

simulierten Situation zu verstehen ist. Das Ergebnis der Wirkung betroffener Bevölkerungsteile, die sich in der dargestellten Alternative zwischen z. B. einem Wohnstandort im Umland und einem „erneuerten“ Wohnstandort im Innenstadtbereich zu entscheiden haben, führt zu monetären und nutzwertanalytischen Qualitätsaussagen dieser spezifischen Handlungsmöglichkeit. Die der Tabelle 5 zu entnehmenden vier Wirkungsaussagen sollen insbesondere den derzeitigen Innenstadtbewohnern wie auch den Verantwortlichen in Politik und Planung klar vor Augen geführt werden. Während die Rangfolgezahl 1 in Zeile E der Tabelle 5 einen Verknüpfungswert von „3,45“ dokumentiert, weist die nachfolgende Wirkungsbetrachtung (Rangfolgezahl 2 mit dem Wert „2,13“) bereits auf Nachteile gegenüber der erstbehandelten Alternative hin. Die Nachteile der Wirkungsanalyse IV gegenüber der Wirkungsanalyse III resultieren aus den Divergenzen in der monetären Objektbetrachtung, den geringeren Fahrtkosteneinsparungen und dem in der Nutzengleichung fortgefallenen Wert der umlandspezifischen kommunalen Erschließungsbelastung.

Zusammenfassend weist das vorgelegte Instrument auf die Bedeutung der Einbeziehung individueller Komponenten hin. Vorteile wie z. B. Einsparungen von Fahrtkosten erhöhen den untersuchungsspezifischen Objektivitätsgrad und sind, streng rational betrachtet, in Nutzen-Kosten-Untersuchungen unbedingt zu berücksichtigen.

Summary

Measures for the improvement of the vicinities of residential areas in cities to reduce or to stop negative aspects like the run away of the city must be important points of the future discussion about town-development-politics.

The results of the interviews with the population in residential areas and the methodical statements, which were especially developed for this purpose, show that

- the use of cost-benefit-analysis is not an institutionalized instrument in this context.
- a transmission of the method is possible, if some modification, f. e. the size of the study-areas, will be made and that
- inhabitant-interviews can make an important contribution to the realisation of cost-benefit-analyses.

In its use, the developed methodical statement is a timeless study-method. The changing wishes and opinions about the quality of the vicinity of residential areas can be developed and evaluated as variable criterias.

Ein innovatives Modellsystem zur Serviceplanung im öffentlichen Personennahverkehr

VON ALFRED H. NICKESSEN, ESSEN, UND
ARNIM H. MEYBURG, ITHACA, N. Y.

v. st. b

Überblick

Das Ziel des vorliegenden Beitrags war die Entwicklung eines leicht anwendbaren Modellsystems zur Serviceplanung im öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV). Das wesentliche Merkmal des Modellsystems besteht darin, daß es Informationen benutzt, die aus leicht durchführbaren ÖPNV-Zu- und Abgangszählungen an Haltestellen gewonnen werden können. Sämtliche Modellparameter werden entweder direkt der Verkehrsliteratur entnommen oder aus allgemein verfügbaren Flächennutzungs- und sozioökonomischen Daten hergeleitet. Kosten- und zeitintensive Haushaltsbefragungen und Modellkalibrierungen sind nicht notwendig.

Eine Folge von sehr einfachen Verkehrserzeugungs-, Verkehrsverteilungs- und Verkehrsmittelwahlmodellen erzeugt fahrtzweckspezifische ÖPNV-Fahrtenmatrizen, die im folgenden als „geschätzte“ Fahrtenmatrizen bezeichnet werden. Diese Matrizen und die an Haltestellen erfaßten ÖPNV-Zu- und Abgänge werden in einem Linearen Programmierungsmodell benutzt, das als Korrekturmechanismus Verwendung findet. Die Zunahme an Genauigkeit in den fahrtzweckspezifischen „geschätzten“ Fahrtenmatrizen wird durch die Ausnutzung von Informationen erreicht, die in den ÖPNV-Zu- und Abgangszählungen stecken. Die sich daraus ergebenden „korrigierten“ Fahrtenmatrizen können anschließend in einer sogenannten Pivot-Point-Analyse verwendet werden, um die Auswirkungen von Reisezeit- und Reisekostenänderungen auf die ÖPNV-Benutzung zu simulieren. Aus diesem Schritt ergeben sich „revidierte“ Fahrtenmatrizen, die dem ÖPNV-Betreiber als Basis für Betriebskosten- und Betriebseinnahmeschätzungen dienen.

Die Resultate einer Anwendung des Modellsystems am Beispiel der Stadt Springfield im U.S.-Bundesstaat Missouri zeigen, daß es genaue Ergebnisse liefern kann, vorausgesetzt, es liegen repräsentative Zu- und Abgangszählungen vor, und die von den ersten drei Modellkomponenten geschätzten Fahrtenmatrizen sind einigermaßen genau.

Anschriften der Verfasser:

Alfred H. Nickesen
Verkehringenieur in Firma
Dr.-Ing. Walter GmbH + Co KG (DIWI) International
Beratende Ingenieure
Wittenbergstraße 10 – Postfach 10 43 52
4300 Essen 1

Arnim H. Meyburg
Professor und Chairman
Department of Environmental Engineering
Cornell University
Hollister Hall
Ithaca, New York 14853 / U.S.A.

1. Dem Modellsystem unterliegende Konzepte

Die Betreiber von öffentlichen Personennahverkehrssystemen befinden sich unter dem Druck, ihre Verkehrsmittel möglichst flächendeckend und mit hoher Frequenz, gleichzeitig aber auch möglichst kosteneffizient anzubieten. Aus diesem Grunde muß ein ÖPNV-Unternehmer in der Lage sein, den von seinem System gebotenen Service quantitativ zu erfassen, um ersehen zu können, ob die durch den angebotenen Service anfallenden Betriebskosten in einem befriedigenden Verhältnis zu den Einnahmen stehen.

Den meisten Betreibern von ÖPNV-Systemen fehlt jedoch das analytische Werkzeug, um derartige Serviceplanungen durchführen zu können. Es besteht ohne Zweifel ein akuter Mangel an leicht anwendbaren Analyse- und Prognosetechniken, die es den Betreibern von ÖPNV-Systemen ermöglichen würden, derartige Untersuchungen fortwährend und eigenständig durchzuführen.

Diesem Mangel entsprechend war es das Ziel der vorliegenden Arbeit, ein einfaches und leicht anwendbares Modellsystem für Analyse- und Prognosezwecke im öffentlichen Personennahverkehr zu entwickeln und zu testen. Das hier vorgestellte Modellsystem wurde für Städte in der Größenordnung von 50.000 bis 500.000 Einwohnern konzipiert. Um eine einfache Modellanwendung sicherstellen zu können, ist eine Sequenz von fünf Teilmodellen erdacht worden, die vom traditionellen Vierstufenmodell der Verkehrsplanung entscheidend abweicht. Die im folgenden ausführlicher beschriebene Modellsequenz basiert auf der Idee, fahrtzweckspezifische ÖPNV-Fahrtenmatrizen auf der Basis von ÖPNV-Zu- und Abgangszählungen an Haltestellen und leicht zugänglichen Flächennutzungs- und sozioökonomischen Daten zu erstellen.

Abbildung 1 zeigt das Modellsystem, das die folgenden wesentlichen Merkmale aufweist:

1. Die fünf Modellkomponenten sind Modelle zur Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung, Verkehrsmittelwahl, ein Lineares Programmierungsmodell und ein Modell zur Pivot-Point-Analyse.
2. Die vorliegende Modellversion umfaßt zwei Verkehrsmittel, öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) und Individualverkehr (IV), und drei Verkehrszwecke, d. h. Fahrten zwischen Wohnung und Arbeitsplatz (WA), Fahrten zwischen Wohnung und allen übrigen Reisezielen (WÜ) und Fahrten, die nicht an der Wohnung beginnen oder enden (nicht wohnungsbezogen – NWB).
3. Drei Kategorien von Dateninputs sind notwendig: (a) Flächennutzungs- und sozioökonomische Daten, (b) ÖPNV-Zu- und Abgangszählungen an Haltestellen und (c) Level-of-Service (LOS) Daten für die beiden Verkehrsmittel ÖPNV und IV.
4. Zur Abschätzung der Benutzung des ÖPNV-Systems werden Fahrtenmatrizen erstellt.

Der Zweck des Verkehrserzeugungsmodells ist die Abschätzung aller Fahrten pro Verkehrszweck, die von jeder Zone des Untersuchungsgebietes erzeugt (Quellverkehr) und angezogen (Zielverkehr) werden. Flächennutzungs- und sozioökonomische Daten bilden den Input für dieses Modell.

Im Verkehrsverteilungsmodell werden die Fahrten zwischen allen Zonen auf der Basis der im Erzeugungsmodell errechneten Quell- und Zielverkehre und zusätzlicher Wider-

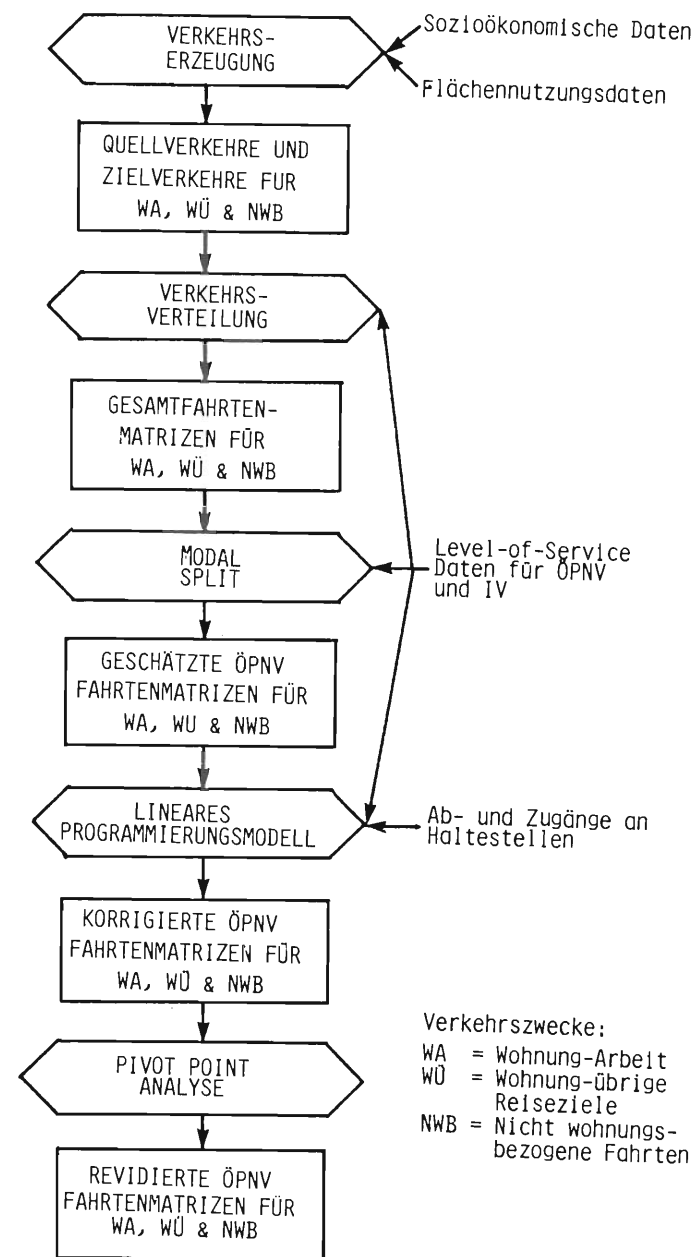


Abbildung 1: Modellsystem zur Serviceplanung im öffentlichen Personennahverkehr

standsmatrizen ermittelt. Output dieses Modells sind fahrtzweckspezifische Fahrtenmatrizen.

In der Modal-Split-Phase werden die aus der Verteilung kommenden Fahrtenmatrizen auf den IV und ÖPNV aufgeteilt. Level-of-Service-Daten, die die beiden Verkehrssysteme beschreiben, dienen als weiterer Input. Der Output des Modal-Split-Modells sind sogenannte „geschätzte“ ÖPNV-Fahrtenmatrizen, die dem Betreiber eine grobe Abschätzung der fahrtzweckspezifischen Benutzung des ÖPNV-Systems geben.

In der vierten Modellphase wird ein Lineares Programmierungsmodell eingeschaltet, welches auf der Basis der geschätzten Fahrtenmatrizen und der Zu- und Abgangszählungen an Haltestellen „korrigierte“ Fahrtenmatrizen errechnet. Da die Zu- und Abgangszählungen alle Verkehrszwecke umfassen, müssen die aus dem Modal Split stammenden drei fahrtzweckspezifischen Fahrtenmatrizen zu einer Gesamtmatrix aggregiert werden. Folglich repräsentiert die vom Linearen Programmierungsmodell errechnete Matrix ebenfalls alle Verkehrszwecke. Die Anwendung von Verkehrszweckfaktoren, die aus der Verkehrsverteilung gewonnen werden, führt jedoch dann wieder zu fahrtzweckspezifischen korrigierten Fahrtenmatrizen. Der Zweck der Anwendung des LP-Modells besteht in einer Verbesserung der Genauigkeit der drei fahrtenspezifischen ÖPNV-Fahrtenmatrizen, die von den ersten drei Modellkomponenten nicht erreicht werden kann.

Das abschließende Pivot-Point-Modell dient der Simulation des Benutzerverhaltens als Reaktion auf Veränderungen im ÖPNV-System, wie z. B. Fahrpreis- oder Reisezeitveränderungen. Ein sogenanntes inkrementelles Modal-Split-Modell wird benutzt, um mit Hilfe der angenommenen Veränderungen im Verkehrssystem Veränderungen in der Benutzerrhäufigkeit abzuschätzen. Output dieses Modells sind sogenannte „revidierte“ Fahrtenmatrizen.

Es ist zu beachten, daß die geschätzten, korrigierten und revidierten ÖPNV-Fahrtenmatrizen verschiedenen Zwecken dienen. Die geschätzten Fahrtenmatrizen geben einen ersten Anhaltspunkt für die Benutzung des ÖPNV-Systems. Sie werden durch die Anwendung des LP-Modells in ihrer Genauigkeit verbessert, was zu den korrigierten Fahrtenmatrizen führt. Diese geben eine Bestandsaufnahme der zum Analysezeitpunkt existierenden ÖPNV-Benutzung. Die revidierten ÖPNV-Fahrtenmatrizen entstehen, indem man auf der Basis der korrigierten Matrizen bestimmte Maßnahmen wie Fahrpreis- und Reisezeitänderungen simuliert. Diese wiederum verschaffen dem Betreiber des ÖPNV-Systems eine Grundlage für die Beurteilung solcher Maßnahmen und repräsentieren eine simulierte ÖPNV-Benutzung.

2. Austesten gewählter Modellkomponenten

Das zum Austesten aller Modelle gewählte Busnetz und Zonensystem ist in Abbildung 2 dargestellt. Alle als Input und zur Kontrolle der Modellergebnisse benötigten Daten entstammen einer sehr umfassenden Verkehrsstudie für die Stadt Springfield im U.S.-Bundesstaat Missouri aus dem Jahre 1977. Das hier benutzte Busnetz entspricht dem im Jahre 1977 im Betrieb befindlichen Netz in seinen wesentlichen Eigenschaften. Es besteht aus sechs Buslinien, die alle durch den zentralen Busbahnhof (Haltestelle 102) im Stadt-

zentrum laufen. Das Stadtgebiet wurde in 25 Zonen aufgeteilt, wobei die Zone 1 dem Stadtzentrum entspricht, die Zonen 2, 4 und 5 andere Geschäfts- und Industriegebiete sind und alle anderen Zonen hauptsächlich dem Wohnen und der wohnungsnahen Erholung dienen.

Für das Jahr 1977 zur Verfügung stehende Verkehrserhebungen und -analysen (im folgenden für den Vergleich mit den in dieser Arbeit erlangten Modellergebnissen immer als Basiswerte bezeichnet) zeigen, daß sich das tägliche Verkehrsaufkommen im ÖPNV auf ca. 38.000 Fahrten beläuft, was einem Anteil von 8,4 % am gesamten täglichen Verkehrsaufkommen entspricht. Damit war ein Richtwert vorgegeben, der durch das zu testende Modellsystem möglichst genau approximiert werden sollte.

Die gewählten ersten drei Modellkomponenten umfassen ein sehr einfaches Verkehrserzeugungsmodell, das mit Verkehrsraten arbeitet, ein Gravitationsmodell zur Verkehrsverteilung und ein Logit-Modell für den Modal Split. Diese drei Modelle und die mit ihnen erzielten Ergebnisse werden im folgenden näher vorgestellt.

Das Verkehrserzeugungsmodell ermöglicht eine Abschätzung der täglich erzeugten und angezogenen Fahrten in jeder Zone. Der Modellteil zur Verkehrserzeugung besteht aus drei Fahrtenraten, den drei betrachteten Verkehrszwecken entsprechend¹⁾. Diese Fahrtenraten werden in Personenfahrten pro Haushalt ausgedrückt und ließen sich wie folgt herleiten. Eine Auswertung der amerikanischen Verkehrsliteratur ergab²⁾, daß eine Fahrtenrate von 3,5 Fahrten pro Person und Tag angebracht erschien. Da im Untersuchungsraum 139.171 Personen und 50.789 Wohneinheiten vorzufinden waren, ergab sich eine durchschnittliche tägliche Fahrtenrate pro Haushalt von 9,95 Fahrten. Fahrtzweckspezifische Fahrtenraten ergaben sich über Aufteilungsfaktoren, die ebenfalls der amerikanischen Verkehrsliteratur entnommen wurden³⁾. Folgende drei Faktoren wurden benutzt:

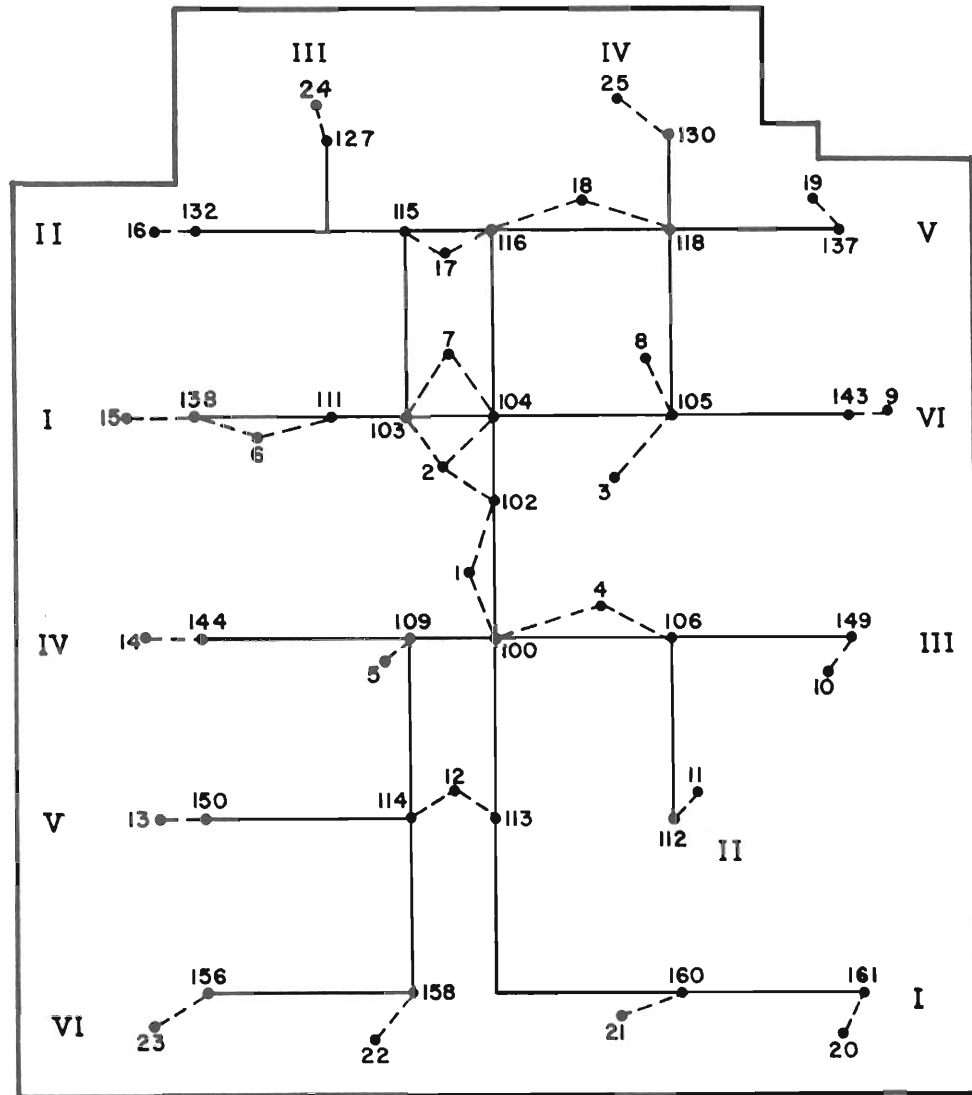
1. Für Fahrten zwischen Wohnung und Arbeitsplatz (WA)	0,20
2. Für Fahrten zwischen Wohnung und allen übrigen Reisezielen (WÜ)	0,57
3. Für alle nicht-wohnungbezogene Fahrten (NWB)	0,23

Tabelle 1 enthält die drei fahrtzweckspezifischen Fahrtenraten, die in das hier benutzte Verkehrserzeugungsmodell eingegeben wurden.

Tabelle 1: *Vorzugebende Fahrtenraten*

Für Fahrten zwischen Wohnung und Arbeitsplatz (WA)	1,99
Für Fahrten zwischen Wohnung und allen übrigen Reisezielen (WÜ)	5,67
Für alle nicht-wohnungbezogene Fahrten (NWB)	2,29
Fahrten pro Haushalt und Tag	9,95

- 1) Vgl. R. H. Pratt Associates, Inc., UMODEL User's Guide with case studies. Prepared for U.S. Department of Transportation, Washington, D.C. (auf dem UTPS Band).
- 2) Vgl. Sosslau, A., Hassam, A. B., Carter, M. M., and Wickstrom, G. V., Quick-response urban travel estimation techniques and transferable parameters. User's Guide. NCHRP Report 187, Washington, D.C. 1978; Urban Mass Transportation Administration, Characteristics of urban transportation demand. A handbook for transportation planners, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C. 1978 (auf dem UTPS Band); Baerwald, J. (Ed.), Transportation and Traffic Engineering Handbook. Institute of Traffic Engineers, 1979.
- 3) Vgl. Sosslau, A., et. al., Quick-response . . . , a.a.O.



LEGENDE

- VI BUSLINIE
- 23 ZONENMITTELPUNKT
- 156 HALTESTELLE
- VERBINDUNG ZONENMITTELPUNKT - ÖPNV NETZ
- STRECKENABSCHNITT IM ÖPNV NETZ

Abbildung 2: Busnetz und Zonensystem der Test-Stadt

Der Modellteil zur Verkehrsanziehung besteht aus folgenden drei Gleichungen (R. H. Pratt Associates, Inc., 1979):⁴⁾

1. Angezogene Fahrten pro Zone Wohnung – Arbeitsplatz (WA) = f_1 (1.7 x Gesamtbeschäftigte pro Zone) (1)
2. Angezogene Fahrten pro Zone Wohnung – alle übrigen Reiseziele (WÜ) = f_2 (10.0 x Beschäftigte im Einzelhandel pro Zone + 0.5 x Gesamtbeschäftigte minus Beschäftigte im Einzelhandel pro Zone + 1.0 x Anzahl Wohneinheiten pro Zone) (2)
3. Angezogene Fahrten pro Zone nicht wohnungsbezogene Fahrten (NWB) = f_3 (2.0 x Beschäftigte im Einzelhandel pro Zone + 2.5 x Gesamtbeschäftigte minus Beschäftigte im Einzelhandel pro Zone + 0.5 x Anzahl Wohneinheiten pro Zone) (3)

f_1, f_2, f_3 sind das gesamte Untersuchungsgebiet repräsentierende Korrekturfaktoren, die wie folgt definiert werden:

$$f_1 = \frac{\text{Erzeugte Fahrten zwischen Wohnung + Arbeitsplatz in allen Zonen}}{1.7 \times \text{Gesamtbeschäftigte in allen Zonen}} \quad (4)$$

$$f_2 = \frac{\text{Erzeugte Fahrten zwischen Wohnung + übrigen Zielen in allen Zonen}}{10.0 \times \text{Beschäftigte im Einzelhandel in allen Zonen} + 0.5 \times \text{Gesamtbeschäftigte minus Beschäftigte im Einzelhandel in allen Zonen} + 1.0 \times \text{Anzahl Wohneinheiten in allen Zonen}} \quad (5)$$

$$f_3 = \frac{\text{Erzeugte nicht wohnungsbezogene Fahrten in allen Zonen}}{2.0 \times \text{Beschäftigte im Einzelhandel in allen Zonen} + 2.5 \times \text{Gesamtbeschäftigte minus Beschäftigte im Einzelhandel in allen Zonen} + 0.5 \times \text{Anzahl Wohneinheiten in allen Zonen}} \quad (6)$$

⁴⁾ Vgl. Federal Highway Administration, Urban Trip Distribution Friction Factors, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C. 1974.

Diese Korrekturfaktoren sorgen dafür, daß die Summe aller angezogenen Fahrten pro Verkehrszweck der Summe aller erzeugten Fahrten für jeden der drei Fahrtzwecke entspricht.

Die Resultate der Verkehrserzeugung sind in Tabelle 2 dargestellt. Um die Brauchbarkeit des Modells abschätzen zu können, sind die der 1977er Studie entnommenen Resultate der Verkehrserzeugung (Basiswerte) aufgeführt.

Tabelle 2: *Geschätzte Verkehrserzeugung im Vergleich zu Basiswerten*

Verkehrszweck	Geschätzte Fahrten	Basiswerte
Wohnung – Arbeitsplatz (WA)	97.413 (20 %)	95.173 (20 %)
Wohnung – alle übrigen Reiseziele (WÜ)	277.612 (57 %)	247.096 (51 %)
Nicht wohnungsbezogene Fahrten (NWB)	112.040 (23 %)	139.818 (29 %)
Summe aller Personenfahrten	487.065 (100 %)	482.087 (100 %)

Ein Vergleich der vom Modell produzierten Fahrten mit diesen Basiswerten zeigt, daß dieses mit einfachen Fahrtenraten arbeitende Modell in der Lage war, die Summe aller Fahrten pro Verkehrszweck mit beträchtlicher Genauigkeit zu reproduzieren. Die Summe aller täglichen Personenfahrten wird sogar nur um 4978 Fahrten (ca. 1 %) überschätzt. Allerdings sagen diese Zahlen nichts über die Genauigkeit aus, die das Modell für die Verkehrserzeugung pro Zone erreichen konnte.

Die erhaltenen Vektoren (6 Stück) für Verkehrserzeugung (Quellverkehr) und -anziehung (Zielverkehr) pro Verkehrszweck bilden den Übergang zur Verkehrsverteilung. Zur Anwendung kam ein Gravitationsmodell der einfachsten Form:

$$T_{ij}^z = \frac{P_i^z \cdot A_j^z \cdot I_{ij}^z}{\sum_j A_j^z \cdot I_{ij}^z} \quad (7)$$

wobei bedeuten:

T_{ij}^z = alle Fahrten zwischen Zone i und Zone j

P_i^z = Quellverkehr der Zone i

A_j^z = Zielverkehr der Zone j

I_{ij}^z = Widerstandsmatrix, die die Raumüberwindung für beide betrachteten Verkehrsmittel zwischen Quellen i und Zielen j berücksichtigt

z = alle Input- und Outputwerte sind fahrtzweckspezifisch

Da es ein Ziel der vorliegenden Arbeit war, möglichst einfache Modelle ohne die Notwendigkeit der Modellkalibrierung zu entwickeln, wurde für die Erstellung der drei Widerstandsmatrizen auf Forschungsergebnisse des U.S.-Verkehrsministeriums zurückgegriffen. In der zitierten Studie "Urban Trip Distribution Friction Factors" sind die Kali-

brierungsergebnisse fast aller Verkehrsverteilungsmodelle für U.S.-Städte, nach Größenordnung unterschieden, bis Anfang der siebziger Jahre zusammengestellt. Beispielsweise findet man in der Gruppe der 50.000 bis 500.000 Einwohner zählenden Städte die Widerstandsfaktoren, nach Verkehrszwecken getrennt, graphisch dargestellt (empirisch ermittelte Widerstandsfaktoren als Y-Werte und Reisezeit in Minutenabständen als X-Werte). In die graphische Darstellung aller Widerstandsfaktoren für die einzelnen Verkehrszwecke und Größenordnungen wurden Kurven eingerechnet, die die vorhandenen Kalibrierungsergebnisse am besten repräsentieren. Die Kurven entsprechen also dem Versuch einer räumlichen Übertragung der empirisch ermittelten Widerstandsfaktoren. Im Falle des Gravitationsmodells der Gleichung (7) wurden die den drei Verkehrszwecken entsprechenden Kurven für die Größenordnung 50.000 bis 500.000 Einwohner benutzt. Der Output der Verkehrsverteilung (siehe Abb. 1) besteht aus drei Gesamtfahrtenmatrizen, in denen die Summe aller Quell- bzw. Zielfahrten pro Verkehrszweck und die Gesamtsumme aller Quell- bzw. Zielfahrten natürlich mit den Werten der Tabelle 2 übereinstimmen.

Die Verkehrsmittelwahl erfolgte mittels eines Logit-Modells für zwei Verkehrsmittel. Logit-Modelle sind probabilistische Auswahlmodelle, die der Ökonometrie entstammen. Sie haben seit Mitte der siebziger Jahre vorwiegend in Nordamerika die herkömmlichen Verkehrsmittelwahlmodelle ersetzt. Auf eine ausführliche Darstellung dieses Modellansatzes muß jedoch an dieser Stelle verzichtet werden. Leicht verständliche Beschreibungen des Modells finden sich z. B. bei *Ben-Akiva* und *Atherton*, *R. H. Pratt Assoc.* und *Wermuth*⁵⁾. Im Rahmen dieser Arbeit kam folgende Form des Logit-Modells zur Anwendung:

$$P_{ijm}^z = \frac{e^{U_{ijm}^z}}{\sum_k e^{U_{ijk}^z}} \quad (8)$$

wobei bedeuten:

P_{ijm}^z = Auswahlwahrscheinlichkeit für die Wahl des Verkehrsmittels m (Auto oder ÖPNV) zwischen Zone i und Zone j

U_{ijm}^z = Nutzenfunktion (Nutzwert) für das Verkehrsmittel m zwischen Zone i und Zone j

k = laufender Index für beide Verkehrsmittel

z = alle Input- und Outputwerte sind fahrtzweckspezifisch

e = Basis des natürlichen Logarithmus

Die rechte Seite der Gleichung (8) zeigt, daß das Modell nur Wahrscheinlichkeiten bzw. Anteile liefern kann. Es wird deshalb auch oft als Anteilsmodell ("Share Model") be-

5) Vgl. *Ben-Akiva, M. and Atherton, T.*, Methodology for shortrange travel demand predictions, in: *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 7 (1977), S. 224 ff.; *R. H. Pratt Associates, Inc.*, Development and calibration of mode choice models for the Twin Cities Area, Washington, D.C. 1976; *Wermuth, M.*, Verhaltensorientierte Verkehrsnachfragemodelle – Prinzipien und praktische Anwendbarkeit, in: *Schriftenreihe der DVWG*, B 57 (1981), S. 96 ff.

zeichnet. Der eigentliche Modal Split wird durchgeführt, indem die aus der Verkehrsverteilung stammenden Gesamtfahrtenmatrizen T_{ij}^z mit den Wahrscheinlichkeitsmatrizen P_{ijm}^z gewichtet werden, also

$$T_{ijm}^z = P_{ijm}^z \cdot T_{ij}^z \quad (9)$$

wobei

T_{ijm}^z = alle Fahrten mit Verkehrsmittel m zwischen Zone i und Zone j für Fahrtzweck z.

T_{ijm}^z entspricht den geschätzten ÖPNV-Fahrtenmatrizen für die drei betrachteten Verkehrszwecke (siehe Abb. 1). Diese bilden den ersten Input für das Lineare Programmierungsmodell.

Für die Variable U_{ijm}^z wurde folgende Nutzenfunktion spezifiziert:

$$U_{ijm} = b_1 \cdot IVTT_{ijm} + b_2 \cdot OVTT_{ijm} + (b_3 / INCOME_i) \cdot OPTC_{ijm} \quad (10)$$

Hierbei bedeuten

$IVTT_{ijm}$ = innerhalb des Verkehrsmittels m verbrachte Reisezeit (in Minuten) zwischen Zone i und Zone j ($IVTT = \text{In-vehicle travel time}$)

$OVTT_{ijm}$ = außerhalb des Verkehrsmittels m verbrachte Reisezeit (in Minuten) zwischen Zone i und Zone j ($OVTT = \text{Out-of-vehicle travel time}$)

$OPTC_{ijm}$ = Reisekosten (in Cents) für Verkehrsmittel m zwischen Zone i und Zone j ($OPTC = \text{Out-of-pocket travel cost}$)

$INCOME_i$ = durchschnittliches Haushaltseinkommen in Zone i

b_1, b_2, b_3 = Koeffizienten

Untersuchungen in den U.S.A.⁶⁾ haben ergeben, daß die Werte der Koeffizienten b_1, b_2, b_3 räumlich übertragbar erscheinen. Es wurde festgestellt, daß Kalibrierungen der Nutzenfunktion in der Form der Gleichung (10) für verschieden große Städte in unterschiedlichen Teilen der U.S.A. zu nahezu zahlenmäßig gleichwertigen Parametern b_1, b_2, b_3 führten.

Um dem Ziel möglichst einfacher Modelle auch für die Modal-Split-Phase gerecht zu werden, wurden die in Tabelle 3 dargestellten Parameterwerte der Literatur entnommen⁷⁾:

Tabelle 3: Koeffizienten für Logit-Modell

Koeffizient für	WA	WÜ	NWB
$IVTT$ (in Minuten) = b_1	0.032	0.007	0.010
$OVTT$ (in Minuten) = b_2	0.052	0.018	0.025
$OPTC$ (in Cents) = b_3	0.010	0.010	0.004

6) Vgl. Ben-Akiva, M. and Atherton, T., Methodology . . . , a.a.O.

7) Vgl. Kumar, A., Pivot Point modeling procedures in demand estimation. ASCE Transportation Engineering Journal, Vol. 6 (1980), S. 647 ff.; R. H. Pratt Associates, Inc., Development . . . , a.a.O.

Werte der Variablen INCOME sind nur für die Verkehrszwecke WA und WÜ benutzt worden, nicht jedoch für den Verkehrszweck NWB, weil der Beginn einer NWB-Fahrt in Zone i nicht mit dem durchschnittlichen Haushaltseinkommen dieser Zone i in Zusammenhang gebracht werden darf. Für diesen Fall lautet die Nutzenfunktion demnach:

$$U_{ijm} = b_1 \cdot IVTT_{ijm} + b_2 \cdot OVTT_{ijm} + b_3 \cdot OPTC_{ijm} \quad (10a)$$

Die der Nutzenfunktion der Gleichungen (10) und (10a) zugrunde liegende Annahme besteht darin, daß das Auswahlverhalten von Verkehrsteilnehmern durch die vier Variablen IVTT, OVTT, OPTC und INCOME ausreichend genau erklärt werden kann. Da die Ergebnisse praktischer Modellanwendungen diese Annahme jedoch nicht rechtfertigen, enthalten die meisten Nutzenfunktionen Konstanten, die diejenigen Faktoren im Auswahlverhalten der Verkehrsteilnehmer zu berücksichtigen haben, die nicht explizit im Modell erklärt werden. Für ein Logit-Modell, das zwei Verkehrsmittel und drei Verkehrszwecke zu berücksichtigen hat, sind drei Konstanten zu errechnen, jeweils eine für einen Verkehrszweck, die der Nutzenfunktion des Verkehrsmittels Auto zugeschlagen werden. Im folgenden wird kurz beschrieben, wie diese drei Konstanten wertmäßig für den vorliegenden Untersuchungsraum hergeleitet wurden.

Zunächst ist davon ausgegangen worden, daß der Betreiber eines Nahverkehrssystems in der Lage ist, den Gesamt-ÖPNV-Anteil an allen täglichen Fahrten im Untersuchungsraum grob abzuschätzen. Da er die Anzahl der täglich verkauften Fahrscheine in den verschiedenen Preis- oder Tarifklassen kennt, kann er die Gesamtzahl der täglichen ÖPNV-Benutzer ermitteln. Wenn er zusätzlich die Gesamteinwohnerzahl des Untersuchungsraumes erfragt und eine bestimmte tägliche Fahrtenrate pro Einwohner (von z. B. 3,5 Fahrten pro Tag) zugrunde legt, läßt sich die Summe aller täglichen Fahrten im Untersuchungsraum und damit der gesuchte Gesamt-Modal-Split für ÖPNV schätzen. Dieser lag im vorliegenden Fall bei ca. 8 % und wurde für die folgende Rechnung benutzt.

Zunächst ließen sich mit Hilfe der Gleichungen (10) und (10a) den gesamten Untersuchungsraum repräsentierende fahrtzweckspezifische Durchschnittsnutzwerte, die mit einer ÖPNV-Fahrt und einer Autofahrt verbunden sind, berechnen. Diese sechs Nutzwerte reflektieren aber nur die Beiträge, die die Variablen IVTT, OVTT, OPTC und INCOME zur Erklärung der Verkehrsmittelwahl leisten konnten. In das Logit-Modell der Gleichung (9) eingesetzt, ergaben sie ÖPNV-Anteile, die den angenommenen ÖPNV-Modal-Split von 8 % bei weitem übertrafen. Somit waren die drei Konstanten der Nutzenfunktion des Verkehrsmittels Auto derart zu bestimmen, daß sie einen Gesamt-Modal-Split für ÖPNV von rund 8 % ermöglichen würden. Dieses ließ sich erreichen, indem die Durchschnittsnutzwerte für ÖPNV konstant gehalten und diejenigen des Verkehrsmittels Auto solange variiert wurden, bis die erzeugten Modal Splits dem „wahren“ Modal Split von 8 % nahe kamen.

In Tabelle 4 sind die Werte für die Konstanten in der Nutzenfunktion des Verkehrsmittels Auto enthalten. Mit Konstanten hat die Nutzenfunktion demnach folgendes Aussehen:

$$U_{ijm} = \pounds + b_1 \cdot IVTT_{ijm} + b_2 \cdot OVTT_{ijm} + b_3 \cdot OPTC_{ijm} \quad (10b)$$

wobei \pounds die Konstante darstellt.

Tabelle 4: Werte der Konstanten \mathcal{L} der Nutzenfunktion für das Verkehrsmittel Auto

Verkehrszweck	Wert
Wohnung – Arbeit (WA)	0.750
Wohnung – übrige Ziele (WÜ)	1.520
Nicht wohnungsbezogene Fahrten (NWB)	1.270

Die Größe dieser drei Werte für die Konstante zeigt, daß das Modal-Split-Modell ohne Konstanten in der Nutzenfunktion des Verkehrsmittels Auto die ÖPNV-Benutzung – wie gesagt – beträchtlich überschätzt hätte. Dieses impliziert, daß die Variablen IVTT, OVTT, OPTC und INCOME das Auswahlverhalten der Verkehrsteilnehmer nicht genau genug abbilden können.

In Tabelle 5 sind die Resultate, die mittels des Modal-Split-Modells erzeugt wurden, im Vergleich zu den Basiswerten dargestellt. Diese wurden wiederum der 1977er Springfield-Studie entnommen.

Tabelle 5: Reproduzierte Modal-Split-Ergebnisse im Vergleich zu den Basiswerten

	Modellergebnisse	Basiswerte
Summe aller ÖPNV-Fahrten	43.145	40.700
Intrazonale ÖPNV-Fahrten	6.284	2.626
Interzonale ÖPNV-Fahrten	36.861	38.074
Anteil ÖPNV	8,86 %	8,44 %

Generell zeigen die Ergebnisse, daß die getesteten drei Modelle in der Lage sind, die Basiswerte mit genügender Genauigkeit zu reproduzieren. Die Zahl der geschätzten interzonalen ÖPNV-Fahrten unterscheidet sich von der tatsächlichen Anzahl an interzonalen ÖPNV-Fahrten um nur 1213 Fahrten. Die große Überschätzung der intrazonalen Fahrten erscheint nicht schwerwiegend zu sein, da sich ÖPNV-Betreiber für diese Fahrten weniger interessieren. Ein Vergleich der geschätzten ÖPNV-Gesamtfahrtenmatrix, die also alle drei Verkehrszwecke umfaßt, mit der analogen Fahrtenmatrix der Springfield-Studie mittels einer einfachen Korrelationsrechnung ergab ein Bestimmtheitsmaß von 0,94. Aus diesem guten Ergebnis kann der Schluß gezogen werden, daß die hier vorgestellten einfachen Modelle zur Verkehrserzeugung, -verteilung und -mittelwahl für die Ermittlung von geschätzten ÖPNV-Matrizen gut genug sind.

3. Ein lineares Programmierungsmodell zur Korrektur von Fahrtenmatrizen

Die Rolle des LP-Modells als vierte Modellkomponente in der in Abbildung 1 gezeigten Modellsequenz ist die eines Korrekturmechanismus. Das Modell soll als eine Methode verstanden werden, mit deren Hilfe eine erste Abschätzung der ÖPNV-Benutzung (wie in den geschätzten Fahrtenmatrizen zum Ausdruck gebracht) in eine viel genauere Schätzung der ÖPNV-Benutzung (wie in den korrigierten Fahrtenmatrizen enthalten) umge-

wandelt werden kann. Der Gewinn an Genauigkeit wird dadurch erreicht, indem die durch Zu- und Abgangszählungen an Haltestellen gewonnenen Informationen vom LP-Modell ausgewertet werden. Damit stellt die hier benutzte Modellsequenz eine wesentliche Abweichung vom herkömmlichen Planungsprozeß in der Verkehrsplanung dar, der aus Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung, Verkehrsmittelwahl und Verkehrsumlegung besteht.

An ÖPNV-Haltestellen durchgeführte Abgangs- und Zugangszählungen geben Auskunft über den Umfang der ÖPNV-Benutzung auf den einzelnen Streckenabschnitten des ÖPNV-Netzes, die durch die Haltestellenabstände bestimmt sind. Im folgenden werden die aus Haltestellenzählungen gewonnenen Zu- und Abgangsinformationen als Streckenbelastungen bezeichnet. Diese Streckenbelastungsdaten alleine reichen für das LP-Modell jedoch nicht aus, um eine Fahrtenmatrix zu erzeugen, die die existierende ÖPNV-Nachfrage im Untersuchungsraum genügend genau reproduziert. Da normalerweise viel weniger Streckenabschnitte (d. h. Streckenbelastungsdaten) im Netz auftreten als Quell-Ziel-Beziehungen (d. h. Unbekannte) existieren, ist das LP-Modell unterspezifiziert⁸⁾. Um dieses Problem lösen zu können, wird neben den Streckenbelastungsdaten Information notwendig, die der geschätzten Fahrtenmatrix, gewonnen aus der Sequenz der drei ersten Modellkomponenten, entnommen wird. Diese Matrix, vorausgesetzt, sie ist einigermaßen genau, versorgt das LP-Modell mit einem sehr wesentlichen Merkmal für die Erstellung von korrigierten Fahrtenmatrizen, nämlich mit der Verteilung der ÖPNV-Benutzerhäufigkeiten auf den einzelnen Quell-Ziel-Paaren. Selbst wenn in der geschätzten Fahrtenmatrix die Gesamtbenutzung des ÖPNV-Mittels schwerwiegend über- oder unterschätzt wird, so enthält diese Matrix aufgrund des Wesens der ersten drei Teilmodelle doch das Muster der Verteilung der ÖPNV-Benutzung im Untersuchungsraum, d. h. stark benutzte Quell-Ziel-Beziehungen zwischen Wohngebieten und Innenstadt bzw. Industrie- und Gewerbegebieten und schwach benutzte Quell-Ziel-Paare zwischen Wohngebieten.

In der jüngsten Vergangenheit sind in den U.S.A. einige Versuche unternommen worden, Fahrtenmatrizen aus Streckenbelastungsinformationen herzuleiten⁹⁾. Das hier benutzte LP-Modell versucht, eine korrigierte Fahrtenmatrix zu ermitteln, die, wenn sie auf das ÖPNV-Netz umgelegt wird, die als Input benutzten Streckenbelastungsdaten reproduziert und, unter Einhaltung dieser Bedingung, der geschätzten Fahrtenmatrix so nahe wie

8) Vgl. *Turnquist, M. and Gur, Y.*, Estimation of trip tables from observed link volumes. *Transportation Research Record* 730, (1979), S. 1 ff.

9) Vgl. *Turnquist, M. and Gur, Y.*, Estimation . . . , a.a.O.; *Gur, Y., Turnquist, M. A., Schneider, M. and LeBlanc, L.*, Determining an origin-destination trip table based on observed link volumes. Presented at ORSA Annual Meeting, New York 1978; *van Zuylen, H. J. and Willumsen, L. G.*, The most likely trip matrix estimated from traffic counts, in: *Transportation Research*, 14B(3), 1980, S. 281 ff.; *Carey, M., Hendrickson, C. and Siddharthan, K.*, A method for direct estimation of origin/destination matrices, in: *Transportation Science*, Vol. 15 (1981), S. 32 ff.; *Willis, A. E. and May, A. D.*, Deriving origin-destination information from routinely collected traffic counts, Volume I: Trip Synthesis for Single Path Networks, University of California at Berkeley, Institute of Transportation Studies, Research Report UCB-ITS-RR-81-9, 1981; *Han, A. F., Dowling, R. G., Sullivan, E. C. and May, A. D.*, Deriving origin-destination information from routinely collected traffic counts, Volume II: Trip Table Synthesis for Multipath Networks, University of California at Berkeley, Institute of Transportation Studies, Research Report UCB-ITS-RR-81-9, 1981; *LeBlanc, L. J. and Farhangian, K.*, Selection of a trip table which reproduces observed links flows, in: *Transportation Research*, 16B(2), 1982, S. 83 ff.

möglich kommt. Um diese korrigierte ÖPNV-Matrix zu finden, ist die folgende mathematische Formulierung des LP-Problems notwendig.

Der Vektor der durch Ab- und Zugangszählungen entstandenen Streckenbelastungsdaten wird als F bezeichnet, und F_a ist die Streckenbelastung der Strecke a in einer Richtung. Streckenbelastung F_a umfaßt somit alle ÖPNV-Benutzer, die von irgendwelchen Quellzonen i zu irgendwelchen Zielzonen j über Streckenabschnitt a fahren. Wenn nun F_a^{ij} die ÖPNV-Benutzer repräsentiert, die von einer bestimmten Zone i zu einer bestimmten Zone j über a fahren, läßt sich F_a wie folgt schreiben

$$F_a = \sum_{ij} F_a^{ij} \quad (11)$$

Auf der anderen Seite repräsentiert F_a^{ij} einen bestimmten Anteil P_{ij}^a aller ÖPNV-Fahrten auf der Quell-Ziel-Beziehung von i nach j , die als T_{ij} bezeichnet werden. Daraus ergibt sich

$$F_a^{ij} = P_{ij}^a \cdot T_{ij}, \quad 0 \leq P_{ij}^a \leq 1 \quad (12)$$

P_{ij}^a ist gleich null, wenn keine ÖPNV-Fahrten von i nach j über Streckenabschnitt a stattfinden und gleich eins, wenn alle ÖPNV-Fahrten zwischen i und j über a gehen. Da davon ausgegangen werden kann, daß ÖPNV-Benutzer immer den kürzesten Weg zwischen ihren Quellen i und Zielen j wählen, hat P_{ij}^a den Wert 1 für alle Streckenabschnitte a , die auf dem kürzesten Weg zwischen i und j liegen und den Wert 0 für alle übrigen Streckenabschnitte a des ÖPNV-Netzes. Die Gleichungen (11) und (12) lassen sich zu folgendem Ausdruck vereinen

$$F_a = \sum_{ij} P_{ij}^a \cdot T_{ij} \quad (13)$$

Die Streckenbelastung F_a auf der Strecke a wird jetzt über T_{ij} ausgedrückt. Da eine derartige Gleichung für jeden Streckenabschnitt a existiert, erhält man einen Satz linearer Gleichungen, der sich wie folgt schreiben läßt:

$$F = P T \quad (14)$$

wobei P eine Matrix ist, die aus den Elementen P_{ij}^a besteht, und T einen Vektor darstellt, dessen Elemente T_{ij} sind.

Das in dieser Studie benutzte ÖPNV-Netz (Abb. 2) hat 134 Streckenabschnitte a und 600 Quell-Ziel-Paare T_{ij} . Gleichung (14) repräsentiert somit 134 Gleichungen (Streckenbelastungen) in 600 Unbekannten (Quell-Ziel-Paare), wobei F ein (134 x 1) Vektor aus Streckenbelastungen, T ein (600 x 1) Vektor aus noch unbekanntem Fahrtenhäufigkeiten und P eine (134 x 600) Matrix ist, die nur aus 0 und 1 besteht. Der Vektor T ist durch das LP-Modell zu bestimmen, und die Matrix P , die sogenannte Quell-Ziel-Strecken-Benutzungs-Tafel, wird im folgenden aus ODLUT bezeichnet (für Origin-Destination-Link-Utilization-Table). Da es sich bei der Umlegung von ÖPNV-Fahrten auf das ÖPNV-Netz um eine Alles-oder-Nichts-Umlegung handelt, kann der ODLUT auf der Basis der Kürzesten-Wege-Informationen bestimmt werden, die vom Routensuch-Algorithmus für ÖPNV-Netze ausgegeben werden.

Der ODLUT stellt somit den dritten Input für das LP-Modell dar, neben den Streckenbelastungsdaten und der geschätzten Fahrtenmatrix. Bezeichnet man die Elemente der geschätzten Fahrtenmatrix mit D_{ij} , die Elemente der gesuchten korrigierten Matrix mit T_{ij} , die Elemente des ODLUT – wie schon gesagt – mit P_{ij}^a und den Vektor der Streckenbelastungen mit F_a , dann lautet das LP-Problem wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{ij} |T_{ij} - D_{ij}| \\ \text{s.d.} \quad & \sum_{ij} P_{ij}^a \cdot T_{ij} = F_a, \quad \text{für alle } a \\ & T_{ij} \geq 0, \quad \text{für alle } ij \end{aligned} \quad (P1)$$

Um den Unterschied zwischen der korrigierten Fahrtenmatrix T und der geschätzten Fahrtenmatrix D zu messen, wurde die Summe der Absolutwerte $|T_{ij} - D_{ij}|$ bestimmt.

Die Problemformulierung (P1) würde dann nicht lösbar sein, wenn zwischen der im ODLUT enthaltenen Kürzesten-Wege-Information und dem tatsächlichen Wegewahlverhalten der ÖPNV-Benutzer, wie es in den Streckenbelastungsdaten zum Ausdruck kommt, eine Diskrepanz bestünde. Um einem derartigen Problem von vornherein aus dem Wege zu gehen, wurde (P1) umformuliert, indem es den Nebenbedingungen ermöglicht wurde, Ungenauigkeiten bei der Reproduktion des Vektors der Streckenbelastungen F_a zu akzeptieren. Es sei der Klarheit halber an dieser Stelle daran erinnert, daß das LP-Modell versucht, eine korrigierte ÖPNV-Fahrtenmatrix zu ermitteln, die, wenn sie auf das ÖPNV-Netz umgelegt wird, die als Input benutzten Streckenbelastungen F_a reproduziert und, unter Einhaltung dieser Bedingung, der geschätzten Fahrtenmatrix so nahe wie möglich kommt. Um also das in (P1) formulierte Problem lösen zu können, muß darauf verzichtet werden, daß die Streckenbelastungen F_a genauestens von (P1) reproduziert werden. Da aber andererseits diese Ungenauigkeit möglichst klein zu halten ist, wurden zusätzliche Terme in die Objektfunktion aufgenommen. Diese reflektieren die „Kosten“, die mit einer Abweichung von den ursprünglichen Streckenbelastungen F_a verbunden sind. Die modifizierte Problemformulierung lautet wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{ij} |T_{ij} - D_{ij}| + \sum_a k_a |f_a - F_a| \\ \text{s.d.} \quad & \sum_{ij} P_{ij}^a \cdot T_{ij} = f_a, \quad \text{für alle } a \\ & T_{ij} \geq 0, \quad \text{für alle } ij \\ & f_a \geq 0, \quad \text{für alle } a \end{aligned} \quad (P2)$$

Es ist zu beachten, daß der Vektor f als zusätzliche Variable ins Modell aufgenommen wurde, der die nunmehr zu bestimmenden Streckenbelastungen f_a repräsentiert. F_a ent-

spricht nach wie vor den vorgegebenen Streckenbelastungen. k_a ist ein Gewichtungsfaktor, mit dem die Abweichungen $|f_a - F_a|$, d. h. zwischen den zu bestimmenden und den vorgegebenen Streckenbelastungen verschieden stark gewichtet werden können. Der Einfachheit halber wurde der Gewichtungsfaktor in der vorliegenden Arbeit gleich eins gesetzt.

Um nun Problemformulierung (P2) mittels eines mathematischen Programmierungspaketes EDV-mäßig lösen zu können, mußte es in ein sogenanntes „äquivalentes LP-Problem“ umgewandelt werden. Der Grund dafür liegt darin, daß Computerprogramme zur mathematischen Programmierung nicht mit Absolutbeträgen wie $|T_{ij} - D_{ij}|$ oder $|f_a - F_a|$ in Objektfunktionen arbeiten können. Zu diesem Zweck wurden die Variablen V_{ij} und W_{ij} , die positive bzw. negative Differenzen zwischen T_{ij} und D_{ij} repräsentieren, und die Variablen y_a und z_a , die ebenfalls positive bzw. negative Differenzen zwischen f_a und F_a darstellen, in die Objektfunktion aufgenommen. Somit lautet die äquivalente LP-Formulierung:

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_{ij} (V_{ij} + W_{ij}) + \sum_a k_a (y_a + z_a) \\ \text{s.d. } & \sum_{ij} p_{ij}^a \cdot T_{ij} - y_a + z_a = f_a, \quad \text{für alle } a \\ & T_{ij} - V_{ij} + W_{ij} = D_{ij}, \quad \text{für alle } ij \quad (P3) \\ & T_{ij}, V_{ij}, W_{ij} \geq 0, \quad \text{für alle } ij \\ & y_a, z_a \geq 0, \quad \text{für alle } a \end{aligned}$$

Dieses LP-Modell wurde benutzt, um die korrigierte ÖPNV-Matrix zu berechnen.

Um nun die Genauigkeit dieser Fahrtenmatrix, die ja die existierende ÖPNV-Nachfrage im Untersuchungsgebiet reproduzieren soll, messen zu können, wurde sie mit der analogen Fahrtenmatrix der Basiswerte, die der 1977er Studie für Springfield entstammte, verglichen. Eine einfache lineare Regressionsrechnung ergab ein R^2 von 0,958, einen Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der y-Achse von -3,16 und eine Steigung dieser Geraden von 1,09. Diesen drei Indikatoren kann entnommen werden, daß die aus dem LP-Modell (P3) stammende ÖPNV-Matrix der analogen Fahrtenmatrix der Basiswerte sehr nahe kommt. Ein Bestimmtheitsmaß von 0,958 bedeutet, daß die Werte der erzeugten Matrix nur 4,2 % der Varianz der Werte der Basismatrix nicht erklären können. Ebenso deutet eine Steigung nahe eins darauf hin, daß die Regressionsgerade der 45°-Linie sehr nahe kommt. Schließlich ist der Achsenabschnitt von -3,16 nahe null, wenn er mit einer durchschnittlichen Fahrtenhäufigkeit der Basismatrix von $\bar{T}_{ij} = 63$ verglichen wird. Es muß an dieser Stelle daran erinnert werden, daß die geschätzte ÖPNV-Fahrtenmatrix vom Logit-Modell der Gleichungen (8) und (10) auf der Basis der Annahme ermittelt wurde, der Gesamt-Modal-Split für ÖPNV betrage 8 %.

Um in einem weiteren Schritt die Sensitivität des LP-Modells (P3) zu analysieren, wurden für das gesamte Untersuchungsgebiet Modal Splits für ÖPNV von 5 % und 10 % angenom-

men. In Tabelle 6 werden die Ergebnisse der beiden geschätzten ÖPNV-Matrizen mit der Basismatrix verglichen.

Tabelle 6: Vergleich der 5 %- und 10 %- geschätzten ÖPNV-Matrizen mit der Basismatrix

	Basismatrix Basiswerte	Geschätzte Matrizen	
		5 %-Version	10 %-Version
Anzahl aller ÖPNV-Fahrten	40.700	27.332	53.031
Intrazonale ÖPNV-Fahrten	2.626	3.982	7.777
Interzonale ÖPNV-Fahrten	38.074	23.350	45.254
Modal Split	8,44 %	5,61 %	10,89 %

Tabelle 7 enthält die Ergebnisse der Regressionsanalysen zwischen der Basismatrix und den beiden korrigierten 5 %- und 10 %-ÖPNV-Matrizen.

Tabelle 7: Ergebnisse der Regressionsanalysen zwischen der Basismatrix und den beiden korrigierten 5 %- und 10 %-ÖPNV-Matrizen

Y	X	R^2	Achsenabstand	Steigung
Basismatrix	5 % korr. Matrix	0.940	6.15	0.92
Basismatrix	10 % korr. Matrix	0.945	- 3.39	1.09

In beiden Fällen zeigen die drei Indikatoren Bestimmtheitsmaß, Achsenabstand und Steigung, daß das LP-Modell (P3) offensichtlich in der Lage ist, genügend genaue ÖPNV-Fahrtenmatrizen zu erstellen, auch wenn die vorgegebenen geschätzten ÖPNV-Matrizen wie im Falle der 5 %- und 10 %-Modal-Split-Annahmen sehr ungenau sind. Die Unterschiede in den R^2 -Werten für die korrigierten 5 %, 8 %- und 10 %-Matrizen sind vernachlässigbar, ebenso wie die Unterschiede zwischen den drei Achsenabschnitten und den drei Steigungen. Aus diesen Ergebnissen kann ein für die Betreiber von ÖPNV-Systemen wichtiger Schluß gezogen werden. Offensichtlich ist es nicht notwendig, den Gesamt-Modal-Split für ÖPNV, der in das Logit-Modell zur Schätzung der Konstanten eingegeben werden mußte, genau zu schätzen. Eine grobe Schätzung ist ausreichend, um gute Ergebnisse vom LP-Modell (P3) zu erhalten.

Andererseits sind den in einer geschätzten Fahrtenmatrix enthaltenen Ungenauigkeiten auch Grenzen gesetzt. Um diese Leistungsgrenze des LP-Modells zu ermitteln, wurde eine Matrix in (P3) eingegeben, in der alle T_{ij} -Werte zahlenmäßig gleich waren (es wurde $\bar{T}_{ij} = 63$ als durchschnittliche Fahrtenhäufigkeit der Basismatrix zwischen allen Quellzonen i und Zielzonen j gewählt). In diesem – wohl gemerkt extremen – Fall konnte (P3) keine brauchbare ÖPNV-Matrix erzeugen. Daraus kann wiederum geschlossen werden, daß die ersten drei Modellkomponenten zur Verkehrserzeugung, -verteilung und -mittelwahl notwendig sind, um eine geschätzte ÖPNV-Fahrtenmatrix zu generieren, die dem LP-Modell als Startpunkt dient. Dabei ist eine möglichst genaue Schätzung der Gesamtzahl aller ÖPNV-Fahrten für alle Quell-Ziel-Paare ($\sum_{ij} T_{ij}$) nicht das Hauptmerkmal der geschätzten Matrix, sondern eine einigermaßen genaue Reproduktion des Musters der Verteilung der

ÖPNV-Benutzung auf die einzelnen Quell-Ziel-Paare. Dieses kann auch anhand der in Tabelle 8 dargestellten Ergebnisse erläutert werden.

Tabelle 8: Durchschnittliche ÖPNV-Fahrtenhäufigkeiten pro Quell-Ziel-Paar für Basismatrix und alle geschätzten bzw. korrigierten Matrizen

Fall	VOR-LP (geschätzt)	Mittelwerte (\bar{T}_{ij})	NACH-LP (korrigiert)
Basismatrix		63.46	
5 %-Matrix	38.92		62.56
8 %-Matrix	61.44		60.98
10 %-Matrix	75.42		61.61

Für jede der sieben betrachteten Matrizen wurde die durchschnittliche ÖPNV-Häufigkeit aller Quell-Ziel-Paare ermittelt. Ein Vergleich der VOR-LP-Mittelwerte mit den korrespondierenden NACH-LP-Werten zeigt, daß das LP-Modell in der Lage ist, die geschätzten durchschnittlichen Benutzerhäufigkeiten (VOR-LP) zu erhöhen oder zu reduzieren, um sie (NACH-LP) dem Durchschnittswert der Basismatrix von $\bar{T}_{ij} = 63$ anzupassen. Obwohl die VOR-LP-Werte zwischen 38 und 76 lagen, variieren die NACH-LP-Werte nur zwischen 61 und 63.

Abschließend sei nochmals darauf hingewiesen, daß das LP-Modell keine fahrtzweckspezifischen ÖPNV-Fahrtenmatrizen erzeugen kann, weil die Streckenbelastungen F_a nicht fahrtzweckspezifisch erfaßt werden können. Da die im folgenden Abschnitt beschriebene Pivot-Point-Analyse jedoch mit fahrtzweckspezifischen Matrizen arbeitet, mußte die aus (P3) kommende Gesamt-ÖPNV-Matrix in fahrtzweckspezifische korrigierte ÖPNV-Matrizen aufgeteilt werden. Dies geschah mit Hilfe von Aufteilungsfaktoren, die aus der Verkehrsverteilung gewonnen wurden.

4. Pivot-Point-Analyse mittels eines inkrementellen Modal-Split-Modells

Die drei korrigierten ÖPNV-Fahrtenmatrizen, die man als Output der vierten Modellkomponente (siehe Abb. 1) erhält, geben dem ÖPNV-Betreiber eine ausreichend genaue Bestandsaufnahme der existierenden ÖPNV-Nachfrage zwischen allen Quell-Ziel-Paaren im Untersuchungsraum. Damit besitzt er die Datenbasis, um Serviceplanungen durchführen zu können. So wird er sich dafür interessieren, inwieweit Veränderungen im Angebot wie Reisezeitverkürzungen und -verlängerungen oder auch Fahrpreiserhöhungen und -senkungen sich auf das Benutzerverhalten auswirken würden. Derartige Angebotsveränderungen kann er für sein gesamtes ÖPNV-System in Erwägung ziehen oder aber nur für bestimmte Linien, die wiederum ganz bestimmte Quell-Ziel-Paare berühren. Ohne eine vorausschauende Serviceplanung, wie sie in diesem Abschnitt beschrieben wird, können einmal ins ÖPNV-System eingeführte Reisezeit- und Fahrpreisveränderungen wirkungslos

bleiben, weil der Betreiber des Systems vor Einführung der Maßnahme(n) keinen Anhaltspunkt über das Ausmaß der Benutzerreaktion hatte. Um die Auswirkungen der genannten Maßnahmen quantitativ abzuschätzen, was dem Betreiber Einnahme- und Kostenkalkulationen ermöglichen würde, empfiehlt sich die Anwendung der sogenannten inkrementellen Form des Logit-Modells.

Mit Hilfe dieser Methode, die auf dem vollen Logit-Modell der Gleichung (8) basiert, können Veränderungen im Benutzerverhalten aufgrund von Level-of-Service (LOS) Veränderungen, die die Fahrpreis- oder Reisezeitänderungen zum Ausdruck bringen, vorhergesagt werden. Das inkrementelle Logit-Modell hat folgende Form¹⁰⁾.

$$\hat{P}_{ijm}^z = \frac{P_{ijm}^z \cdot e^{\Delta U_{ijm}^z}}{\sum_k P_{ijm}^z \cdot e^{\Delta U_{ijm}^z}} \quad (15)$$

Dabei bedeuten:

P_{ijm} = Bisherige Auswahlwahrscheinlichkeit für die Wahl des Verkehrsmittels m (ÖPNV) und k (allgemein für Auto und ÖPNV) zwischen Zone i und Zone j

\hat{P}_{ijm} = Veränderte Auswahlwahrscheinlichkeit für die Wahl des Verkehrsmittels m (ÖPNV) und k (allgemein für Auto und ÖPNV) zwischen Zone i und Zone j

ΔU_{ijm} = Veränderung im Nutzwert für das Verkehrsmittel m zwischen Zone i und Zone j aufgrund der Reisezeit- oder Fahrpreisveränderungen

z und e wie in Gleichung (8).

Aus Gleichung (15) wird ersichtlich, daß, wenn P_{ijm} gleich null, \hat{P}_{ijm} ebenfalls gleich null. Diese Modellformulierung erlaubt außerdem die Simulation der Auswirkungen von Nutzenveränderungen für alle betrachteten Verkehrsmittel k . Da jedoch die LOS-Veränderungen im ÖPNV den LOS des Verkehrsmittels Auto nicht verändern, kann Gleichung (15) auch wie folgt geschrieben werden:

$$\hat{P}_{ijm}^z = \frac{P_{ijm}^z \cdot e^{\Delta U_{ijm}^z}}{P_{ijm}^z \cdot e^{\Delta U_{ijm}^z} + P_{ijk}^z} \quad (16)$$

wobei m den ÖPNV und k das Verkehrsmittel Auto repräsentieren: Gleichung (16) zeigt, daß das inkrementelle Logit-Modell sehr leicht anwendbar ist. Als Dateninputs werden benötigt:

- Die bisherigen Auswahlwahrscheinlichkeiten P_{ijm}^z .
- Die Koeffizienten derjenigen LOS-Variablen, deren Werte verändert werden.
- Die angenommenen Veränderungen im LOS.

10) Vgl. Kumar, A., Pivot Point modeling . . . , a.a.O.

Die Modellanwendung (z. B. per Taschenrechner, wie im folgenden Beispiel gezeigt) erfolgt normalerweise in zwei Schritten:

1. Die zu simulierenden LOS-Veränderungen werden auf eine oder mehrere betroffene Variablen der Nutzenfunktion, also auf IVTT, OVTT und/oder OPTC übertragen.
2. Das Modell wird für diejenigen Quell-Ziel-Paare und Verkehrszwecke angewendet, die von den betroffenen LOS-Veränderungen betroffen sind.

Das folgende kleine Beispiel soll die Arbeitsweise des inkrementellen Logit-Modells verdeutlichen.

1. Vorgaben und Annahmen

Betrachtet werden diejenigen Streckenabschnitte der Buslinie I (siehe Abb. 2), die vom südöstlichen Vorort zum Stadtzentrum führen. Der Klarheit halber ist dieser Netzteil nochmals in Abbildung 3 dargestellt.

Um den Rechenaufwand in Grenzen zu halten, seien auch nur die ÖPNV-Fahrten von den Wohngebieten ins Zentrum (inbound) betrachtet, nicht jedoch Fahrten in die umgekehrte

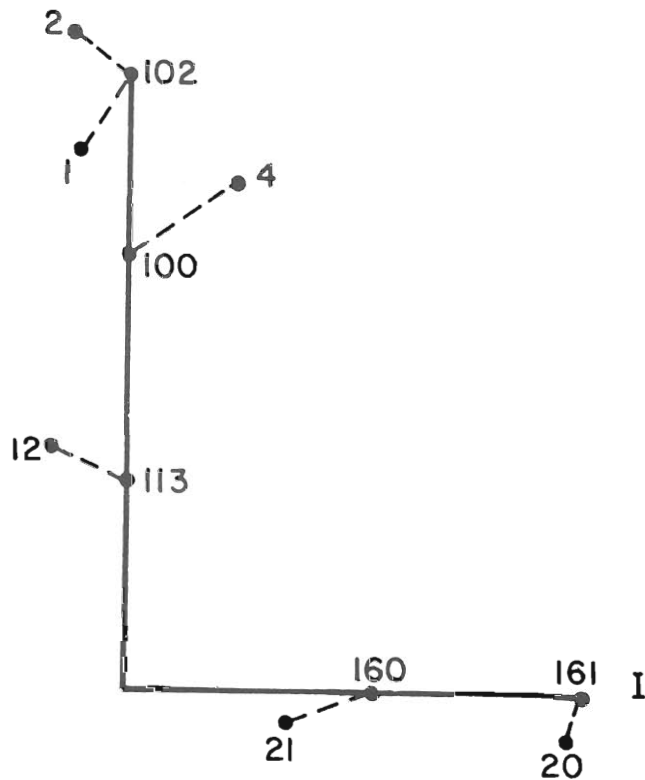


Abbildung 3: Teil der Linie I, die vom Südosten der Stadt ins Zentrum führt

Richtung (outbound). Ebenfalls wird nur der Verkehrszweck WA untersucht. Damit sind von der zu simulierenden Maßnahme folgende acht Quell-Ziel-Paare betroffen:

20 - 1	21 - 1	12 - 1	4 - 1
20 - 2	21 - 2	12 - 2	4 - 2

Die ins Modell einzugebende Maßnahme ist eine Verkürzung der Busfolgezeit. War die bisherige Busfolgezeit 20 Minuten, was zu einer mittleren Wartezeit von 10 Minuten führt, so soll die neue Folgezeit 10 Minuten betragen. Dies wiederum führt zu einer neuen mittleren Wartezeit von 5 Minuten und damit zu einer Reisezeitverkürzung von ebenfalls 5 Minuten.

2. Aufbereitung der Dateninputs

Der aus der vierten Modellkomponente stammenden korrigierten Fahrtenmatrix für den Verkehrszweck Wohnung - Arbeit (WA) konnte folgende bisherige ÖPNV-Benutzung auf den betroffenen Quell-Ziel-Paaren entnommen werden

VON i	NACH j		Σ
	1	2	
4	550	620	1170
12	420	510	930
20	370	450	820
21	350	280	630
Σ	1690	1860	3550

(M1)

Der aus der Verkehrsverteilung stammenden Gesamtfahrtenmatrix für den WA-Verkehrszweck wurden folgende Zahlen entnommen

VON i	NACH j		Σ
	1	2	
4	6150	7900	14050
12	5050	6700	11750
20	4800	5200	10000
21	4700	3550	8250
Σ	20700	23350	44050

(M2)

Aus (M1) und (M2) lassen sich leicht die bisherigen Auswahlwahrscheinlichkeiten P_{ijm} für die beiden betrachteten Verkehrsmittel bestimmen.

P_{ijm} für ÖPNV			P_{ijm} für Auto		
NACH j			NACH j		
VON i	1	2	VON i	1	2
4	0,089	0,078	4	0,911	0,922
12	0,083	0,076	12	0,917	0,924
20	0,077	0,087	20	0,923	0,913
21	0,074	0,079	21	0,926	0,921

(M3)

(M4)

Da es sich bei der zu simulierenden Maßnahme um eine Verkürzung der außerhalb des Verkehrsmittels verbrachten Reisezeit (OVTT) um 5 Minuten handelt, ist für die nach-

folgenden Berechnungen nur der Koeffizient b_2 der Variablen OVTT für den WA-Verkehrszweck von Interesse. Aus Tabelle 3

$$b_2 = 0,052.$$

Es sei daran erinnert, daß sich OVTT aus den folgenden Zeitkomponenten zusammensetzt:

- Zugangszeit zur Haltestelle,
- Abgangszeit von der Haltestelle,
- Wartezeit an der Haltestelle (= halbe Zugfolgezeit),
- Umsteigezeit auf ein anderes ÖPNV-Mittel oder auf eine andere Linie desselben ÖPNV-Mittels.

3. Modellanwendung

Aus der Nutzenfunktion der Gleichung (10) bleibt nur

$$\Delta U_{ijm}^z = b_2 \cdot \Delta OVTT_{ijm}^z$$

Für die Quell-Ziel-Beziehung T_{4-1} für WA ergibt sich beispielsweise

$$\begin{aligned} \Delta U_{41\text{ÖPNV}}^{\text{WA}} &= b_2 \cdot \Delta OVTT_{41\text{ÖPNV}}^{\text{WA}} \\ &= 0,052 \cdot 5 = 0,26 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{P}_{41\text{ÖPNV}}^{\text{WA}} &= \frac{P_{41\text{ÖPNV}}^{\text{WA}} \cdot e^{\Delta U_{41\text{ÖPNV}}^{\text{WA}}}}{P_{41\text{ÖPNV}}^{\text{WA}} \cdot e^{\Delta U_{41\text{ÖPNV}}^{\text{WA}}} + P_{41\text{Auto}}^{\text{WA}}} \\ &= \frac{0,089 \cdot e^{0,26}}{0,089 \cdot e^{0,26} + 0,911} = 0,112 \end{aligned}$$

Diese Rechnung muß für jedes von der Maßnahme betroffene Quell-Ziel-Paar durchgeführt werden.

4. Ergebnisse und Interpretation

Als Ergebnis erhält man eine Matrix der veränderten Auswahlwahrscheinlichkeiten P_{ijm}^z für die Wahl des ÖPNV-Mittels

NACH j		
VON i	1	2
4	0,112	0,099
12	0,105	0,096
20	0,098	0,110
21	0,094	0,101

(M5)

Eine Gewichtung der Matrix (M2) mit den Auswahlwahrscheinlichkeiten der Matrix (M5) führt zu den neuen ÖPNV-Benutzerhäufigkeiten

NACH j			Σ
VON i	1	2	
4	690	780	1470
12	530	640	1170
20	470	570	1040
21	440	360	800
Σ	2130	2350	4480

(M6)

Ein Vergleich der Matrizen (M1) und (M6) zeigt, daß eine Verkürzung der Reisezeit um 5 Minuten zu einer Zunahme der ÖPNV-Benutzung um 930 Fahrten pro Tag auf dem untersuchten Streckenabschnitt führen würde. Da davon auszugehen ist, daß diese zusätzlichen ÖPNV-Fahrten auch am Nachmittag gemacht würden (Rückfahrt Arbeitsplatz - Wohnung), kann man schließen, daß die Implementation der Maßnahme zu rund 1900 zusätzlichen Fahrten führen würde. Legt man weiterhin folgende Fahrpreismatrix (in Cents) zugrunde, dann läßt sich leicht das zusätzliche tägliche Einkommen errechnen.

NACH j		
VON i	1	2
4	50	50
12	75	75
20	100	100
21	125	125

(M7)

Dieses würde sich bei 2×930 zugrunde gelegten zusätzlichen Fahrten auf U.S.-\$ 1525 belaufen. Es läge nun in der Hand des ÖPNV-Betreibers zu entscheiden, ob diese zusätzlichen Einnahmen die zusätzlichen Kosten für die gewählte Maßnahme rechtfertigen würden. Um ein vollständiges Bild zu bekommen, sind jedoch auch die Auswirkungen der Reisezeitverkürzung auf die beiden anderen Verkehrszwecke WÜ und NWB zu berücksichtigen.

Allgemein kann festgestellt werden, daß sich die Auswirkungen jeder Maßnahme wie gezeigt bestimmen lassen, solange sie in den Variablen der Nutzenfunktion der Gleichung (10) quantifiziert werden können.

Abschließend sei darauf hingewiesen, daß eine direkte Anwendung des inkrementellen Logit-Modells auf neue ÖPNV-Linien nicht möglich ist, da in einem solchen Fall die Auswahlwahrscheinlichkeiten P_{ijm}^z nicht bekannt sind. Hier wäre zunächst das volle Logit-Modell der Gleichung (8) anzuwenden, um dann auf der Basis der ermittelten P_{ijm}^z die inkrementelle Modellform folgen zu lassen.

5. Zusammenfassung und Anwendungsmöglichkeiten in der Bundesrepublik

Ziel dieses Papers war die Präsentation eines leicht anwendbaren Modellsystems zur Serviceplanung im öffentlichen Personennahverkehr. Dieses Modellsystem besteht aus fünf Modellkomponenten, in denen ausnahmslos Modellparameter Verwendung finden, die entweder direkt der Verkehrsliteratur entnommen oder aus allgemein verfügbaren Flächennutzungs- und sozioökonomischen Daten leicht hergeleitet werden können.

Die hier beschriebene Modellversion wurde im Rahmen einer Master's Thesis im Transportation Program der Cornell University, U.S.A. für U.S.-Städte in der Größenordnung 50.000 bis 500.000 Einwohner entwickelt. Eine Testanwendung erfolgte für das Bus-system der 140.000 Einwohner zählenden Stadt Springfield im U.S.-Bundesstaat Missouri. Die mit dem Modellsystem erlangten Resultate zeigen, daß es als ein anwendbares Modellsystem zur Serviceplanung im ÖPNV betrachtet werden kann.

Die wesentlichen Merkmale der fünf Modellkomponenten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Das Modell zur Verkehrserzeugung ist ein mit Verkehrsraten arbeitendes Modell einfachsten Aufbaus. Die Fahrtenraten lassen sich direkt aus der Verkehrsliteratur herleiten. Der Modellteil zur Verkehrsanziehung besteht aus drei Gleichungen, in denen nur allgemein verfügbare Flächennutzungs- und sozioökonomische Daten Verwendung finden. Das Modell stellt somit einen Kompromiß zwischen dem Wunsch, möglichst genaue Quell- und Zielverkehre zu ermitteln, und dem Anliegen, möglichst wenige Daten- und Parameterinputs zu erfordern, dar.
2. Das Verkehrsverteilungsproblem ließ sich mittels eines einfachen Gravitationsmodells lösen, wobei die Widerstandsfaktoren ebenfalls der Literatur entnommen werden konnten. Damit ist eine schnelle und einfache Anwendung des Modells gewährleistet.
3. Der Modal Split erfolgte mit Hilfe eines Logit-Modells für zwei Verkehrsmittel. Wie im Falle der ersten beiden Modellkomponenten konnten der Literatur die Parameterwerte für die Level-of-Service-Variablen entnommen werden. Ebenfalls wurde eine simple Methode entwickelt, um die Konstanten in den Nutzenfunktionen des Verkehrsmittels Auto zu bestimmen.
4. Der Zweck der Anwendung des LP-Modells als vierte Modellkomponente besteht in dem Versuch, die geschätzten Matrizen zu korrigierten Matrizen zu verbessern. Letztere werden dabei derart hergeleitet, daß, wenn sie auf das ÖPNV-Netz umgelegt werden, sie in ihrer Gesamtheit die gezählten Streckenbelastungen nahezu duplizieren und, unter Einhaltung dieser Bedingung, den geschätzten Matrizen so nahe wie möglich kommen. Es sei darauf verwiesen, daß das LP-Modell als einzige Modellkomponente ohne empirisch ermittelte Parameterwerte arbeitet. Das Modell ist daher universell verwendbar.
5. Das inkrementelle Logit-Modell, als Weiterentwicklung des vollen Logit-Modells zu betrachten, verwendet dieselben Modellparameter wie die dritte Modellkomponente. Damit wird die Konsistenz innerhalb des Modellsystems erhöht und die Anwendung der inkrementellen Modellform ebenso einfach wie die des vollen Logit-Modells.

Summary

A simple transit ridership estimation model system was developed for short-range planning purposes. An important characteristic of the model system is its use of information about transit link volumes obtained from on-off counts. Substantial use is made of available transportation, land-use and socio-economic data as default values. A sequence of simple trip generation, trip distribution and modal split models generate trip-purpose specific transit trip tables. These trip tables and observed transit link volumes are used in a LP model which serves as a correction mechanism. The corrected trip tables may be used in a pivot-point analysis to estimate changes in ridership and revenue.