

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

Dr.-Ing. Thorsten Schüler

TRANSVER GmbH

Maximilianstraße 45, 80538 München

Der Vortrag 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 werden kurz umschrieben.

1. Einleitung

Für die **Planung** zukünftiger Verkehrsnetze und für die Optimierung bestehender Netzstrukturen sind Modellrechnungen ein leistungsstarkes Hilfsmittel. Dabei 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.

Mit einem neuen Modell wird eine **multimodale Netzmodellierung** ermöglicht. In einem multimodalen Verkehrsnetz werden 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 verkehrsmittel-abhängige bzw. verkehrsmittelübergreifende Verkehrsbelastungen.

Ein **Ansatz** zur Lösung der Aufgaben einer multimodalen Netzmodellierung sowie einer integrierten Verkehrsaufteilung durch eine Verknüpfung bestehender Modelle ist aus verschiedenen Gründen nicht sinnvoll. Durch die verkehrsmittelspezifische Aufteilung der Wegewahl wird das multimodale Verkehrsverhalten nur unzureichend abgebildet. Auch sind

die meisten existierenden Modelle für jeweils ein Verkehrsmittel konzipiert. 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.

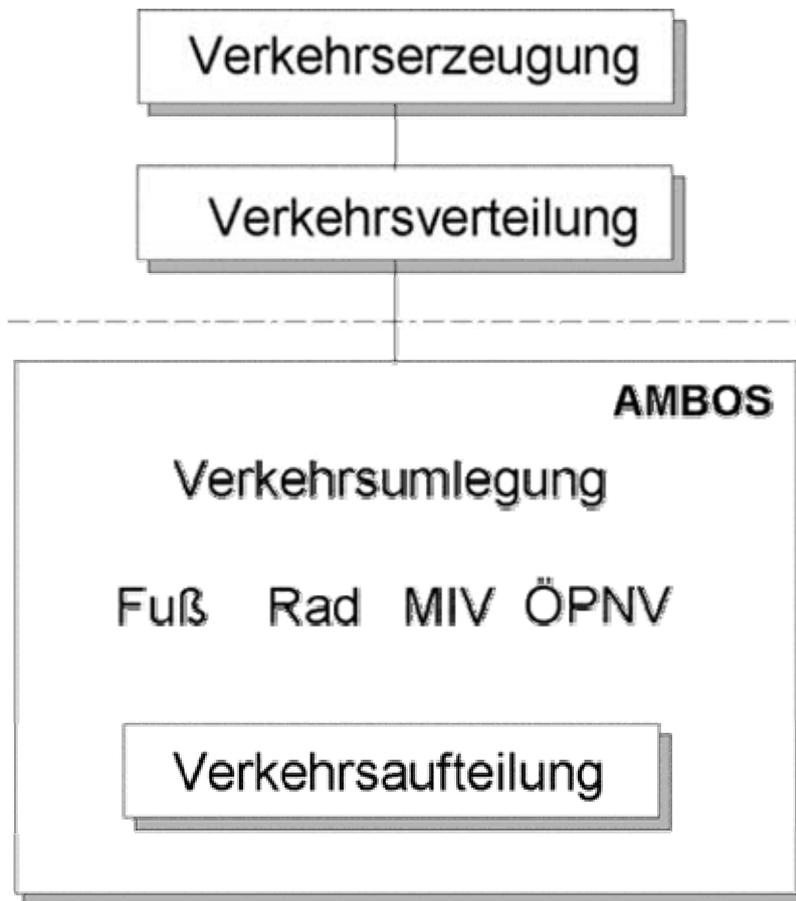


Abbildung 1, Vier-Stufen-Modell, AMBOS

Mit dem **neuen Netzmodell** und den darauf aufbauenden Algorithmen wird im Gegensatz zu den bisherigen Ansätzen die Verkehrsaufteilung während der Verkehrsumlegung durchgeführt (Abbildung 1). Dies setzt das Vorhandensein alternativer Wege in einem multimodalen Verkehrsnetz voraus. Durch Integration der unterschiedlichen Einflussgrößen der Verkehrsaufteilung in die Netzbewertung sowie in eine vorzugebende Verkehrsnachfrage wird auf eine explizite Berechnung der Verkehrsaufteilung verzichtet. Für die Berechnung von alternativen Wegen wurde ein geeigneter Mehrwegealgorithmus entwickelt. Durch eine Verteilung von Fahrten auf multimodale alternative Wege wird implizit eine Verkehrsaufteilung während der Verkehrsumlegung durchgeführt.

Der Modellaufbau erfolgt über die **Modellarchitektur** Kern-, Nutzer- und Prozessmodell. Das Kernmodell beinhaltet die Strukturen des multimodalen Netzmodells. Das Kernmodell dient als gemeinsame Basis für korrespondierende Nutzer- und Prozessmodelle. Die Berechnungen im Rahmen der Verkehrsumlegung und Verkehrsaufteilung erfolgen innerhalb

eines Prozessmodells, welches mit dem Kernmodell Daten und Ergebnisse austauscht. Für die Visualisierung und Modifikation wird ein Nutzermodell entwickelt (DV-Programm AMBOS). 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 diesem Beitrag behandelte Problem verwendet werden kann, sondern durch die Integration von anderen Prozessmodellen 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. Für alle in der Verkehrsnachfrage berücksichtigten Verkehrsmittel sind Netzstrukturen mit ihren spezifischen Eigenschaften vorzuhalten. 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.

2. Das multimodale Netzmodell

Mit Hilfe der Graphentheorie und der objektorientierten Modellierung [1] wird ein **multimodales Netzmodell** in Form eines Klassenmodells definiert. Mit dem hier beschriebenen Netzmodell können der öffentliche Personenverkehr und der Individualverkehr (Personenverkehr) gleichberechtigt in einer Netzstruktur abgebildet werden. Das Netzmodell ist in einer Form konzipiert, dass auch andere Verkehrssysteme (z. B. LKW-Verkehr, Schiffsverkehr oder Flugverkehr) in das Modell integriert werden können.

Betrachtet man das **Verkehrsgeschehen**, so sind drei unterschiedliche Teilbereiche 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 2 zeigt die drei Teilbereiche sowie jeweils einige Elemente der Teilbereiche und deren Beziehungen.

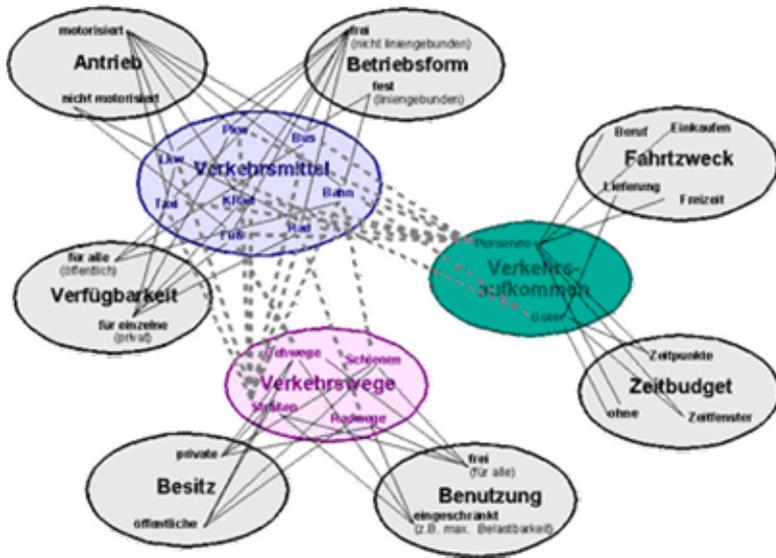


Abbildung 2, Verkehrsgeschehen, Teilbereiche, Elemente und Beziehungen

Als Ergebnis einer Analyse der Teilbereiche im Verkehrsgeschehen (Verkehrsaufkommen, Verkehrsmittel, Verkehrswege) werden für die verschiedenen Verkehrselemente **Klassen** modelliert. Jede Klasse ist ein Repräsentant einer Menge von konkreten Objekten. Jedes Objekt repräsentiert eine Element in er Realität. Zwischen den Klassen werden Beziehungen definiert, deren Eigenschaften durch die objektorientierte Modellierung eindeutig beschrieben werden.

- 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 definierte Klassenmodell bildet die Basis einer Modellierung des Personenverkehrs (Abbildung 3).

3. Alternative Wege im Verkehr

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 $P_{d,EL}(x,y)$ und
- die minimale Fuzzy-bewertete Wegemenge $P_{F,min}(x,y)$

definiert.

In Abhängigkeit der Weglängen von Wegen und der Weglänge der minimalen Wege zwischen Knoten wird die **elementar beschränkte Wegemenge** $P_{d,EL}(x,y)$ bestimmt. Jede Kante im Graphen wird mit genau einem deterministischen Wert "scharf" bewertet. Wird ein Weg zwischen zwei Knoten betrachtet, so ist der Weg in der elementar beschränkten Wegemenge enthalten, wenn für alle Teilwege $p_d(a,b)$ des Weges gilt, dass die Länge $w_d(a,b)$ des untersuchten Teilweges von der Länge $w_{d,min}(a,b)$ des minimalen Teilweges eine maximale relative Abweichung nicht überschreitet. An jedem Knoten wird neu entschieden, ob der lokale Umweg zum Ziel als ein alternativer Weg akzeptiert wird.

$$P_{d,EL,rel}(x,y) := \{p_d(x,y) \in P^*(x,y) \mid \forall_{\text{Teilwege}} (w_d(a,b) \leq w_{d,min}(a,b) \bullet \alpha)\}$$

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.

Fuzzy-bewertete Wegemengen bauen auf der Fuzzy-Theorie auf. 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. 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. Bei Fuzzy-bewerteten Wegen werden mit denselben Minimale-Wege-Algorithmen durch "unscharfe" Bewertung Mengen "ungefähr minimaler Wege" als alternative Wege bestimmt. Die minimalen Fuzzy-bewertete Wegemengen beinhalten die im Sinne der Fuzzy-Arithmetik bestmöglichen minimalen Wege und die schlechtestmöglichen minimalen Wege.

Als Teilmenge der vollständigen Wegemenge 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.

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

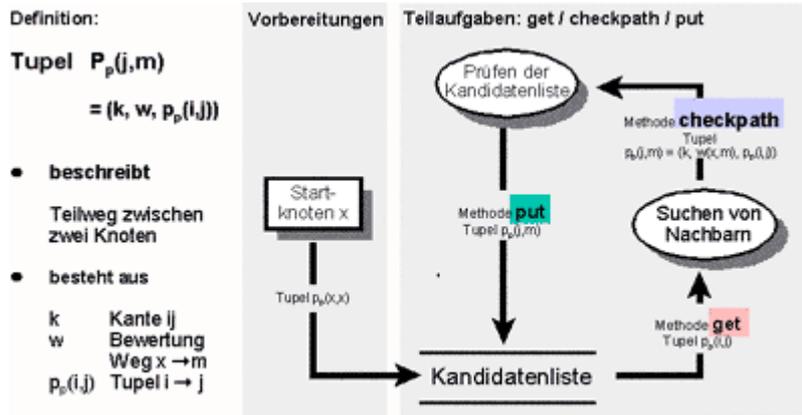
Die Eigenschaften der minimalen Fuzzy-bewerteten Wegemenge sind:

- Alle Wege $p(x,y)$ mit minimaler Weglänge sind enthalten.
- Alle Wege $p(x,y)$ über z mit Zyklen durch z sind nicht enthalten.

4. Mehrwegealgorithmen

Um die zuvor definierten Wegemengen zu bestimmen, wurden entsprechende **Wegealgorithmen** entwickelt. 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 die fehlende lineare Ordnung der Wegemenge zu berücksichtigen. Eine Bewertung vorhandener Minimaler-Wege-Algorithmen und k-kürzester-Wege-Algorithmen ergab, dass geeignete Wegealgorithmen fehlen.

Ein **neuer genereller Mehrwegealgorithmus** (Abbildung 4) wird zur Bestimmung der elementar beschränkten Wegemenge sowie der minimalen Fuzzy-bewerteten Wegemenge entwickelt. Als Ausgangsalgorithmus wird ein Wegealgorithmus nach Dijkstra [2] verwendet.



Wegemenge	Methode get hole Tupel	Methode put Tupel in Kandidatenliste	Methode checkpath neues Tupel i-j ist als vorhandenes Tupel in Kandidatenliste
minimaler Weg	bestes	einsortieren	besser
minimale Wegemenge	bestes	einsortieren	besser oder gleich
einfach beschränkte Wegemenge	ein oder bestes	anhängen oder einsortieren	maximal um $\Delta\%$ schlechter als der minimale Weg
elementar beschränkte Wegemenge	ein oder bestes	anhängen oder einsortieren	auf jedem Teilweg (Abschnitt) maximal um $\Delta\%$ schlechter als der minimale Weg
Fuzzy-bewertete Wegemenge	ein oder bestes	anhängen oder einsortieren	nicht größer als minimale untere Schranke (L-Funktion) oder nicht größer als minimale untere Schranke (R-Funktion)

Abbildung 4, Ein genereller Mehrwegealgorithmus

Um alternative Wege zu berechnen, wird für das Vorhalten von Weginformationen ein Weg-Tupel $p_p(j,k)$ eingeführt. 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 zum Knoten k , welche der letzten Kante der Kantenfolge des Weges entspricht,
- aus einer Weglänge $w_p(x,k)$, deren Wert die Weglänge des Weges vom Startknoten x bis zum Endknoten k der Kante k_p umfaßt und
- aus einem Tupel $p_{p-1}(i,j)$, welches den vorherigen Teilweg beschreibt.

Durch Ersetzen der Knoten in der Kandidatenliste des Ausgangsalgorithmus durch Weg-Tupel werden in Abhängigkeit einer Entscheidungsfunktion alternative Wege bestimmt. Durch eine Spezifikationen ausgewählter Methoden sowie der Entscheidungsfunktion des generellen Mehrwegealgorithmus werden die Wege der elementar beschränkten Wegemenge sowie der minimalen Fuzzy-bewerteten Wegemenge bestimmt (Abbildung 4). Weitere Wegemengen können mit demselben Algorithmus durch Modifikation der Entscheidungsfunktionen realisiert werden.

5. 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.

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

5.1 Das erweiterte Kernmodell

Das Kernmodell baut auf dem multimodalen Netzmodell auf. Zu den besonderen Anforderungen an das Netzmodell zählen bei einem integrierten Modal-Split-Modell die Bereiche

- gegenseitige Beeinflussung der Verkehrsmittel,
- alternative Wege,
- verkehrsmittelspezifische Bewertungsklassen,
- liniengebundene Verkehrsmittel und Parallelverkehr.

Das im Kapitel 3 beschriebene multimodale Netzmodell besteht aus Netzobjekten, die mit Funktionen bzw. Attributen bewertet werden können. Eine gegenseitige Beeinflussung der Verkehrsmittel auf Streckenabschnitten wird nicht modelliert. 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. Durch die Integration einer neuen Klasse *Attribut* in das Netzmodell können mehrere Netzobjekte (z. B. Knotenpunkt, Haltestelle, Straße) miteinander in Beziehung gesetzt werden (Abbildung 5). Jedes Netzobjekt besteht aus einer Menge von Attributen, wobei jedes Attribut gleichzeitig mehreren Netzobjekten zugeordnet werden kann.

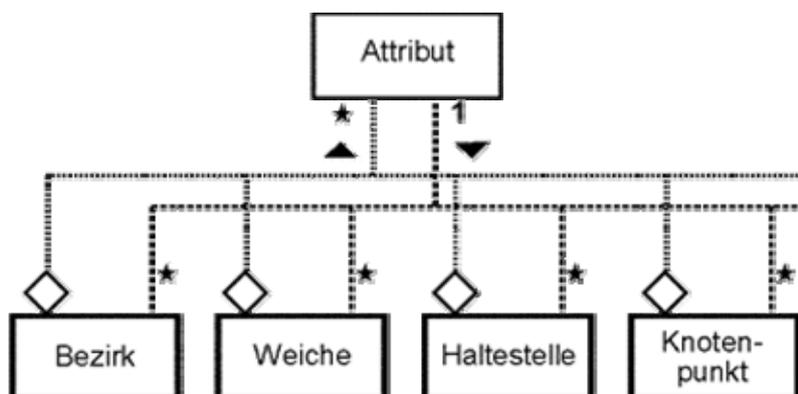


Abbildung 5, Klasse ATTRIBUT

Bei der Suche von **alternativen Wegen** in unimodalen Verkehrsnetzen reicht es im allgemeinen aus, die k-kürzesten unter verkehrsplanerischen Gesichtspunkten sinnvollen Wege in den weiteren Berechnungen zu berücksichtigen. 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, wenn auf dem jeweiligen Verkehrsmittel noch kein Weg bestimmt wurde. Mit Hilfe geeigneter Wege- bzw. Mehrwegealgorithmen kann dies gewährleistet werden. Es sind alle sinnvollen Verkehrsmittelkombinationen bei der Wegesuche durch Berechnen entsprechender Wege zu berücksichtigen. 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.

Der generelle **Mehrwegealgorithmus** berechnet die Wege unter Berücksichtigung der Bewertung der Wege. Die beschriebenen 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 aufgrund der im folgenden beschriebenen verkehrsmittelspezifischen Bewertungsklassen nur bedingt anwendbar.

Eine Charakteristik multimodaler Verkehrsnetze, die in engem Zusammenhang mit den zuvor beschriebenen alternativen Wegen zu sehen ist, ist die Existenz beziehungsbezogener **verkehrsmittelspezifischer Bewertungsklassen**. Die beziehungsbezogenen verkehrsmittelspezifischen Bewertungsklassen haben ihren Ursprung in den verkehrsmittelbedingten Grundbewertungen, wie z. B. der Reisezeit bzw. der Geschwindigkeit. Werden als Teilsystem 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 dem generellen Mehrwegealgorithmus kann in diesem Teilsystem nicht gewährleistet werden, dass der öffentliche Personenverkehr auf allen Beziehungen berücksichtigt wird, zwischen denen Wege mit dem öffentlichen Personenverkehr möglich sind.

Eine Lösung für das Problem ist die Entwicklung **eines erweiterten Mehrwegealgorithmus**. Im erweiterten generellen Mehrwegealgorithmus werden die berechneten alternativen Wege über die Definition der Tupel anstelle der Knoten den jeweils zum Knoten hinführenden Kanten zugeordnet. Das Problem der verkehrsmittelspezifischen Bewertungsklassen wird mit diesem erweiterten Algorithmus gelöst, da über jede Kante zu einem Knoten mindestens ein Weg bestimmt wird. Als **Nachteil** der Modifikationen ist zu bewerten, dass die berechneten Wegemengen nicht mehr durch einen eindeutigen Regel beschrieben werden können.

Die Klassifizierung der Verkehrsmittel ergab eine Unterteilung in **liniengebundene Verkehrsmittel** und nicht liniengebundene Verkehrsmittel. Das bisher entwickelte Klassenmodell bietet keine Möglichkeit, liniengebundenen Verkehr sinnvoll abzubilden.

Liniengebundener Verkehr wird in diesem Modell über einen zusätzlichen Identifikator modelliert, welcher im Rahmen von Berechnungen bzw. Transformation der Netzstrukturen berücksichtigt wird.

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. Mit dem erweiterten Kernmodell des integrierten Modal-Split-Modells ist eine Realisierung beider Lösungsansätze denkbar.

5.2 Das Prozessmodell

Das **Prozessmodell** besteht aus der Durchführung einer Verkehrsumlegung. Bestandteile des Prozessmodells sind die entwickelten Mehrwegealgorithmen und aus der Literatur entnommene Verteilungsfunktionen [3][5]. Das Prozessmodell berechnet alternative Wege zwischen allen Knoten eines Graphen und verteilt eine gegebene Verkehrsnachfrage auf das Netz.

Bei der **Transformation** der Daten des Kernmodells in das Prozessmodell 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 an Haltestellen und Abbiegebeziehungen an Knotenpunkten abbilden zu können. Vorteile des einfachen knotenorientierten Graphen gegenüber den anderen 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 Knotenpunkten und Haltestellen differenziert berücksichtigt werden müssen.

6. Anwendung

Als eine erste Anwendung wurden die Untersuchungsräume Erfurt (öffentlicher Personenverkehr und motorisierter Individualverkehr) und Großraum Hannover (öffentlicher Personenverkehr, nicht motorisierter und motorisierter Individualverkehr) herangezogen. Ausgehend von einer Gesamtverkehrsnachfrage wurden mit dem Modell die Zielwerte *Verkehrsaufteilung*, *Verkehrsarbeit* und *verkehrsmittelspezifische Verkehrsnachfrage* bestimmt und mit anderen Modellen berechneten Werten gegenübergestellt. Eine Untersuchung von gebrochenem Verkehr erfolgte aufgrund fehlender vorhandener Werte nicht. Als Aggregationen wurden der Gesamtverkehr, die bezirksbezogenen Quellverkehre und die einzelnen Quelle-Ziel-Beziehungen bewertet.

Die Gegenüberstellung der berechneten Werte mit den vorhandenen Werten lieferte zum größten Teil zufriedenstellende **Ergebnisse** (Abbildung 6). 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.

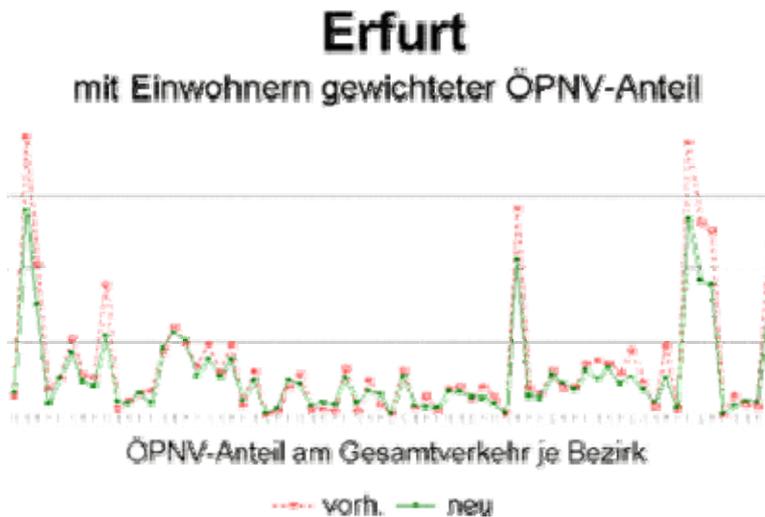


Abbildung 6, Erfurt, ÖPNV-Anteil, Gegenüberstellung

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. Die Erweiterung der Bewertungen erfolgte zum Teil mit über den gesamten Untersuchungsraum konstanten Werten. Abhängigkeiten zwischen den Attributen in Form von Prioritäten wurden 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.

Untersuchungen der **Fuzzy-bewerteten Wegemenge** ergaben, dass bei der Vorgabe von Wertebereichen für Attribute im Sinne der Fuzzy-Theorie der entwickelte minimale Wegealgorithmus alternative Wege berechnet. Auf Grund von nicht vorhandenen Wertebereichen aus vorhandenen Verkehrsuntersuchungen war eine Gegenüberstellung von berechneten und vorhandenen Werten nicht möglich.

7. Ergebnis und Ausblick

Das **Ergebnis** der Arbeit ist die Entwicklung eines multimodalen Netzmodells, mit dem alle Verkehrsmittel gleichberechtigt in einer Modellstruktur abgelegt werden können. Durch den objektorientierten Modellansatz läßt sich das Modell leicht mit neuen Elementen erweitern. Aufgrund der Definition von Wegemengen alternativer Wege sowie entsprechenden Mehrwegealgorithmen ist ein multimodales Routenauskunftssystem entstanden. Durch die Integration einer Verkehrsumlegung in das Modell kann der Modal-Split sowohl für die

klassischen Verkehrsmittelkombinationen als auch für gebrochenen Verkehr berechnet werden.

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.

Literatur

1. Damrath, R., Olbrich, M., Objektorientiertes Modellieren, Institut für Bauinformatik, Universität Hannover, 1995
2. Dijkstra, E.W., A note on two problems in connexion with graphs, Numerische Mathematik 1, Springer, Berlin, 1959
3. Dial, R., A Probabilistic Multipath Assignment Model that Obviates Path Enumeration, Transportation Research 5, pp 83-111, 1971
4. Schüler, T., Ein integriertes Netz- und Modal-Split-Modell als objektorientiertes System, Dissertation, Institut für Bauinformatik, Universität Hannover, 1998
5. Walther, K., Oetting, A., Vallée, D., Heft 52, Simultane Modellstruktur für die Personenverkehrsplanung, Verkehrswissenschaftliches Institut, Rheinisch-Westfälische Technische Universität Aachen, 1997