen Verkehrsarbeiten. Die Verkehrsarbeit setzt sich aus dem Produkt der Anzahl der Fahrten und der Luftlinienentfernungen

zwischen den Quell- und Zielbezirken zusammen.

Mit Hilfe der zuvor beschriebenen Beurteilungsgröße, der mittleren relativen Abweichung zwischen vorhandener und berechneter Verkehrsnachfrage, erfolgt die **Wahl der Berechnungsalgorithmen**. Innerhalb eines Gleichgewichtmodells werden die vorhandenen Wegealgorithmen und Verteilungsfunktionen mit unterschiedlichen Parametern belegt und die Berechnungsergebnisse miteinander verglichen. Dabei kann festgestellt werden, dass die Parameter der Verteilungsfunktionen vom verwendeten Wegealgorithmus abhängen, sofern gleiche Ergebnisse der Beurteilungsgrößen erzielt werden sollen. Aufgrund nicht ausreichend vorhandener Daten wird der Fuzzy-Mehrwegealgorithmus am Ende dieses Kapitels gesondert behandelt.

Das Verkehrsnetz ohne weitere Modifikationen von Attributen und Faktoren wird als **Netz 0** bezeichnet. Die Berechnungen erfolgen ohne Berücksichtigung der Verkehrsmittelverfügbarkeiten. Die Tabelle 5 zeigt die berechneten Beurteilungsgrößen. Es ist zu erkennen, dass sowohl bei der Verkehrsaufteilung als auch bei den Verkehrsarbeiten Werte gleicher Größenordnung berechnet werden. Die Abweichungen einzelner Quelle-Ziel-Beziehungen der Verkehrsnachfragen sind jedoch erheblich, so dass eine nähere Untersuchung notwendig ist.

Tabelle 5: Ergebnisse, Netz 0, Stadt Erfurt

Bewertungsgröße	vorh. Werte	neue Werte
Modal-Split MIV/ÖPNV/Rest [%]	58/42	55/44/1
Verkehrsarbeit MIV (Matrix) [PersKm]	63425	62974
Verkehrsarbeit ÖPNV (Matrix) [PersKm]	52717	53013

Eine weitere Untersuchung gilt den **Verkehrsmittelverfügbarkeiten**. Als Datengrundlage wird das zuvor beschriebene Verkehrsnetz *Netz 0* verwendet. Die im Abschnitt Verkehrsmittelverfügbarkeit ermittelten Werte werden bei der Verteilung der Fahrten auf die alternativen Wege berücksichtigt. Tabelle 6 zeigt die Berechnungsergebnisse. Es ist festzustellen, dass bezogen auf die zuvor erwähnten stark abweichenden einzelnen Quelle-Ziel-Beziehungen keine wesentlichen Änderungen bei den berechneten Ergebnissen aufgetreten sind.

Tabelle 6: Ergebnisse, Netz 0, Stadt Erfurt, Verkehrsmittelverfügbarkeiten

Bewertungsgröße	vorh. Werte	neue Werte
Modal-Split MIV/ÖPNV [%]	58/42	57/43
Verkehrsarbeit MIV (Matrix) [PersKm]	63425	63772

Bewertungsgröße	vorh. Werte	neue Werte
Verkehrsarbeit ÖPNV (Matrix) [PersKm]	52717	52522

Für eine differenzierte Betrachtung der vorhandenen und berechneten Verkehrnachfragematrizen wird der **Quellverkehr** des öffentlichen Personenverkehrs betrachtet. Für jeden Bezirk werden gemittelte Werte über den jeweiligen Quellverkehr bestimmt und gegenübergestellt. Die Anteile des öffentlichen Personennahverkehrs am Gesamtverkehr werden mit den Einwohnern des Quellbezirks gewichtet. Durch die Multiplikation mit den Einwohnern werden gegebenenfalls vorhandene Unterschiede verstärkt. Die Abbildung 44 zeigt die Anteile des öffentlichen Personenverkehrs der Stadt Erfurt für die vorhandene Verkehrsnachfrage (vorh.) und die berechnete Verkehrsnachfrage (neu).

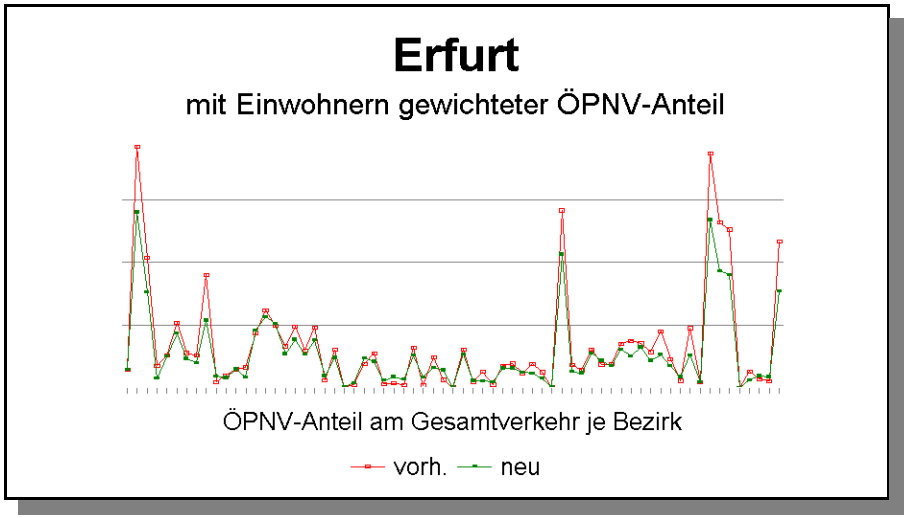

Abbildung 44: Erfurt: Vergleich des öffentlichen Personenverkehrs (gewichtet)

In der Darstellung der gewichteten Anteile des öffentlichen Personennahverkehrs ist kein prinzipieller Fehler bei der Berechnung der Verkehrsnachfrage erkennbar. Eine Gegenüberstellung der vorhandenen Werte und der berechneten Werte in einem XY-Diagramm zeigt Abbildung 45. Im XY-Diagramm werden die vorhandenen Anteile des öffentlichen Personennahverkehrs am Gesamtverkehr den berechneten Anteilen gegenübergestellt. Der vorhandene Anteil wird auf der X-Achse eingetragen. Der berechnete Anteil wird auf der Y-Achse eingetragen. Der Korrelationsfaktor beträgt 0,69. Die Standardabweichung des Korrelationsfaktors ist 0,01.

Die beiden Abbildungen zeigen, dass die mit dem neuen Modell berechneten Werte zwar zum Teil stark von den vorhandenen Werten abweichen. Es ist jedoch auch zu erkennen, dass in dem neuen Modell keine prinzipiellen Fehler bei der Berechnung der Ergebnisse aufgetreten sind. Es kann festgestellt werden, dass das neue Modell auch schon in dieser ersten Anwendung brauchbare Ergebnisse liefert.

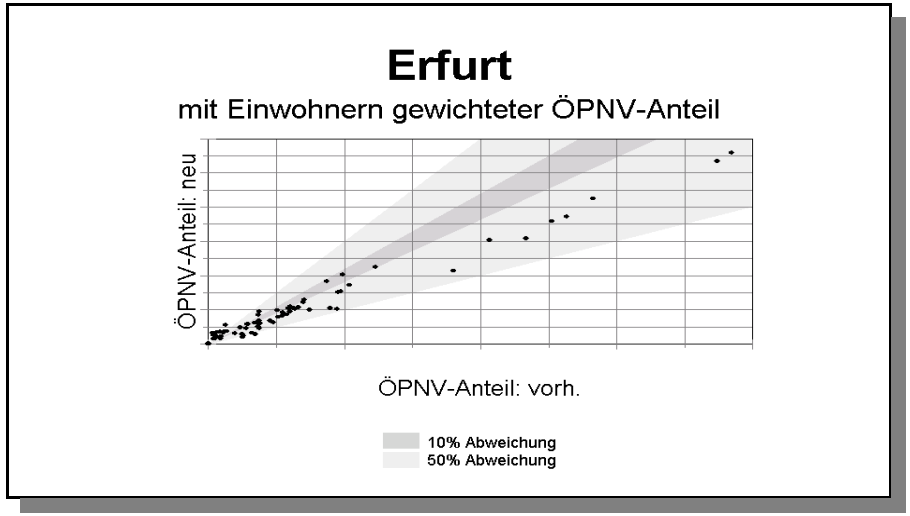

Abbildung 45: Erfurt: Vergleich des öffentlichen Personenverkehrs (gewichtet, XY-Diagramm)

Für eine **Erklärung der Unterschiede** zwischen den berechneten Werten und den vorhandenen Werten können verschiedene Aspekte herangezogen werden. Diese beziehen sich auf

- die Netzstrukturen,
- die globalen Parameter und
- die Abweichungen der Ausgangsdaten.

Die mit diesem Modell untersuchten Netzstrukturen bestehen aus zwei unabhängig voneinander erstellten Verkehrsnetzen, die im Rahmen dieser Arbeit miteinander verknüpft werden. Aufgrund der getrennten Aufnahme der Netzdaten wurden z. B. geographisch identische Punkte innerhalb der Verkehrsmittel nicht mit denselben Koordinaten versehen. Auch sahen die Teilmodelle für einige Punkte (z. B. Bezirke im öffentlichen Personenverkehr) überhaupt keine Koordinaten vor. Abhängigkeiten zwischen den Verkehrsmitteln können unter diesen Voraussetzungen nur schlecht bzw. gar nicht abgebildet werden. Die Definition von Parametern, die für das gesamte

Verkehrsnetz gelten, z. B. die Verkehrsmittelverfügbarkeiten, bildet eine weitere Fehlerquelle. Globale Parameter können das Verkehrsgeschehen nur unzureichend widerspiegeln. Da die Ausgangsdaten mit anderen Modellen berechnet wurden, können auch durch die unbekannten verwendeten Modellparameter und Modelleigenschaften Abweichungen zur Realität entstanden sein, die innerhalb dieser Anwendung nicht kompensiert werden können.

Für eine Einschätzung des neuen **Fuzzy-Mehrwegealgorithmus** sind auf der Basis der Reisezeiten des motorisierten Individualverkehrs und der Fahr- und Wartezeiten des öffentlichen Personennahverkehrs Verkehrsumlegungen mit unterschiedlichen Verteilungsfunktionen gerechnet worden. Aufgrund der eingeschränkten Menge an berücksichtigten Bewertungsgrößen und der grob geschätzten Bewertungsbereiche können diese Ergebnisse nicht mit den zuvor berechneten Werten verglichen werden. Sie haben allerdings die Anwendbarkeit eines “unscharfen“ Mehrwegealgorithmus gezeigt.

Zusammenfassend können folgende Aussagen festgehalten werden: Die berechneten Werte der Verkehrsaufteilung für das Gesamtnetz entsprechen nach der Wahl von Parametern für die Wegesuchalgorithmen und Verteilungsalgorithmen den vorhandenen Werten. Die integrierte Verkehrsaufteilung auf den einzelnen Verkehrsbeziehungen differiert zum Teil stark von den vorhandenen Werten. Eine Untersuchung des Quellverkehrs ergibt, dass das Modell Werte berechnet, deren qualitative Charakteristiken sich mit den vorhandenen Werten decken. Die quantitative Übereinstimmung der Werte ist nicht zufriedenstellend. Gründe sind in den grob gewählten Parametern und Netzattributen, den nicht bekannten Modellparametern im Rahmen der Berechnung der vorhandenen Daten und in der Struktur der verwendeten Verkehrsnetze zu suchen. Eine detaillierte Untersuchung auf angepaßten Verkehrsnetzen mit differenzierten Attributen ist durchzuführen. Die parallele Untersuchung der Verkehrsnetze mit Hilfe des neuen Fuzzy-Mehrwegealgorithmus auf der Basis eingeschränkter Bewertungsgrößen zeigt, dass mit einem unscharfen Ansatz akzeptable Ergebnisse berechnet werden können. Aufgrund der stark eingeschränkten unscharfen Datenbasis sind in dieser Richtung differenziertere Untersuchungen für detaillierte Aussagen über die Tauglichkeit des Fuzzy-Mehrwegealgorithmus notwendig.

7.4 Untersuchungsraum Großraum Hannover

Die **Grunddaten** für die Gegenüberstellung des Verkehrs im Großraum Hannover werden aus verschiedenen Projekten des Instituts für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau der Universität Hannover (ivh) zusammengestellt. Die Verkehrsnachfragematrizen sind im Rahmen des Projektes “Verkehrsbeziehungen im Raum Hannover” 1992 vom ivh erstellt worden. In dieser Arbeit werden die Verkehrsnachfragematrizen der Berufspendler des motorisierten Individualverkehrs (MIV), des öffentlichen

Personennahverkehrs (ÖPNV) und des nicht motorisierten Individualverkehrs (NMIV) für die Anwendung verwendet. Die Daten basieren auf den Ergebnissen der Volkszählung von 1987 und können als empirische Daten bezeichnet werden, d. h. die Grunddaten wurden mit keinem Modell berechnet. In Zusammenhang mit diesem Projekt wurden auch die Verkehrsnetze des motorisierten Individualverkehrs und des öffentlichen Personennahverkehrs für das Jahr 1991 aufgenommen. Der Radverkehr ist im Rahmen einer Diplomarbeit auf der Basis des Verkehrsentwicklungsplans Hannover 1990 am ivh erstellt worden. Für das Gehwegenetz liegen keine Daten vor. Allen Verkehrsnetzen wird eine Bezirkseinteilung zugeordnet, die aus 118 Bezirken für die Stadt Hannover, 199 Bezirken für den Landkreis und 8 Bezirken für die umliegenden Landkreise besteht. Aufgrund unvollständiger Nachfragedaten für die angrenzenden Landkreise wird im weiteren Verlauf mit den 317 Bezirken der Stadt und des Landkreises Hannover gerechnet.

Die **vorhandenen Werte** für die Anteile der Verkehrsaufteilung werden anhand der Ergebnisse des Projektes “Verkehrsbeziehungen im Raum Hannover” am ivh bestimmt. Es werden die Fahrtzwecke Arbeit und Ausbildung berücksichtigt, da für diese Fahrtzwecke die Verkehrsnachfragematrizen vorliegen. Die Werte der Verkehrsaufteilung wurden für den Großraum Hannover berechnet. Für den Gesamtverkehr ergibt sich eine gemittelte Verkehrsaufteilung von

– 49 % für den motorisierten Individualverkehr,
– 32 % für den öffentlichen Personennahverkehr und
– 19 % für den nicht motorisierten Individualverkehr

für die Fahrtzwecke Arbeit und Ausbildung. Diese Werte weichen von denen in der Literatur angegebenen Werten ab, da durch Spiegelung der Matrizen (s. Modifikationen) und Herausnahme des Zellbinnenverkehrs Verschiebungen der relativen Anteile am Gesamtverkehr entstehen.

Die **Modifikationen** betreffen sowohl die Verkehrsnachfrage als auch die Netzstrukturen. Die als Vorgabe dienenden Pendlermatrizen werden gespiegelt, da sie nur den Verkehr in einer Richtung beinhalten. Anhand der entstandenen Symmetrie sind Fehler im Modell oder in den Netzstrukturen leichter zu erkennen. Da innerhalb des Verkehrsnetzes des motorisierten Individualverkehrs die Kapazitäten als Stundenwerte angegeben sind, werden die Matrizen mit dem Faktor 0,1 multipliziert, um die Verkehrsnachfrage der Morgenspitze bzw. Nachmittagsspitze zu erhalten. Bei den weiteren Untersuchungen wird davon ausgegangen, dass die Kapazitäten aller untersuchten Verkehrsmittel sich in den genannten Zeitintervallen (Morgenspitze, Nachmittagsspitze) nicht wesentlich unterscheiden. Die Kapazitäten im motorisierten Individualverkehr sind aufgrund der Einheit Pkw/h umzurechnen, da die Verkehrsnachfrage aus Personenfahrten/h besteht und die Verkehrsmittel, auf welche die Fahrten verteilt werden, nicht festgelegt sind. Anhand des mit Hilfe der Fahrtzwecke ermittelten mittleren Pkw-

Besetzungsgrades von 1,24 [ivh, 1992] werden die Kapazitäten durch Multiplikation in Personenfahrten/h umgerechnet. Der Lkw-Verkehr ist bei den Angaben der Kapazitäten im Verkehrsnetz des motorisierten Individualverkehrs bereits integriert. Aufgrund der Verwendung der Pendlermatrizen als Verkehrsnachfrage sind die Kapazitäten zu verringern, da in den Pendlermatrizen nur 53% des Gesamtverkehrs betrachtet werden [ivh, 1992]. Die Kapazitäten der Straßen werden auf einen Anteil von 53% reduziert. Kosten sowie Haltezeiten im motorisierten und nicht motorisierten Individualverkehr werden vorerst nicht berücksichtigt. Auf eine Beschreibung der weiteren Modifikationen der Netzstrukturen wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Tabelle 7 verwiesen. Dort sind alle durchgeführten Modifikationen und Erweiterungen aufgeführt.

Tabelle 7: Netzmodifikationen, Großraum Hannover

Gruppe(n)	Bedingung(en)	Attribut(e)/Aktion(en)	Wert(e)
Gehwege	Bezirk -> alle	Aufenthalt	kein Umsteigen, 86400 s
	Bezirk -> Haltestelle	kürzeste Verbindung Verbindung Fußwegzeit (Geschw.)	<= 600 m 1 m/s max. 600 s
	alle	zwischen Bezirken parallel zu Straßen und Radwegen	<= 1500 m (zwischen Bezirken)
Radwege	Bezirk -> Knotenpunkt	kürzeste Verbindung Fahrrad vorbereiten	<= 2000 m immer 120 s
	Knotenpunkt -> Bezirk	kürzeste Verbindung Parallelverbindung Fahrrad abstellen	<= 2000 m immer. 120 s
	Knotenpunkt -> Knotenpunkt	Reisezeit (Fahrrad) Fahrzeit (Geschw) Fahrrad abstellen (Überstieg) Fahrrad vorbereiten (Überstieg)	gelöscht 4,1 m/s (15km/h) 86400 s 86400 s
Straßen	Bezirk -> Knotenpunkt	kürzeste Verbindung Pkw vorbereiten Fahrzeit (Geschw.) Kapazität	immer 135 s 5,5 [m/s] ~ 20 km/h 99999

Gruppe(n)	Bedingung(en)	Attribut(e)/Aktion(en)	Wert(e)
	Knotenpunkt -> Bezirk	kürzeste Verbindung Parallelverbindung Pkw abstellen Fahrzeit (Geschw.) Kapazität	immer. 180 s 5,5 m/s ~ 20 km/h 99999
	Knotenpunkt -> Knotenpunkt	Kapazität Kapazität Pkw abstellen (Überstieg) Pkw vorbereiten (Überstieg)	*1,24 (Besetzung) *0,53 (Anteil am Gesamtverkehr) 86400 s 86400 s
ÖPNV	alle	Wartezeit	(4 * 3600) / 2 / (Fahrten pro Stunde) max. 300 s

Die **Verkehrsmittelverfügbarkeit** fließt aufgrund fehlender Daten nicht in die Berechnungen ein.

Als **Berechnungsalgorithmen** werden die Verfahren verwendet, die bei der Anwendung des Untersuchungsraumes Erfurt gute Lösungsergebnisse geliefert haben. Mit Hilfe der im Zusammenhang mit dem Untersuchungsraum Erfurt ermittelten Parameter werden die weiteren Berechnungen durchgeführt.

Das Verkehrsnetz ohne weitere Modifikationen von Attributen und Faktoren wird als **Netz 0** bezeichnet. Die Tabelle 8 zeigt die berechneten Zielgrößen.

Tabelle 8: Ergebnisse, Netz 0, Großraum Hannover

Bewertungsgröße	vorh. Werte	neue Werte
Modal-Split MIV/ÖPNV/NMIV [%]	49/32/19	49/31/20
Verkehrsarbeit MIV (Matrix) [PersKm]	443438	410041
Verkehrsarbeit ÖPNV (Matrix) [PersKm]	242585	266161
Verkehrsarbeit NMIV (Matrix) [PersKm]	74147	84461

Die **Ergebnisse** zeigen, dass sich die berechneten Werte der Verkehrsaufteilung und der Verkehrsarbeiten in einem akzeptablen Rahmen bewegen. Die Unterschiede der berechneten Verkehrsnachfragematrizen sind wie auch schon beim Untersuchungsraum Erfurt auf einigen Quelle-Ziel-Beziehungen zu groß. Eine differenzierte Betrach-

tung ist durchzuführen.

Für die berechneten Verkehrsnachfragematrizen wird der **Quellverkehr** der Bezirksknoten näher untersucht. Am Beispiel des öffentlichen Personennahverkehrs werden die Anteile des öffentlichen Personennahverkehrs am Gesamtverkehr für jeden Quellbezirk betrachtet. Dabei werden der vorhandene Anteil und der berechnete Anteil gegenübergestellt. Als Gewicht werden die Einwohner des Quellbezirks herangezogen. Die Abbildung 46 zeigt die direkte Gegenüberstellung der Anteile des öffentlichen Personennahverkehrs am Gesamtverkehr. Auch wenn bei einigen Bezirken der vorgegeben Wert und der berechnete Wert voneinander abweichen, ist zu erkennen, dass im Mittel die berechneten Werte dem Verlauf der vorhandenen Werte folgen.

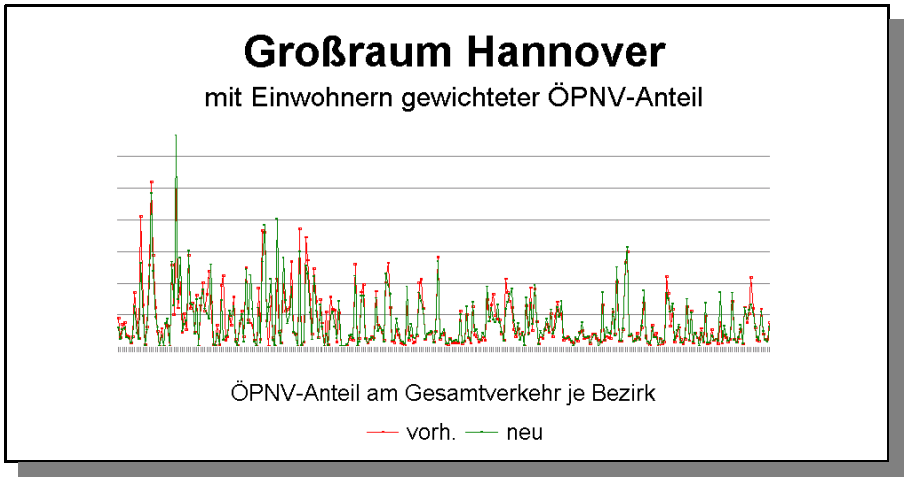

Abbildung 46: Hannover: Vergleich des öffentlichen Personenverkehrs (gewichtet)

Eine weitere Darstellungsform für die Untersuchung ist die Erstellung eines **XY-Diagramms**. Im XY-Diagramm werden die vorhandenen Anteile des öffentlichen Personenverkehrs am Gesamtverkehr den berechneten Anteilen gegenübergestellt. Der vorhandene Anteil wird auf der X-Achse eingetragen. Der berechnete Anteil wird auf der Y-Achse eingetragen. Die Schnittpunkte der Wertepaare für jeden Bezirk zeigt die Abbildung 47. Auch hier wird deutlich, dass die Werte der berechneten Verkehrsnachfrage von der vorhandenen Verkehrsnachfrage abweichen. Die Graphik zeigt aber auch, dass die berechneten Werte sich im Bereich der vorhandenen Werte befinden. Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,89 mit einer Standardabweichung von 0,02.

Eine **Erklärung für die Unterschiede** ist sicherlich der Umstand, dass zum Teil Attribute verwendet werden, die für den gesamten Untersuchungsraum einen kon-

stanten Wert besitzen. Auch können bedingt durch die vorhandenen Netzstrukturen die Einflüsse zwischen den Verkehrssystemen öffentlicher Personennahverkehr und Individualverkehr nicht modelliert werden, da die Koordinaten von Haltestellen und Knotenpunkten trotz geographischer Nähe stark voneinander abweichen. Die nicht vorhandenen Informationen über die Berücksichtigung des in der Realität vorhandenen gebrochenen Verkehrs in den vorhandenen Verkehrsnachfragematrizen bilden eine weitere Fehlerquelle bei dieser Anwendung.

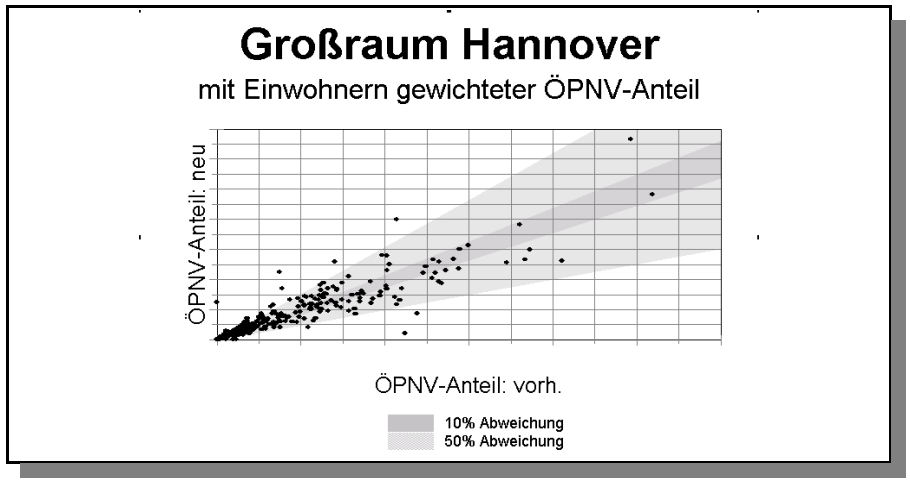

Abbildung 47: Hannover: Vergleich des öffentlichen Personenverkehrs (gewichtet, XY-Diagramm)

7.5 Zusammenfassung

Zur Anwendung des Modells werden die **Untersuchungsräume** Erfurt und Hannover herangezogen. Für die Stadt Erfurt werden die Verkehrsmittel motorisierter Individualverkehr und öffentlicher Personennahverkehr betrachtet. Im Großraum Hannover stehen die Verkehrsmittel motorisierter Individualverkehr, nicht motorisierter Individualverkehr und öffentlicher Personennahverkehr für die Anwendung zur Verfügung.

Für die Gegenüberstellung werden vier **Beurteilungsgrößen** definiert. Die erste Beurteilungsgröße ist die Verkehrsaufteilung für den gesamten Untersuchungsraum. Eine weitere Beurteilungsgröße ist die verkehrsmittelbezogene Verkehrsarbeit im gesamten Untersuchungsraum. Eine Untersuchung des Quellverkehrs für die Bezirksknoten bildet eine zusätzliche Möglichkeit, einen Gegenüberstellung durchzuführen. Die Gegenüberstellung der einzelnen Quelle-Ziel-Beziehungen zwischen der vorhande-

nen Verkehrsnachfrage und der berechneten Verkehrsnachfrage für jedes Verkehrsmittel ist die vierte Beurteilungsgröße, die bei der Anwendung untersucht wird.

Die Modellierung der **multimodalen Verkehrsnetze** erfolgt durch eine Überlagerung der verkehrsmittelbezogenen Netzstrukturen und der Verknüpfung der Netzknoten mit den Bezirksknoten. Die Bewertungen der Netzobjekte bestehen aus Zeitkomponenten (z. B. Fahren, Gehen, Halten, Warten) und Kostenkomponenten (z. B. Fahrscheinkosten, Kraftstoffpreis). Als Ergänzung zu den vorhandenen Bewertungen werden Zeitkomponenten vor Beginn und am Ende einer Fahrt mit dem Individualverkehr eingeführt.

Die **Gesamtverkehrsnachfrage** berechnet sich aus der Summe der verkehrsmittelbezogenen Verkehrsnachfragematrizen. Die Aggregation der Verkehrsnachfrage sind die Bezirksknoten.

Mit Hilfe der in Kapitel 5 und 6 entwickelten Mehrwegealgorithmen und verschiedener Verteilungsfunktionen werden die **Berechnungen** der Verkehrsbelastungen durchgeführt. Dabei werden die Einflüsse der Parameter der Mehrwegealgorithmen sowie der Verteilungsfunktionen anhand der Beurteilungsgrößen optimiert. Parallel wird auf der Basis eingeschränkter Bewertungsgrößen der neue Fuzzy-Mehrwegealgorithmus untersucht.

Die berechneten **Ergebnisse** bei Verwendung des Mehrwegealgorithmus auf der Basis einer klassisch “scharfen“ Bewertung liegen für die Beurteilungsgrößen, welche sich auf den gesamten Untersuchungsraum bzw. den Quellverkehr beziehen, im Bereich der vorhandenen Werte. Bei der Gegenüberstellung der einzelnen Quelle-Ziel-Beziehungen der Verkehrsnachfragematrizen treten zum Teil starke Unterschiede auf. Aussagen über die Ergebnisse im Rahmen des Fuzzy-Mehrwegealgorithmus beschränken sich aufgrund fehlender Daten auf eine grobe Bewertung. Es wird festgestellt, dass mit dem “unscharfen” Ansatz Ergebnisse im Bereich der zuvor berechneten Ergebnisse ermittelt werden. Eine detaillierte Überprüfung auf der Basis differenzierterer Daten ist für weitergehende Aussagen sowohl bei der Anwendung von einer klassisch “scharfen“ Bewertung als auch bei der Verwendung einer “unscharfen“ Bewertung erforderlich.

Mögliche **Gründe** für die zum Teil stark von den vorhandenen Werten abweichenden Ergebnisse sind bei den Netzstrukturen, den Verteilungsfunktionen und den vorhandenen Werten zu suchen. Die sektorale Aufnahme der Verkehrsnetze für jedes Verkehrsmittel ist auch in einem durch Überlagerung entstandenen multimodalen Verkehrsnetz zu erkennen. Analog sind auch die vorhandenen Werte mit unterschiedlichen Modellen berechnet worden, deren Modellparameter nicht vollständig bekannt sind. Eine weitere Fehlerquelle sind auch die im Rahmen dieser Arbeit als Mittelwerte angesetzte Attribute zu nennen, da sie zum Teil für den gesamten Untersuchungsraum als konstant

vorgegeben werden.

7.6 Ausblick

In diesem Kapitel werden **Bearbeitungsschritte und Maßnahmen** beschrieben, die im Rahmen einer differenzierteren Anwendung des Modells durchgeführt werden können. Hierbei werden die Verkehrsnachfrage, Netzstrukturen der Verkehrsnetze, die Verkehrsmittelverfügbarkeiten und Algorithmen angesprochen.

Bei der Berechnung der **Gesamtverkehrsnachfrage** durch die Addition verkehrsmittelspezifischer Verkehrsnachfragematrizen sollte untersucht werden, inwieweit die Fahrten im gebrochenen Verkehr, z. B. Park&Ride, in die einzelnen Nachfragematrizen integriert sind. Fehlerhafte Werte bei der Anzahl aller Fahrten für einzelne Quelle-Ziel-Beziehungen können unter Umständen vermieden werden. Alternativ kann die Gesamtverkehrsnachfrage auch durch ein Verkehrsnachfragemodell berechnet werden, welches die verkehrsmittelspezifischen Aspekte nicht zu berücksichtigen braucht. In diesem Fall ist eine Anwendung mit Hilfe von berechneten verkehrsmittelspezifischen Nachfragematrizen fraglich, da Vergleichswerte nicht vorhanden sind.

Ein anderer Ansatz zur Verbesserung der Ergebnisse mit dem neuen Modell ist die vollständige Integration der verkehrsmittelspezifischen Verkehrsnetze in einem **multimodalen Verkehrsnetz**. Verkehrsmittel, welche auf Verkehrswegen miteinander konkurrieren, sind als parallele Kanten abzubilden. Die gegenseitige Beeinflussung der Verkehrsmittel auf gemeinsamen Verkehrswegen ist durch eine entsprechende Modellierung von Attributen, die für parallele Kanten identisch sein müssen, umzusetzen.

Für die Untersuchung des neuen Fuzzy-Mehrwegealgorithmus sind für die Attribute der Netzobjekte Bewertungsbereiche zu definieren. Die Ermittlung spezifischer Funktionen für die einzelnen Verkehrsmittel, mit denen diese Bewertungsbereiche bestimmt werden können, sind zu entwickeln. Dieser Vorgang wird auch als **“Fuzzyfizierung”** bezeichnet.

Eine Verbesserung der Modellergebnisse sollte eine differenziertere Abbildung der verkehrsrelevanten Daten in Form von **gebietsabhängigen Attributen** bewirken. Neben der spezifischen Modellierung z. B. von Stellplatzsuchzeiten und Parkkosten im motorisierten Individualverkehr ist auch die Integration neuer Attribute zu bewerten. Differenzierte Kosten im öffentlichen Personenverkehr, eine Modellierung von Parkplätzen und Parkhäusern oder eine genaue Betrachtung von Vorbereitungszeiten können die Unterschiede zwischen den Ergebnissen und den vorhandenen Werten verringern.

Die **Verkehrsmittelverfügbarkeit** am Beginn einer Fahrt steht in engem Zusammenhang mit den Berechnungsergebnissen. Eine Integration von gebietsspezifischen Werten sollte bei den Modellrechnungen berücksichtigt werden.

Innerhalb dieser Arbeit sind die Attribute nur im Ansatz mit **Gewichten** in den Berechnungen berücksichtigt worden. Eine detaillierte Untersuchung der Verhältnisse von Attributen zueinander steht noch aus.

Als Konsequenz aus den veränderten Netzobjekten und Eingangsgrößen des multimodalen Verkehrsnetzes sind die verschiedenen **Wegealgorithmen und Verteilungsfunktionen** erneut zu kombinieren. Es gilt die Einflüsse der einzelnen Parameter der Algorithmen auf das Modellergebnis zu untersuchen. In diesem Zusammenhang ist auch eine Implementation und Bewertung neuer Wegealgorithmen oder Verteilungsfunktionen denkbar.

8. Zusammenfassung

Die Arbeit befaßt sich mit der Entwicklung eines integrierten Netz- und Modal-Split-Modells als objektorientiertes System. Als Teilaufgaben werden die Themenbereiche

– multimodales Netzmodell,
– alternative Wege im Verkehr,
– Mehrwegealgorithmen,
– die Verknüpfung der Bereiche zu einem integrierten Modal-Split-Modell und
– die Anwendung des Modells

behandelt. Die Lösungen der Teilaufgaben bzw. die Vorgehensweise innerhalb der Teilaufgaben werden in diesem **Kapitel** kurz umschrieben.

Mit Hilfe der Graphentheorie und der objektorientierten Modellierung wird ein **multimodales Netzmodell** in Form eines Klassenmodells definiert. Mit dem Netzmodell können der öffentliche Personenverkehr und der Individualverkehr gleichberechtigt in einer Netzstruktur abgebildet werden. Der Güterverkehr wird im Netzmodell nicht berücksichtigt. Als Ergebnis einer Analyse der Teilbereiche im Verkehrsgeschehen (Verkehrsaufkommen, Verkehrsmittel, Verkehrswege) werden für die verschiedenen Verkehrselemente Klassen modelliert. Zwischen den Klassen werden Beziehungen definiert, deren Eigenschaften durch die objektorientierte Modellierung eindeutig beschrieben werden. Die Klassen des multimodalen Netzmodells sind im Bereich des Verkehrsaufkommens

– Verkehrsaufkommen und
– Personenfahrt,

im Bereich der Verkehrsmittel

– liniengebundene öffentliche Verkehrsmittel,
– nicht liniengebundene öffentliche Verkehrsmittel,
– zu Fuß gehen,
– Fahrrad und
– Personenkraftwagen (Pkw)

und im Bereich der Verkehrswege

– Schienenwege und Weichen,
– Gehwege und Gehwegknoten,
– Straßen und Knotenpunkte sowie
– Radwege und Radwegknoten.

Die wesentlichen Beziehungen im multimodalen Netzmodell existieren zwischen den Klassen

– Verkehrsaufkommen - Personenfahrt,
– Personenfahrt - Verkehrsmittel (z. B. Fahrrad) und
– Verkehrsmittel (z. B. Fahrrad) - Verkehrswege (z. B. Radweg).

Das multimodale Netzmodell ist so konzipiert, dass es sich mit weiteren Verkehrsmitteln, Verkehrswegen und Fahrten erweitern läßt. Das hier definierte Klassenmodell bildet die Basis einer Modellierung des Personenverkehrs.

Im Gegensatz zu anderen Problemstellungen ist die Definition der k-kürzesten-Wege als eine Menge von **alternativen Wegen** zwischen zwei Knoten in verkehrlichen Anwendungen nicht anwendbar, da die Unterschiede zwischen den alternativen Wegen zum Teil zu gering sind. Als Menge von alternativen Wegen für die Verkehrsplanung werden alternativ die elementar beschränkte Wegemenge und die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge definiert.

In Abhängigkeit der Weglängen von Wegen und der Weglänge der minimalen Wege zwischen Knoten wird die **elementar beschränkte Wegemenge** bestimmt. Jede Kante im Graphen wird mit genau einem Wert “scharf” bewertet. Wird ein Weg zwischen zwei Knoten betrachtet, so ist der Weg in der elementar beschränkten Wegemenge enthalten, wenn für alle Teilwege des Weges gilt, dass die Länge des untersuchten Teilweges von der Länge des minimalen Teilweges eine maximale relative Abweichung nicht überschreitet.

Die **minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge** setzt voraus, dass die Kanten des Graphen “unscharf” mit einer Fuzzy-Zahl vom Typ LR bewertet sind. Die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge beinhaltet die im Sinne der Fuzzy-Arithmetik bestmöglichen minimalen Wege und die schlechtestmöglichen minimalen Wege.

Um die zuvor definierten Wegemengen zu bestimmen, sind entsprechende **Wegealgorithmen** zu entwickeln. Anforderungen der elementar beschränkten Wegemenge sind eine variable Anzahl alternativer Wege je Knoten und die Berücksichtigung von Teilwegen. Bei der minimalen Fuzzy-bewerteten Wegemenge ist beim Sortieren zu berücksichtigen, dass die Wegemenge nicht linear geordnet werden kann. Es wird eine Bewertung vorhandener Minimaler-Wege-Algorithmen und k-kürzester-Wege-Algorithmen durchgeführt. Das Ergebnis der Untersuchungen ist das Fehlen geeigneter Wegealgorithmen.

Ein **neuer genereller Mehrwegealgorithmus** wird zur Bestimmung der elementar beschränkten Wegemenge sowie der minimalen Fuzzy-bewerteten Wegemenge

entwickelt. Als Ausgangsalgorithmus wird ein Wegealgorithmus nach Dijkstra verwendet. Durch Ersetzen der Knoten in der Kandidatenliste durch Weg-Tupel werden in Abhängigkeit einer Entscheidungsfunktion alternative Wege bestimmt.

Der **neue elementare Mehrwegealgorithmus** wird zur Bestimmung der elementar beschränkten Wegemenge entwickelt. Durch eine Spezifikationen ausgewählter Methoden sowie der Entscheidungsfunktion des generellen Mehrwegealgorithmus werden die Wege der elementar beschränkten Wegemenge bestimmt.

Die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge wird mit einem neuen **elementaren Fuzzy-Mehrwegealgorithmus** bestimmt. Durch eine Spezifikation ausgewählter Methoden sowie der Entscheidungsfunktion des generellen Mehrwegealgorithmus werden die Wege der minimalen Fuzzy-bewerteten Wegemenge bestimmt.

Mit dem **integrierten Modal-Split-Modell** ist es möglich, ausgehend von einer Gesamtverkehrsnachfrage die Verkehrsaufteilung zu bestimmen. Aufbauend auf dem multimodalen Netzmodell und den neuen Mehrwegealgorithmen besteht das integrierte Modal-Split-Modell aus einem Kernmodell für das Verwalten multimodaler Verkehrsnetze und einem Prozessormodell zum Berechnen der multimodalen Verkehrsbelastungen und der daraus resultierenden Verkehrsaufteilung. Bei der Verkehrsaufteilung können neben dem klassischen Modal-Split auch multimodale Verkehrsmittelkombinationen ermittelt werden.

Das **Kernmodell** setzt auf das multimodale Netzmodell auf. Das Klassenmodell wird mit den Klassen

- *Attribut*,
- *Bezirk* als Spezialisierung der Klasse *Knoten* und
- *Parkplatz* als Spezialisierung der Klasse *Knoten*

erweitert. Mit der Klasse *Attribut* wird für die Klassen *Knoten, Strecke* und *Verkehrsmittel* eine individuell konfigurierbare Datenstruktur definiert, mit der den Netzobjekten beliebige Bewertungsgrößen zugeordnet werden können. Eine netzobjektübergreifende Modellierung von Attributen ist möglich. Abhängigkeiten zwischen Verkehrsmitteln, z. B. der im Stau stehende Bus, können abgebildet werden. Im Zusammenhang mit der Aggregation von Verkehrsnachfragematrizen wird für die Bezirksknoten eine entsprechende Klasse als Spezialisierung der Klasse Knoten definiert. Die Klasse *Parkplatz* als eine weitere Spezialisierung der Klasse Knoten findet im Bereich von gebrochenem Verkehr ihre Anwendung.

Das **Prozessormodell** besteht aus der Durchführung einer Verkehrsumlegung. Bestandteile des Prozessormodells sind die entwickelten Mehrwegealgorithmen zur Berechnung einer elementar beschränkten Wegemenge bzw. einer minimalen Fuzzy-

bewerteten Wegemenge und aus der Literatur entnommene Verteilungsfunktionen. Die Verkehrsumlegung baut auf einem kantenbewerteten Pfeilgraphen auf. Das multimodale Netzmodell wird in einen bewerteten Pfeilgraphen transformiert. Das Prozessormodell berechnet alternative Wege zwischen allen Knoten des Graphen und verteilt eine gegebene Verkehrsnachfrage auf die Kanten des Graphen. Aufgrund der Charakteristik multimodaler Verkehrsnetze, beziehungsbezogene verkehrsmittelspezifische Bewertungsklassen zu bilden, werden die Mehrwegealgorithmen modifiziert. Durch eine Identifikation der Kanten anstelle der Identifikation von Knoten in der Kandidatenliste werden bei der Berechnung alternativer Wege die Bewertungsklassen berücksichtigt, ohne die Bewertungen der Netzobjekte modifizieren zu müssen.

Bei der **Transformation** der Daten des Kernmodells in das Prozessormodell werden drei unterschiedliche Modellansätze verfolgt. Es besteht die Möglichkeit der Transformation in einen kantenorientierten Graphen, einen einfachen knotenorientierten Graphen oder einen erweiterten knotenorientierten Graphen. Im erweiterten knotenorientierten Graphen werden die Knoten im Gegensatz zum einfach knotenorientierten Graphen aufgelöst, um Umsteigebeziehungen und Abbiegebeziehungen abbilden zu können. Vorteile des einfachen knotenorientierten Graphen sind sein geringer Speicherplatzbedarf und die aus der reduzierten Anzahl der Elemente resultierenden Rechenzeiten. Nachteil des einfachen knotenorientierten Graphen ist die Erweiterung der Wegealgorithmen mit Bewertungsgruppen, die im Rahmen von Umsteigebeziehungen an Knoten differenziert berücksichtigt werden müssen. Der Unterschied des erweiterten knotenorientierten Graphen zum kantenorientierten Graphen ist die höhere Anzahl der Elemente im erweiterten knotenorientierten Graphen. Die Umrechnung der Attribute der Netzobjekte in die Kantenbewertungen des Graphen erfolgt über die Addition normierter Werte.

Der Abschluss der Arbeit besteht aus der **Anwendung** des Modells mit vorhandenen Daten. Es werden die Untersuchungsräume Erfurt (öffentlicher Personenverkehr und motorisierter Individualverkehr) und Großraum Hannover (öffentlicher Personenverkehr, nicht motorisierter und motorisierter Individualverkehr) herangezogen. Ausgehend von einer Gesamtverkehrsnachfrage als Addition der verkehrsmittelspezifischen Verkehrsnachfragen werden mit dem Modell die Zielwerte *Verkehrsaufteilung*, *Verkehrsarbeit* und *verkehrsmittelspezifische Verkehrsnachfrage* bestimmt und mit anderen Modellen berechneten Werten gegenübergestellt. Eine Untersuchung von gebrochenem Verkehr erfolgt aufgrund fehlender vorhandener Werte nicht. Als Aggregationen werden der Gesamtverkehr, die bezirksbezogenen Quellverkehre und die einzelnen Quelle-Ziel-Beziehungen bewertet.

Die Gegenüberstellung der berechneten Werte mit den vorhandenen Werten liefert zum größten Teil zufriedenstellende **Ergebnisse**. Während bei der Betrachtung des Gesamtverkehrs und der Quellverkehre mittlere Unterschiede in der Größenordnung von 1 - 5% vorhanden sind, liegen die Unterschiede der einzelnen Quelle-Ziel-

Beziehungen zum Teil deutlich darüber.

Gründe für die teilweise großen Unterschiede sind im Bereich der vorhandenen Netzstrukturen, Verkehrsmatrizen und der Attribute zu suchen. Durch die Überlagerung der vorhandenen verkehrsmittelspezifischen Verkehrsnetze, die unabhängig voneinander erstellt worden sind, können Abhängigkeiten zwischen Verkehrsmitteln und Verkehrswegen in dem multimodalen Verkehrsnetz nur bedingt berücksichtigt werden, da geographische Übereinstimmungen innerhalb der Netzstrukturen nur selten durch entsprechende Koordinaten widergespiegelt werden. Die Erweiterung der Bewertungen erfolgt zum Teil mit über den gesamten Untersuchungsraum konstanten Werten. Abhängigkeiten zwischen den Attributen in Form von Prioritäten werden nur ansatzweise durchgeführt. Inwieweit der gebrochene Verkehr in die vorhandenen verkehrsmittelspezifischen Verkehrsnachfragematrizen eingegangen ist und welche Auswirkungen dies auf die Ergebnisse hat, ist aufgrund fehlender Informationen nicht bekannt.

Als **Ausblick** ist festzuhalten, dass eine detaillierte Überprüfung des Modells durch Variation der verschiedenen Modellgrößen

- multimodales Netzmodell,
- Attribute,
- Wegealgorithmen,
- Verteilungsfunktionen und
- Gewichtung von Attributen

noch aussteht. Voraussetzung für diese Untersuchungen ist eine differenzierte Aufnahme und Modellierung von multimodalen Verkehrsnetzen mit ihren Netzobjekten und Attributen.

Literaturverzeichnis

[1] Anez, J., Barra, T. de la, Pérez, B., Dual Graph Representation of Transport Networks, modelistica systems and planning, Caracas, Venezuela, 1995

[2] Arndt, K., Entwicklung eines Verfahrens zur Abschätzung einer potentiellen P + R-Nachfrage im Berufsverkehr, Schriftenreihe Verkehr, Heft 4, Fachgebiet Verkehrssysteme und Verkehrsplanung, Universität Gh Kassel, 1993

[3] de Azevedo, J.A., Madeira, J.J., Martins, E.Q. Pires, F.M. A shortest path ranking problem, AIRO '90, Models and Methods for Decision Support, Sorrento (Italy), Proceedings of the Annual Conference, Associazione Italiana di Ricerca Operativa, 1990

[4] Barra, T. de la, Pérez, B., Anes, J., Multidimensional Path Search and Assignment, modelistica systems and planning, Caracas, Venezuela, 1993

[5] Barra, T. de la, Improved logit formulations for integrated land use, transport and environmental models, modelistica systems and planning, Caracas, Venezuela, 1994

[6] Baumann, J. H., Verkehrsmodell, Grundlagen und Methoden, GEOMOD, Modelle und Methoden der Geographie und Regionalforschung, Heft 3, Universität Bremen, 1984

[7] Brandstädt, A., Graphen und Algorithmen, B.G. Teubner Stuttgart, 1994

[8] Bierschenk, H., Ökonometrisches Verkehrsnachfragemodell mit räumlicher Übertragbarkeit, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, 1982

[9] Bierschenk, H., Keppeler, B., Wirkungsweise der Parameter belastungsabhängiger Gleichgewichtsmodelle zur Verkehrsumlegung, 1988

[10] Brög, W. Entwicklung der Mobilität unter veränderten Bedingungen der Bevölkerungs-, Siedlungs- und Verkehrsstruktur, Teil I, Verkehr & Technik, Heft 1, 1992

[11] Budelmann, H., Veröffentlichungen des Instituts für Stadtbauwesen, Technische Universität Braunschweig, 1981

[12] Bundesministerium für Verkehr (BMV), Forschung Stadtverkehr, Reihe Auswertungen - Modal-Split, Heft A1, 1984

[13] Bundesministerium für Verkehr (BMV), Forschung Stadtverkehr, Reihe Auswertungen - Ermittlung der Verkehrsnachfrage, Heft A4, 1988

[14] Bundesminister für Verkehr (BMV), Ermittlung verkehrsspezifischer Kostenansätze in den neuen Bundesländern, FE.70414/93, 1995

[15] Bundesminister für Verkehr (BMV), Institut für Stadtbauwesen, Technische Universität Braunschweig, Modelltypen zur Verkehrsprognose und ihre Einsatzfelder, 1990

[16] Bundesverband der Park- und Garagenhäuser e.V., Auswertung der Erhebung der Einstellpreise zum 1.4.1996, 1996

[17] Clarke, S., Krikorian, A., Rausen J., Computing the N best loopless paths in a network, Journal of SIAM 11, 1963

[18] Conrad, U., Wegewahlverhalten von Fahrradfahrern zur Ermittlung von Belastungen städtischer Radverkehrsnetze, Institut für Stadtbauwesen, Technische Universität Braunschweig, 1995

[19] Damrath, R., Manuskript: Relationenalgebra, Institut für Bauinformatik, Universität Hannover, 1997

[20] Damrath, R., Olbrich, M., Objektorientierte Methoden, Institut für Bauinformatik, Universität Hannover, 1995

[21] Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) Berlin, Verkehr in Zahlen 1993, Bundesminister für Verkehr, Bonn, 1994

[22] Dial, R., A Probabilistic Multipath Assignment Model that Obviates Path Enumeration, Transportation Research 5, pp 83-111, 1971

[23] Dijkstra, E. W., A note on two problems in connexion with graphs, Numerisce Mathematik 1, Springer, Berlin, 1959

[24] Eppstein, D., Finding the k Shortest Paths, Departement of Information and Computer Science, University of California, Irvine, Tech. Report 94-26, 1994

[25] Erfurter Verkehrsbetriebe AD, Fahrplan der EVAG, 1991/1992

[26] Floyd, R.W., Algorithm 97 - shortest paths, Communications of the ACM 5, Nr. 6,

1962

[27] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Forschung im Straßenbau, Zusammenstellung laufender und abgeschlossener Forschungsarbeiten, 1996

[28] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Verlagerungspotentiale des städtischen motorisierten Individualverkehrs, Pilotstudie, 1994

[29] Heck, H.-M., Anwendung von Optimierungsverfahren beim Entwurf und bei der Gestaltung von städtischen Straßennetzen und Berücksichtigung des Betriebs, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (SVT), Heft 492, 1986

[30] Heck, H.-M., Datenmodell ALINet, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, 1988

[31] Henning, K., Saß, H., Müller, K., Umweltbelastung durch den Einsatz informationstechnologischer Netzwerke im intermodalen Verkehr, Lehrstuhl Informatik im Maschinenwesen, RWTH Aachen, 1996

[32] Heun, V., Scriptum zur Vorlesung Grundlegende Algorithmen, Lehrstuhl für Effiziente Algorithmen, Fakultät für Informatik, Technische Universität München, 1997

[33] Heusch/Boesefeldt GmbH, Aachen - TransTec, Hannover, Entwurf für das move-Konzept, Stand 10/92, 1992

[34] Hoffman, W., Pavley, R., A Method for the Solution of the Nth Best Path Problem, Journal of the ACM 6, Nr. 4, 1959

[35] Hüttermann, R., Script: Graphen im Bauingenieurwesen, Institut für Bauinformatik, Universität Hannover, 1997

[36] Institut für Stadtbauwesen, Technische Universität Braunschweig, Modelltypen zur Verkehrsprognose und ihre Einsatzfelder, 1990

[37] Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau (ivh), Vorlesungsskript Verkehrswesen und Städtebau, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, 1989

[38] Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau (ivh), Verkehrsbeziehungen im Raum Hannover, Ermittlung der Verkehrsnachfrage für den öffentlichen Nahverkehr und den Individualverkehr, Institut für Verkehrswirtschaft,

Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, 1992

[39] INTER-VLUS-DRESDEN, Interdisziplinäre Forschungsgruppe, Intermodales Verkehrsleitsystem Ballungsraum "Dresden/Oberes Elbtal", Band 2, Schnittstellengestaltung für das intermodale Personenverkehrsmanagement, Projektphase II, 1994

[40] INTER-VLUS-DRESDEN, Interdisziplinäre Forschungsgruppe, Intermodales Verkehrsleitsystem Ballungsraum "Dresden/Oberes Elbtal", Band 1, Szenarioanalyse alternativer Integrations- und Leitstrategien, Projektphase II, 1994

[41] IVV-Aachen, Dialogfähige Planungsinstrumente auf der Basis vereinfachter Modelle, Teil A: Anforderungen und Ansätze, Schlußbericht, Institut für Stadtbauwesen, RWTH Aachen, Ingenieurgruppe IVV-Aachen, 1985

[42] Klemm, M. O., Welche Mobilität haben wir?, Stadtforschung aktuell, Band 59, Birkhäuser Verlag, 1996

[43] Krämer, T., Der Modal-Split im Personenfernverkehr, Verkehrswissenschaftliches Institut der Rhein.-Westf. Technischen Hochschule Aachen, 1992

[44] Landeshauptstadt Hannover, Schriften zur Stadtentwicklung 70, Siedlung und Verkehr, 1994

[45] Mack, M., Untersuchung von effizienten Algorithmen zur Bestimmung der k-kürzesten Wege innerhalb von ÖPNV-Verkehrsnetzen, Nr. 1374, Institut für Informatik, Universität Stuttgart, 1996

[46] Minieka, E., On Computing Sets of Shortest Paths in a Graph, Communications of the ACM 17, Nr. 6, 1974

[47] Moore, E. F., The Shortest Path Through a Maze, Proceedings of the International Symposium on the Theory of Switching, The Annals of the Computing Laboratory of Harvard University 30, Part II, Havard University Press, 1959

[48] Neyer, G., Schlickenrieder, W., Wagner, D., Weihe, K., A Demonstration Package for Algorithms on Planar Networks, Konstanzer Schriften in Mathematik und Informatik, Nr. 5, Fakultät für Mathematik und Informatik, Universität Konstanz, 1996

[49] Oppenheim, N., Urban travel demand modeling, Departement of Civil Engineering, City University of New York, Wiley-Interscience Publication, 1994

[50] Pahl, P. J. , Bauingenieurmethoden, Technische Universität Berlin, Institut für Bauinformatik, Universität Hannover, 1994

[51] PTV Planungsbüro Transport und Verkehr GmbH, Karlsruhe, Optimierung der Struktur städtischer Straßen- und Liniennetze, Forschungsbericht FE-Nr. 70 112/85, Band I Methoden, 1990

[52] PTV Planungsbüro Transport und Verkehr GmbH, Karlsruhe, Optimierung der Struktur städtischer Straßen- und Liniennetze, Forschungsbericht FE-Nr. 70 112/85, Band II Anwendungsbeispiele, 1990

[53] Queiros Vieira Martins, E. de, Braz Pascoal, M. M., Santos, J. L. E. dos, A new algorithm for ranking loopless paths, Departamento de Mathematica, Universidade de Coimbra, Portugal, 1997

[54] Rose, M., Kritische Analyse von Routenverfahren, Studienarbeit, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, 1996, 1

[55] Rose, M., Modellierung von hierarchischen Graphensystemen, Institut für Bauinformatik, Universität Hannover, 1996, 2

[56] Schmidtke, Y., Ein effektiver wegorientierter Algorithmus zur Lösung des stochastischen Gleichgewichtsumlegungsproblems, Dissertation, Fachbereich Mathematik / Informatik, Universität Bremen, 1993

[57] Schnüll & Haller, Ingenieurgemeinschaft, Institut Mensch und Region, Verkehrsentwicklungsplan Erfurt, Teilband 1, Ergebnisbericht, 1993

[58] Schittenhelm, H., Ein effektiver wegorientierter Algorithmus zur Lösung des kombinierten Verkehrsverteilungs- und Umlegungsproblems, Dissertation, Fachbereich Mathematik / Informatik, Universität Bremen, 1992

[59] Sedgewick, R., Algorithmen, Addison-Wesley Publishing Company, 1992

[60] Spiess, H., A Logit Parking Choice Model with Explicit Capacities, EMME/2 Support Center, 1996

[61] Spiess, H., Transit Equilibrium Assignment based on Optimal Strategies: An Implementation in EMME/2, EMME/2 Support Center, 1993

[62] Socialdata, ÜSTRA Hannover, PAW Hannover, Mobilitätsverhalten, Tabellenband, 1990

[63] Steierwald, G., Künne, H.-D., Stadtverkehrsplanung, Grundlagen, Methoden, Ziele, Springer Verlag, Heidelberg, 1994

[64] Thomas, J., Das Telematik-Systemangebot der Industrie, Straßenverkehrstechnik 4/95, 1995

[65] Thomas, R., Traffic Assignment Techniques, Centre of Transport Studies, Departement of Civil Engineering, University of Salford, Avebury Technical, 1991

[66] Thrams, T., Dokumentation des Programmsystems DIALIV, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, 1984

[67] Treinies, N., Ein Individualverhaltensmodell der Nachfrage im Personenfernverkehr auf der Basis von Zustandsgrößen von Personengruppen, Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, 1985

[68] Walther, K., Oetting, A., Vallée, D., Heft 52, Simultane Modellstruktur für die Personenverkehrsplanung auf der Basis eines neuen Verkehrswiderstandes, Verkehrswissenschaftliches Institut, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Februar 1997

[69] Waschke, T., Verhaltensändernde Einflüsse auf die Verkehrsmittelbenutzung, Daimler-Benz AG, Forschung und Entwicklung, 1984

[70] Yen, J.Y., Finding the k shortest loopless paths in a network, Management Science 17, Nr. 11, 1971

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vier-Stufen-Modell, klassisch 2
Abbildung 2: Vier-Stufen-Modell, AMBOS 3
Abbildung 3: Modellübersicht, AMBOS 4
Abbildung 4: Vier-Stufen-Modell 7
Abbildung 5: Bezirke im Untersuchungsraum 8
Abbildung 6: Vier-Stufen-Modell, klassisch 9
Abbildung 7: Quelle-Ziel-Matrix 11
Abbildung 8: Verkehrsmittelspezifische Nachfragematrizen 12
Abbildung 9: Verkehrsnetz 15
Abbildung 10: Darstellung: Klasse 20
Abbildung 11: Darstellung: Assoziation 21
Abbildung 12: Darstellung: assoziierte Klasse 21
Abbildung 13: Darstellung: Aggregation 22
Abbildung 14: Darstellung: Generalisierung, Spezialisierung 23
Abbildung 15: schlichter Graph 25
Abbildung 16: Pfeilgraph 26
Abbildung 17: Verkehrsgeschehen: Elemente und deren Beziehungen 29
Abbildung 18: Verkehrsaufkommen: Klassifizierungen und deren Beziehungen 30
Abbildung 19: Verkehrsmittel: Klassifizierungen und deren Beziehungen . . . 31
Abbildung 20: Verkehrswege: Klassifizierungen und deren Beziehungen 34
Abbildung 21: Multimodale Netzmodellierung: Klassenmodell 40
Abbildung 22: “Kleiner” Umweg und “großer” Umweg 48
Abbildung 23: Funktion μ der Fuzzy-Zahl a 50
Abbildung 24: Addition von Fuzzy-Zahlen 51
Abbildung 25: Minimumoperation zweier Fuzzy-Zahlen 52
Abbildung 26: Wegebeispiel: Wegenetz mit Kantenlängenbereichen 58
Abbildung 27: Wegebeispiel: minimale Wege 59
Abbildung 28: Wegebeispiel: einfach beschränkte Wege, α=1,31 59
Abbildung 29: Wegebeispiel: einfach beschränkte Wege, α=1,99 60
Abbildung 30: Wegebeispiel: elementar. beschränkte Wege, α=1,31 60
Abbildung 31: Wegebeispiel: elementar. beschränkte Wege, α=1,99 61
Abbildung 32: Wegebeispiel: min. Fuzzy-bewertete Wege 61
Abbildung 33: Funktionsmodell: Mehrwegealgorithmus mit Kandidatenliste . . 74
Abbildung 34: Beziehungen der Klasse Attribut 89
Abbildung 35: Liniengebundene Modellierung: Kanten 91
Abbildung 36: Liniengebundene Modellierung: Identifikatoren 91
Abbildung 37: Modellierung von Parallelverkehr 93
Abbildung 38: Klasse Parkplatz 94
Abbildung 39: Klasse Bezirk 95

Abbildung 40: Mögliche Umsteigevorgänge bei zwei Linien 98
Abbildung 41: Knoten-/Kantenmodell: Gegenüberstellung 100
Abbildung 42: Knotenmodell/Kantenmodell: Vergleich der Anzahl der Knoten und Kanten 101
Abbildung 43: Anteile der Bewertung 106
Abbildung 44: Erfurt: Vergleich des öffentlichen Personenverkehrs (gewichtet) 143
Abbildung 45: Erfurt: Vergleich des öffentlichen Personenverkehrs (gewichtet, XY-Diagramm) 144
Abbildung 46: Hannover: Vergleich des öffentlichen Personenverkehrs (gewichtet) 149
Abbildung 47: Hannover: Vergleich des öffentlichen Personenverkehrs (gewichtet, XY-Diagramm) 150
Abbildung 48: Beispiel MIV: Ausgangssituation 176
Abbildung 49: Beispiel MIV: kantenorientierter Graph 177
Abbildung 50: Beispiel MIV: einfach knotenorientierter Graph 178
Abbildung 51: Beispiel ÖPV: Ausgangssituation 179
Abbildung 52: Beispiel ÖPV: kantenorientierter Graph 180
Abbildung 53: Beispiel ÖPV: einfach knotenorientierter Graph 181
Abbildung 54: Programmsystem AMBOS, Benutzeroberfläche 182
Abbildung 55: Programmsystem AMBOS, Dateneditor 183
Abbildung 56: Programmsystem AMBOS, Verkehrsbelastungen 184
Abbildung 57: Programmsystem AMBOS, Auswertungen 185

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mögliche Verkehrsmittelkombinationen 90
Tabelle 2: Normieren von Attributen: Vorgehensweise 105
Tabelle 3: Konstante Netzattribute 137
Tabelle 4: Netzmodifikationen, Stadt Erfurt 141
Tabelle 5: Ergebnisse, Netz 0, Stadt Erfurt 142
Tabelle 6: Ergebnisse, Netz 0, Stadt Erfurt, Verkehrsmittelverfügbarkeiten . 142
Tabelle 7: Netzmodifikationen, Großraum Hannover 147
Tabelle 8: Ergebnisse, Netz 0, Großraum Hannover 148
Tabelle 9: Modal-Split-Kriterien und deren Umsetzung im integrierten Modal-Split-Modell 173

Verzeichnis der Programmtexte

Programmtext 1: Genereller Mehrwegealgorithmus: Klassendefinitionen 75
Programmtext 2: Genereller Mehrwegealgorithmus: Programmablauf 76
Programmtext 3: Genereller Mehrwegealgorithmus: Spezifikation, minimale Wege 79
Programmtext 4: Genereller Mehrwegealgorithmus: Spezifikation, einfach relativ beschränkte Wege 81
Programmtext 5: Genereller Mehrwegealgorithmus: Spezifikation, elementar beschränkte Wege 82
Programmtext 6: Genereller Mehrwegealgorithmus: Spezifikation, minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge 84
Programmtext 7: Vereinfachte Entscheidungsfunktion 109

Ein integriertes Netz- und Modal-Split-Modell als objektorientiertes System

Anhang

Inhaltsverzeichnis

Anhang A: Modal-Split-Kriterien

Anhang B: Netztransformationen in einfache knotenorientierte und kantenorientierte Pfeilgraphen

Anhang C: Kurzbeschreibung des Programmsystems AMBOS

Anhang D: Lebenslauf

Anhang A

Modal-Split-Kriterien

Tabelle 9: Modal-Split-Kriterien und deren Umsetzung im integrierten Modal-Split-Modell

Einflußkriterien	Netzmodell	Randbedingung		nicht berück-sichtigt
		Verkehrs-nachfrage	Sonstige	
Alter		●		
Geschlecht		●		
Nationalität		●		
Bildungsniveau		●		
Erwerbstätigkeit		●		
Stellung im Beruf		●		
Einkommen		●		
Haushaltsstruktur		●		
Pkw-Verfügbarkeit / Motorisierungsgrad			●	
subjektive Einflüsse	❍ (z. T.)			
Verkehrszweck		●		
Weglänge / Reiseweite	●			
Zeitpunkt der Fahrt	●	●		
Gruppenentscheidung				●
Direktheit	●			
Sicherheit	❍ (z. T.)			
Erlebnisqualität				●
Erreichbarkeit von Haltestel-len	●			

Einflußkriterien	Netzmodell	Randbedingung		nicht berück-sichtigt
		Verkehrs-nachfrage	Sonstige	
Bedienungshäufigkeit	●			
Beförderungsgeschwindig-keit	●			
Stellplatzverfügbarkeit	●			
Kosten	●			
Reisezeit	●			
Parkplatzsuchzeit	●			
Umsteigehäufigkeit	●			
Abstellkosten	●			
Zeitbudget				●
Erreichbarkeit	●			
Haltestellendichte	●			
Lagegunst	●			

Anhang B

Netztransformationen

Die folgenden Abbildungen zeigen die Modellierung des motorisierten Individualverkehrs und des öffentlichen Personenverkehrs. In der Ausgangssituation werden in einem knoten- und kantenbewerteten Graphen für alle betroffenen Netzelemente ausgewählte Einflußgrößen spezifiziert. Es schließen sich die Modellierungen der Einflußgrößen in Form eines kantenbewerteten kantenorientierten Graphen und eines kantenbewerteten einfachen knotenorientierten Graphen an.

Die folgenden sechs Abbildungen zeigen

- die Ausgangssituation beim motorisierten Individualverkehr,
- den kantenorientierten Graphen für den motorisierten Individualverkehr,
- den (einfach) kontenorientierten Graphen für den motorisierten Individualverkehr,

- die Ausgangssituation beim öffentlichen Personenverkehr,
- den kantenorientierten Graphen für den öffentlichen Personenverkehr und
- den (einfach) kontenorientierten Graphen für den öffentlichen Personenverkehr.

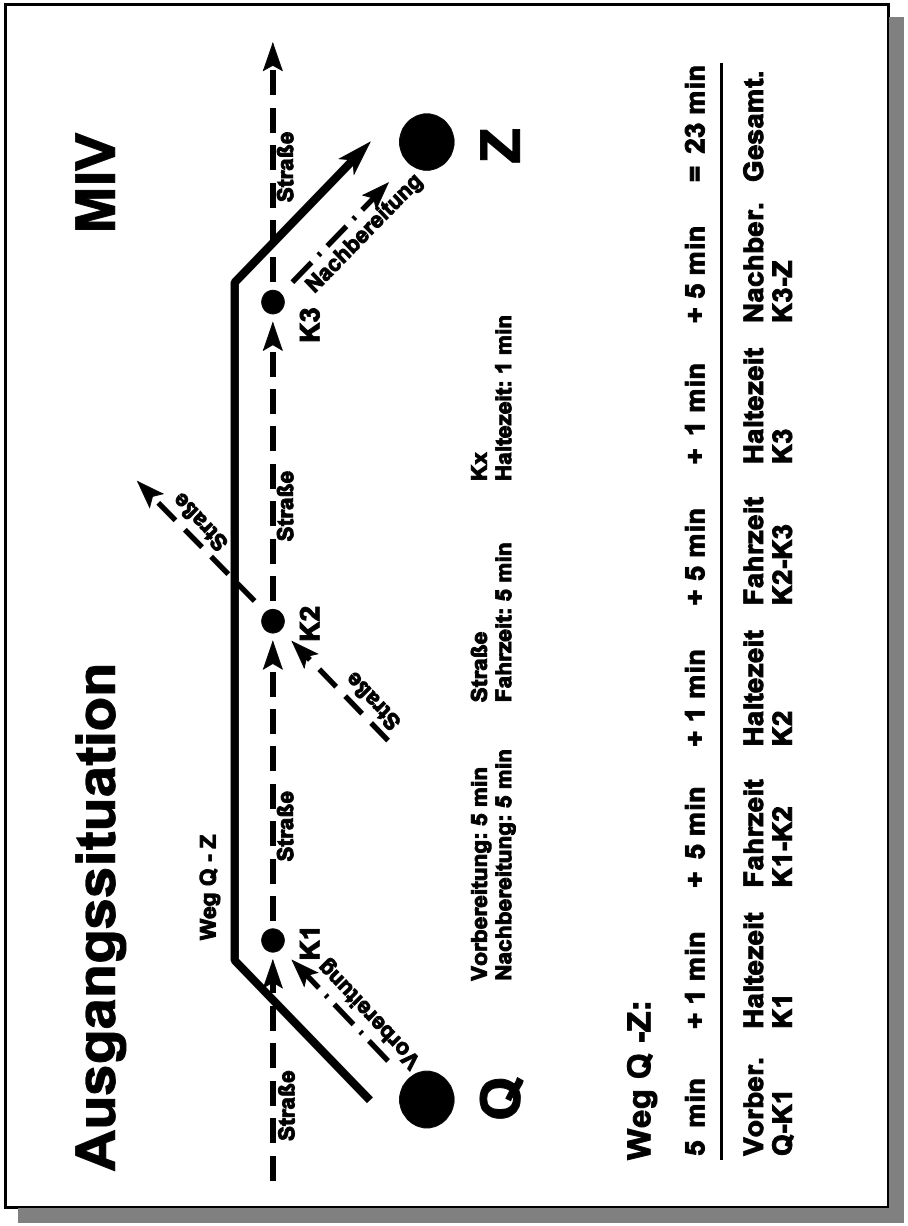

Abbildung 48: Beispiel MIV: Ausgangssituation

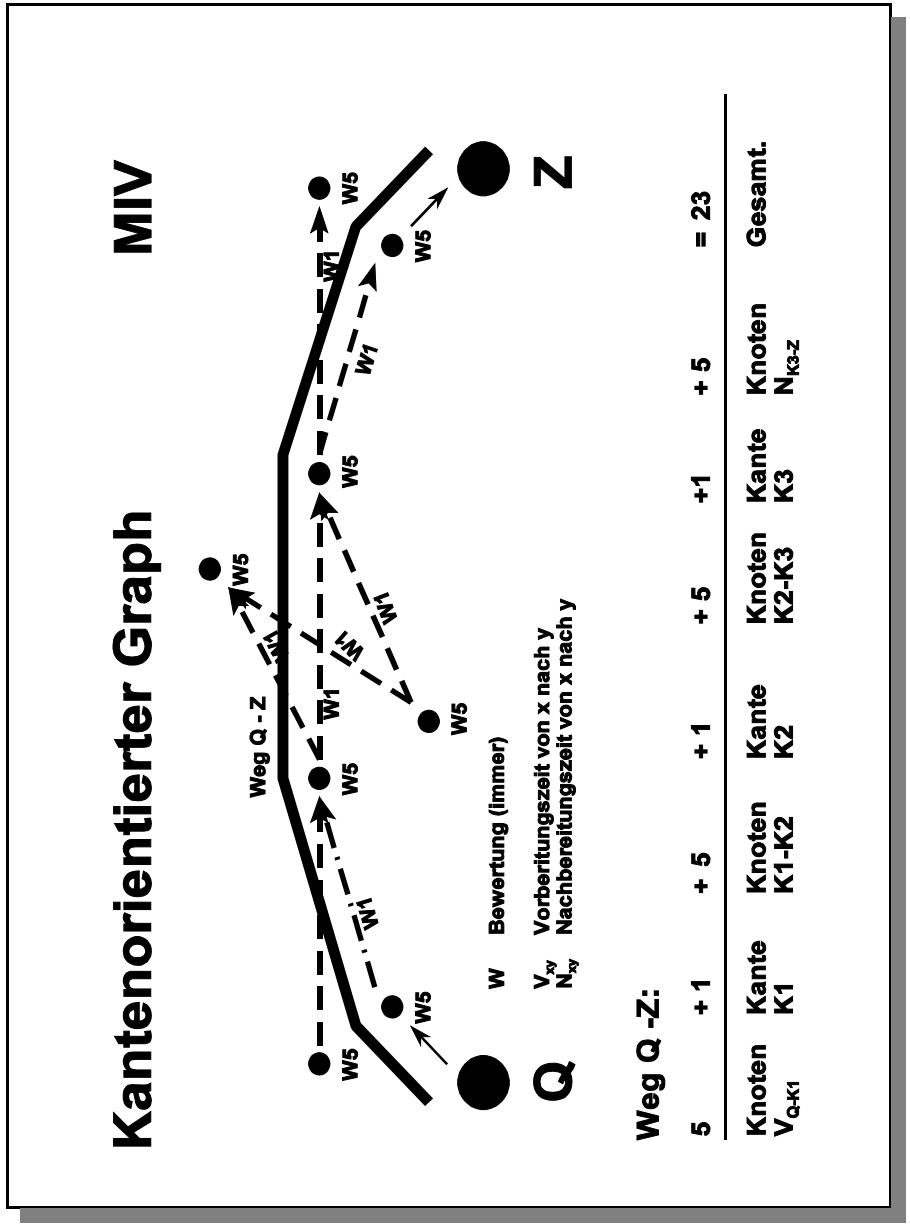

Abbildung 49: Beispiel MIV: kantenorientierter Graph

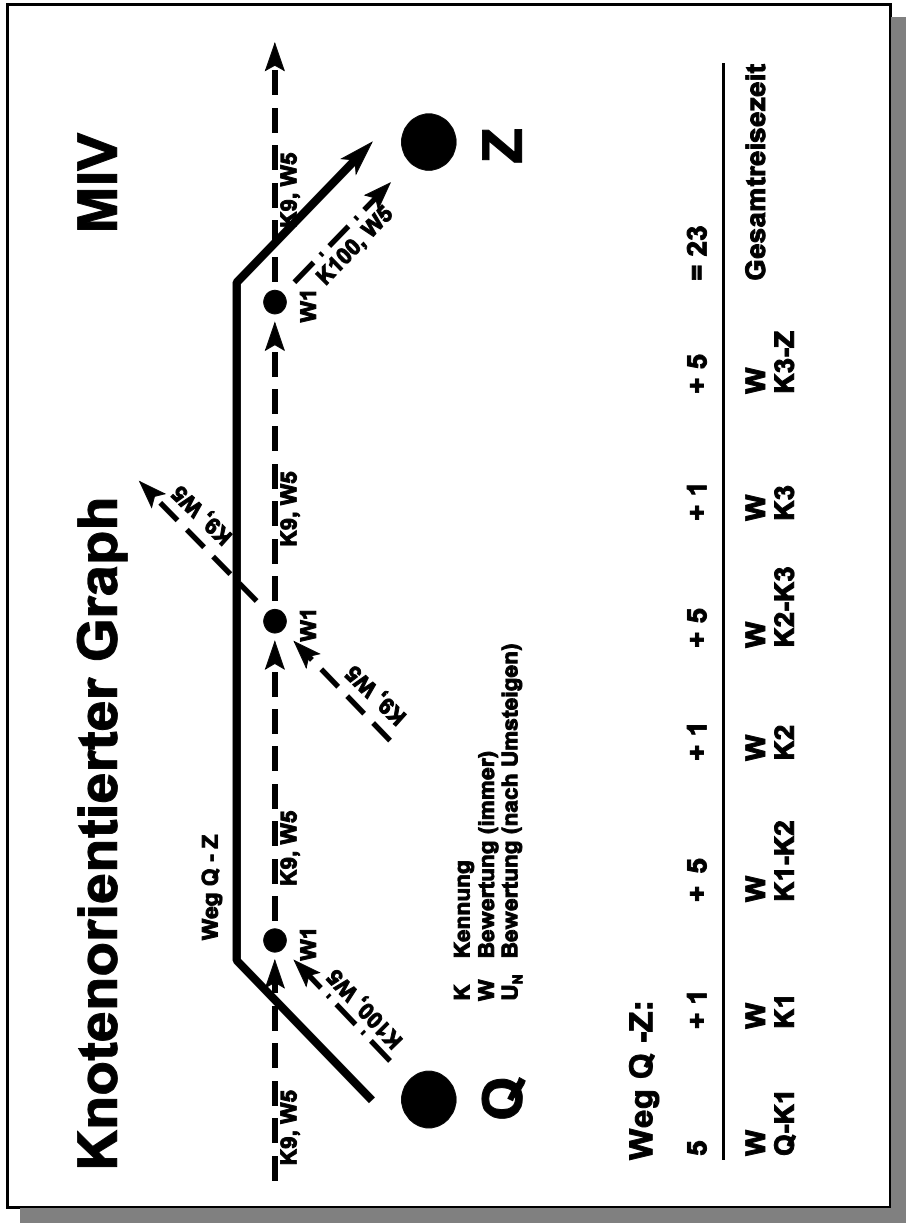

Abbildung 50: Beispiel MIV: einfach knotenorientierter Graph

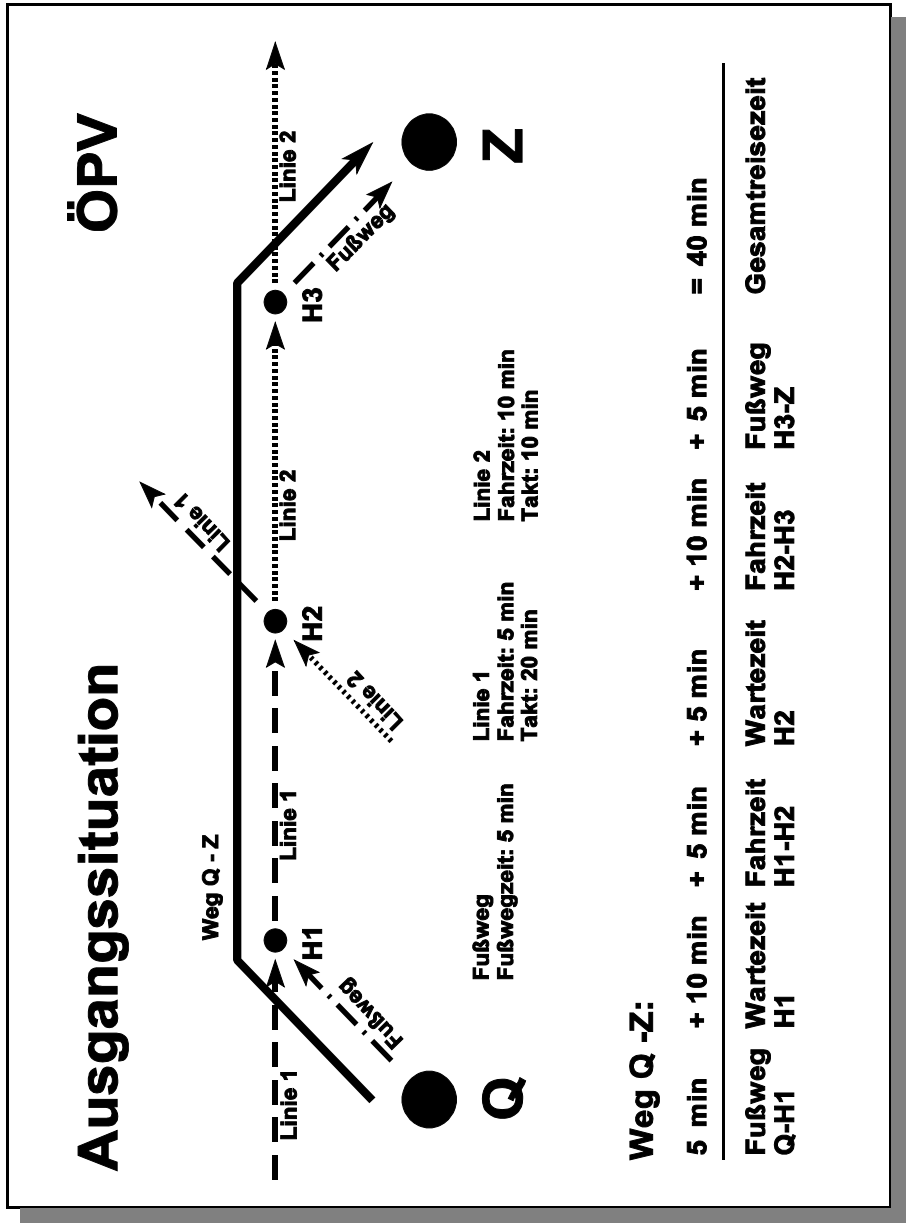

Abbildung 51: Beispiel ÖPV: Ausgangssituation

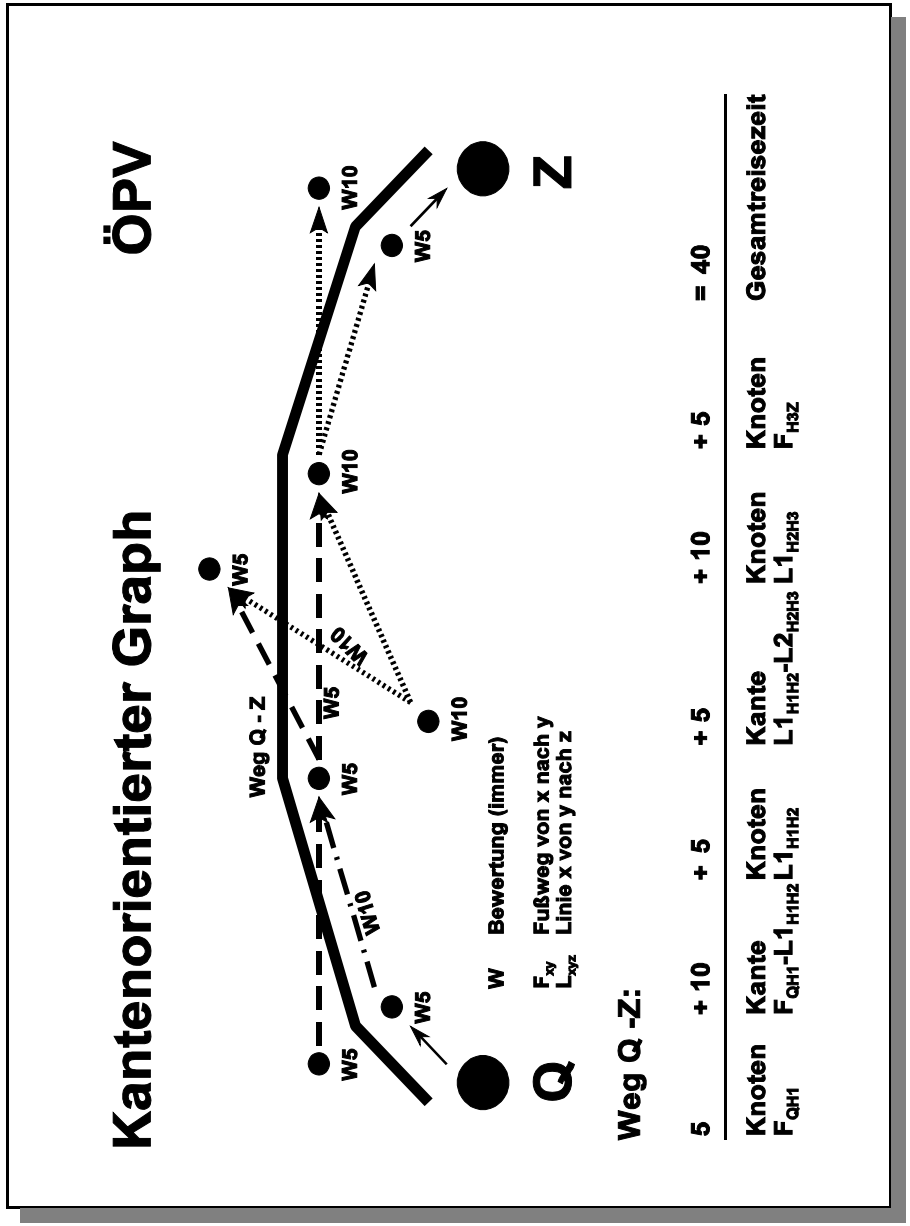

Abbildung 52: Beispiel ÖPV: kantenorientierter Graph

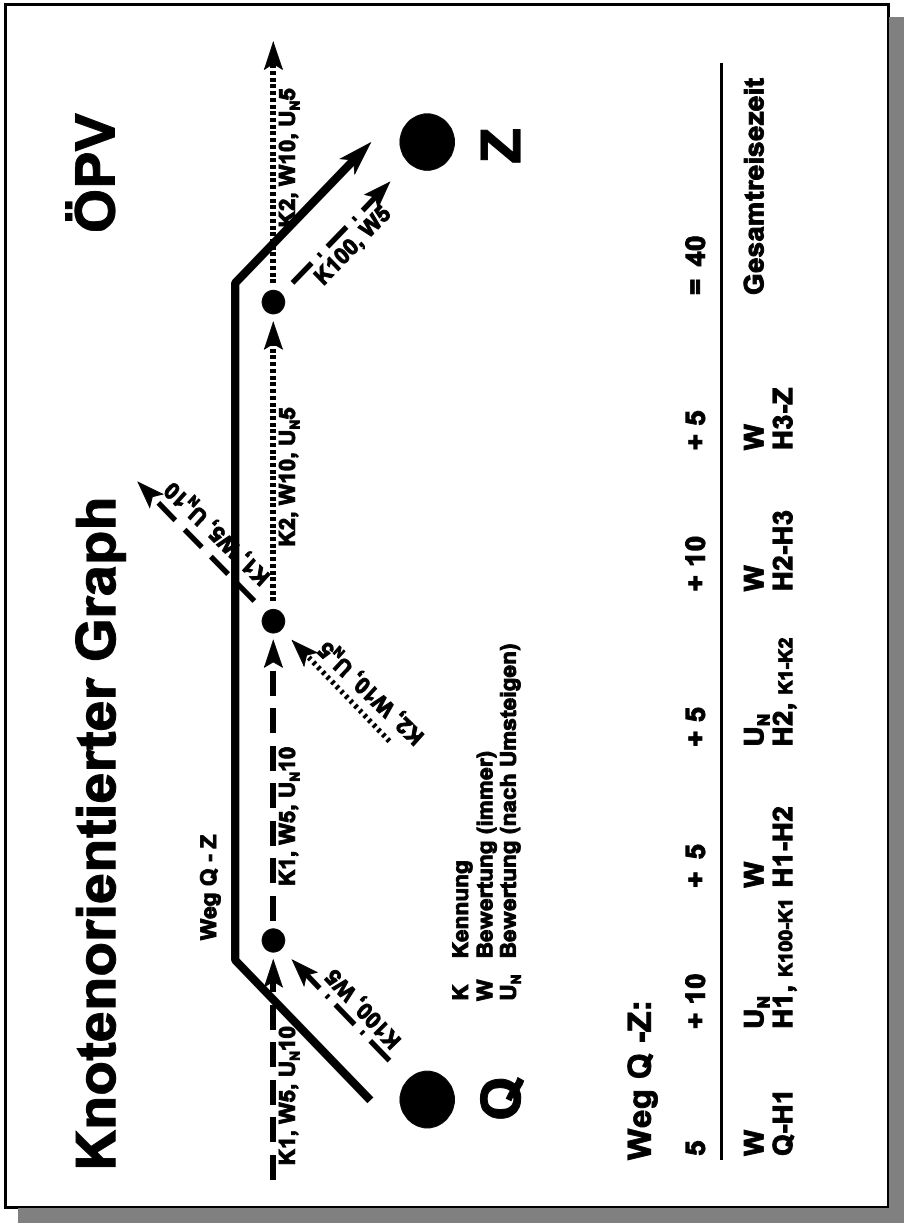

Abbildung 53: Beispiel ÖPV: einfach knotenorientierter Graph

Anhang C

Kurzbeschreibung des Programmsystems AMBOS

Im Rahmen der Anwendung des integrierten Modal-Split-Modells ist das Programmsystem (AMBOS) entwickelt worden. Die Aufgaben des Programms sind

- das Bearbeiten der Netzdaten,
- das Durchführen einer multimodalen Verkehrsumlegung,
- das Darstellen von Netzdaten und Ergebnissen und
- das Bewerten der berechneten Ergebnisse.

Als Rechnerplattform ist ein Personal Computer unter dem Betriebssystem Windows ausgewählt worden.

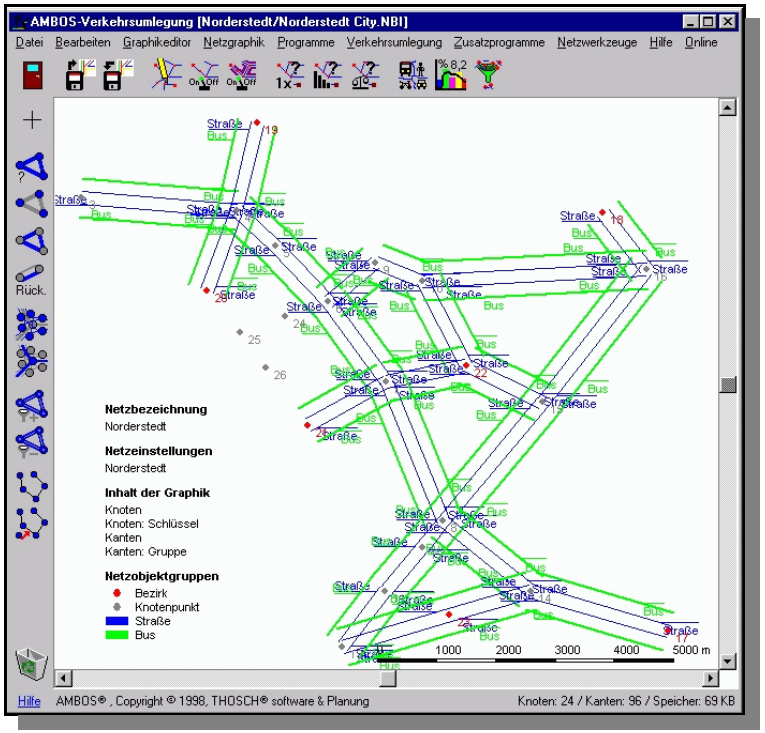

Abbildung 54: Programmsystem AMBOS, Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche besteht aus einer Netzgraphik, einem Hauptmenü sowie Menüleisten mit den wichtigsten Programmfunktionen. Die Netzgraphik stellt das aktuelle Verkehrsnetz und die berechneten Verkehrsbelastungen in Form von Knoten- und Kantenbelastungen oder einer Matrixspinne dar. Das Hauptmenü beinhaltet alle Programmfunktionen. Innerhalb der Menüleisten können spezielle Module gestartet werden. Zu den Programmfunktionen zählen u.a. das Erstellen von Listen, das Berechnen verkehrsmittelspezifischer Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmatrizen sowie die Modifikation der Netzobjekte mit Hilfe von Netzwerkzeugen.

Über den Dateneditor können die Netzobjekte, Knoten und Kanten, und die Attribute erzeugt, bearbeitet und gelöscht werden. Die Netzobjekte werden Netzobjektgruppen und Verkehrsmitteln zugeordnet, auf deren Basis Umsteigevorgänge berücksichtigt und die Verkehraufteilung bestimmt werden. Für jedes Netzobjekt erfolgt eine individuelle Definition von Attributen, deren Werte mit Hilfe von spezifischen Funktionen berechnet werden und die zur Bestimmung der Weglängen innerhalb der Verkehrsumlegung herangezogen werden.

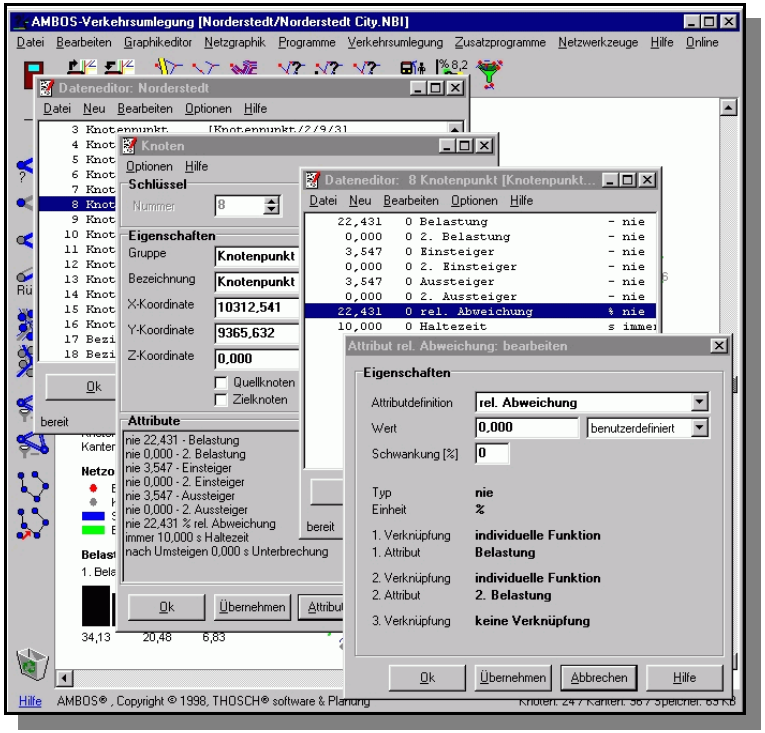

Abbildung 55: Programmsystem AMBOS, Dateneditor

Durch die objektorientierte Modellierung und die offenen Datenstrukturen werden die Bedeutungen von Netzobjekten und Attributen durch den Benutzer festgelegt. Bei der Untersuchung von Verkehrsnetzen existieren in diesem Modell keine Beschränkungen auf spezifische Verkehrselemente oder Bewertungsgrößen. Verknüpfungen zwischen Attributen eines Netzobjekts sowie zwischen jeweils zwei Netzobjekten sind möglich. Aus dem Verkehrsbereich werden Netzobjektklassen (z. B. Radweg) mit voreingestellten Sätzen von Attributen bereitgestellt.

Die Verkehrsbelastungen werden in Form von Knoten- und Kantenbelastungen berechnet. Als Ergebnis werden für jedes Netzobjekt die Werte Besetzung (Belastung), Einsteiger und Aussteiger bestimmt. Es stehen Wegealgorithmen zur Bestimmung verschiedener Wegemengen (u.a. kürzester Weg und einfach beschränkte Wege) und mehrere Verteilungsfunktionen (u.a. Kirchhoff und Logit) zur Auswahl.

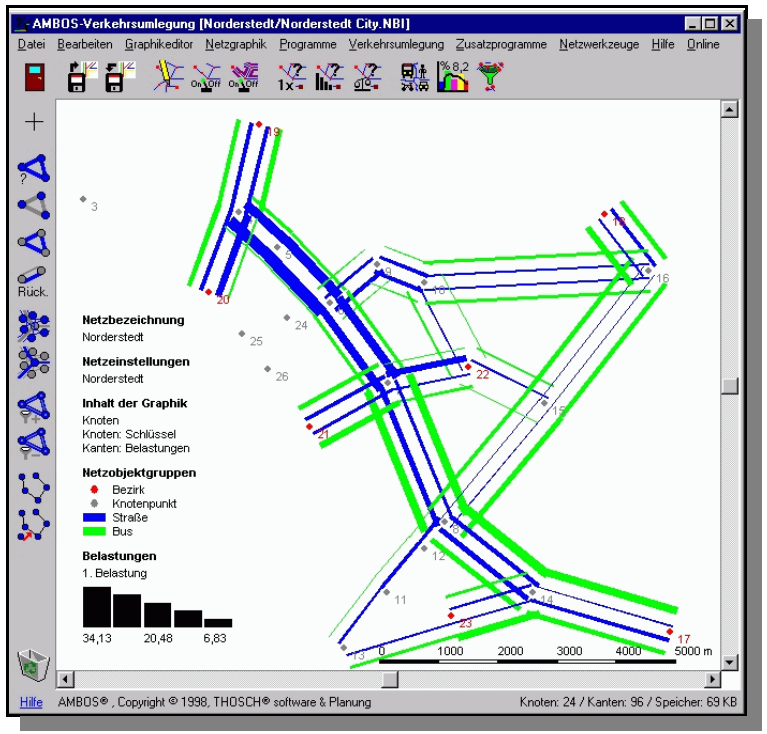

Abbildung 56: Programmsystem AMBOS, Verkehrsbelastungen

Die Belastungen werden in Form von Attributen innerhalb der Netzobjekte vorgehalten und können somit mit anderen Attributen für Auswertungen verknüpft werden.

Die anhand der berechneten Verkehrsbelastungen entstandene Verkehrsaufteilung kann mit einem speziellen Modul angezeigt werden. Verkehrsaufteilungen von Teilbereichen des Netzes können bestimmt werden. Mit Hilfe des Datenfilters besteht die Möglichkeit, Selektionen von spezifischen Teilbereichen des Verkehrsnetzes vorzunehmen und Berechnungen und Auswertungen ausschließlich auf diesem reduzierten Netzbereich durchzuführen. Als Auswahlkriterien können die Knoten, Kantenkennungen und Attribute sowie Nachbarobjekte und Attributwerte herangezogen werden. Mit Hilfe der Netzstatistik können individuelle Auswertungen auf der Grundlage der definierten Attribute für die Netzobjekte durchgeführt werden. Die statistischen Kenngrößen zum Bewerten der Netzstrukturen können vom Benutzer frei definiert werden.

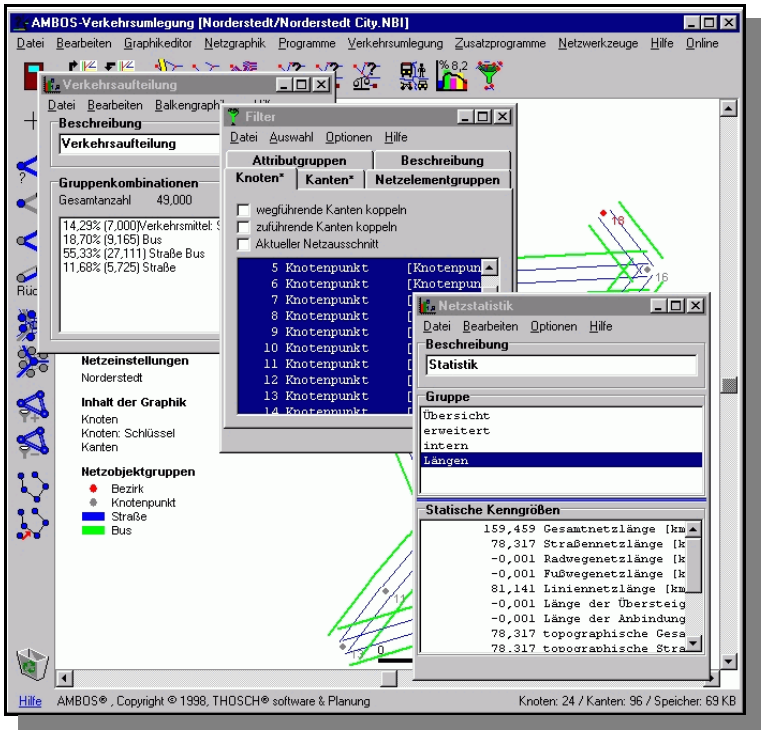

Abbildung 57: Programmsystem AMBOS, Auswertungen

Integriertes Netz- und Modal-Split-Modell als objektorientiertes System

Anhang D

wissenschaftlicher Werdegang

Name		Thorsten Schüler
Geburtsdatum/-ort		06.06.66, Hannover
Staatsangehörigkeit		deutsch
Schulbildung	1985	Abitur
Studium	1986-1993	Universität Hannover Studiengang: Bauingenieurwesen Fachrichtung: Bauinformatik
Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover	1989-1993	Wissenschaftliche Hilfskraft, Softwareentwicklung, Datenauswertung, Datenmigration, Projektbetreuung
THOSCH software & Planung, Seelze	seit 1989	Softwareentwicklung Netzplanung
ISIDATA GmbH, Hannover	1993-1998	Softwareentwicklung
Institut für Bauinformatik, Universität Hannover	1995-1997	Stipendium der Alfried Krupp von Bohlen und Halbach-Stiftung, Projektarbeit
TRANSVER, München	seit 1998	Leitender Ingenieur Softwareentwicklung Projektbetreuung