V.st.b

Aktivitätenbezogene Verkehrserzeugungsmodelle – Ein neues Konzept zur Personenverkehrsprognose –

VON HEINZ HAUTZINGER, HEILBRONN

1. Einleitung

Das Analyse- und Prognoseinstrumentarium der Verkehrsforschung ist gerade in den letzten Jahren ganz wesentlich verfeinert worden. Ermöglicht wurde dies durch eine zunehmende Umsetzung neuer empirischer und theoretischer Forschungsergebnisse zum Verkehrsverhalten von Individuen, Haushalten und sozioökonomischen Gruppen in operationale mathematische Modelle der Personenverkehrsnachfrage. Allerdings sind diese Fortschritte nicht gleichermaßen bezüglich aller Aspekte der Verkehrsnachfrage erzielt worden. Zu den in dieser Hinsicht vernachlässigten Gebieten gehört zweifellos die Modellierung und Prognose der täglichen Wegehäufigkeit von Individuen, d. h. der Bereich der sogenannten Verkehrserzeugungsmodelle.

Die Zuverlässigkeit von Prognosen des gesamten Fahrten- und Fußwegeaufkommens von räumlich und/oder soziodemographisch abgegrenzten Bevölkerungsgruppen ist für die Brauchbarkeit von Verkehrsprognosen von fundamentaler Bedeutung. Fehler bei der Prognose des Verkehrsaufkommens sind häufig wesentlich folgenschwerer als z. B. Fehler bei der Prognose der Verkehrsmittel- oder Routenwahl, da mit Hilfe von Verkehrserzeugungsmodellen das Gesamtniveau des Nachfragevolumens zum Prognosezeitpunkt festgelegt wird. In dieser Situation ist es nur natürlich, weitere methodische Verbesserungen gerade im Verkehrserzeugungsbereich zu fordern.

Im folgenden wird nun ein neuartiger „aktivitätenbezogener" Ansatz zur Prognose des Personenverkehrsaufkommens vorgestellt, der davon ausgeht, daß die individuelle Nachfrage nach Ortsveränderungen sekundären Charakter hat und aus der primären Nachfrage nach Aktivitäten außerhalb der eigenen Wohnung abgeleitet werden kann. Nach einem kurzen Überblick über bisherige Modellansätze und vorliegende empirische Erkenntnisse wird zunächst die allgemeine Struktur von aktivitätenbezogenen Verkehrserzeugungsmodellen dargestellt. Im Anschluß daran wird gezeigt, wie im Rahmen dieser neuen Konzeption operationale Teilmodelle formuliert und zu einem leicht handhabbaren Gesamtmodell zur Prognose des Verkehrsaufkommens zusammengefügt werden können. Der

Anschrift des Verfassers:
Prof. Dr. Heinz Hautzinger
Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung e. V.
an der Fachhochschule Heilbronn
Max-Planck-Straße 39
7100 Heilbronn

vorliegende Beitrag stellt eine Weiterentwicklung von Ansätzen dar, die erstmals im Rahmen eines kürzlich abgeschlossenen Forschungsprojekts erarbeitet worden waren[1)].

2. Bisherige Modellansätze und vorliegende empirische Erkenntnisse

2.1 *Ein Überblick über bisherige Verkehrserzeugungsmodelle*

Betrachtet man eine Gesamtheit von Personen und bezeichnet man die Gesamtzahl der von diesen Personen im Verlauf eines Tages zurückgelegten Fußwege und Fahrten mit T, so ist klar, daß T von einer Vielzahl von Faktoren abhängig ist, wie z. B. der Größe und der soziodemographischen Struktur des betrachteten Personenkreises, der Verfügbarkeit privater und öffentlicher Verkehrsmittel bei den einzelnen Personen sowie den raumstrukturellen Gegebenheiten. Da sich alle diese Faktoren im konkreten Fall weder vollständig erfassen noch präzise quantifizieren lassen, muß das Verkehrsnachfragevolumen T im Rahmen einer modellmäßigen Behandlung als eine Zufallsvariable betrachtet werden, deren Verteilung von den genannten Einflußfaktoren abhängt. Für die praktische Verkehrsplanung ist es in dieser Situation von Bedeutung, zumindest den Erwartungswert E(T) der Verkehrsnachfrage und nach Möglichkeit auch die Varianz var(T) dieser Größe als Funktion der Einflußfaktoren darzustellen. Hat man nämlich einmal einen solchen funktionalen Zusammenhang gefunden, so lassen sich auf der Basis von Prognosen bzw. Szenarios für die Bestimmungsfaktoren bedingte Prognosen für das Verkehrsnachfragevolumen erstellen.

Dieser eben skizzierte Grundansatz ist allen bisherigen Verkehrserzeugungsmodellen, die praktische Bedeutung erlangt haben, gemein. Man kann hierbei jedoch verschiedene Klassen von Modellen unterscheiden. Zu den am weitesten verbreiteten Ansätzen gehören sicherlich die Regressionsmodelle der Verkehrserzeugung, welche als aggregierte Modelle auf zonaler Basis und als disaggregierte Modelle auf der Basis von Individuen oder Haushalten formuliert werden können. Modelle dieser Art sind in der Vergangenheit bereits häufig Gegenstand kritischer Beurteilung gewesen[2)]. Daneben spielen vor allem im angloamerikanischen Raum noch die kategorienanalytischen Verkehrserzeugungsmodelle (category analysis models) eine Rolle, bei welchen die Bestimmungsfaktoren der Verkehrsnachfrage als Gruppierungsvariable zur Bildung von Haushaltskategorien verwendet und kategorienspezifische Mittelwerte der Wegehäufigkeit berechnet werden[3)]. Erwäh-

1) Vgl. *Hautzinger, H.* und *Kessel, P.*, Entwicklung eines Individual-Verhaltensmodells zur Erklärung und Prognose werktäglicher Aktivitätsmuster im städtischen Bereich – Mathematisch-statistischer Ansatz, Untersuchung der Prognos AG (Basel) im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Basel 1980; *Hautzinger, H.*, Combined Modelling of Activity and Trip Patterns. A New Approach to the Trip Generation Problem, Proceedings of the PTRC Summer Annual Meeting, 1981.

2) Vgl. z. B. *McCarthy, G. M.*, Multiple Regression Analysis of Household Trip Generation – A Critique, Highway Research Record No. 297, 1969, S. 31 – 43; *White, M. T.*, An Examination of Residual Distributions in Ordinary Least Squares (OLS) Household-based Trip Generation Models, in: Transportation Research, Vol. 10 (1976), S. 249 – 254; *Hautzinger, H.* und *Kessel, P.*, The State of Mobility Research, in: *Visser, E. J.* (Hrsg.), Transport Decisions in an Age of Uncertainty, The Hague-Boston 1977, S. 551 – 558.

3) Vgl. *Wootton, H. J.* und *Pick, G. W.*, Trips Generated by Households, in: Journal of Transport Economics and Policy, Vol. 1 (1967), S. 137 – 153.

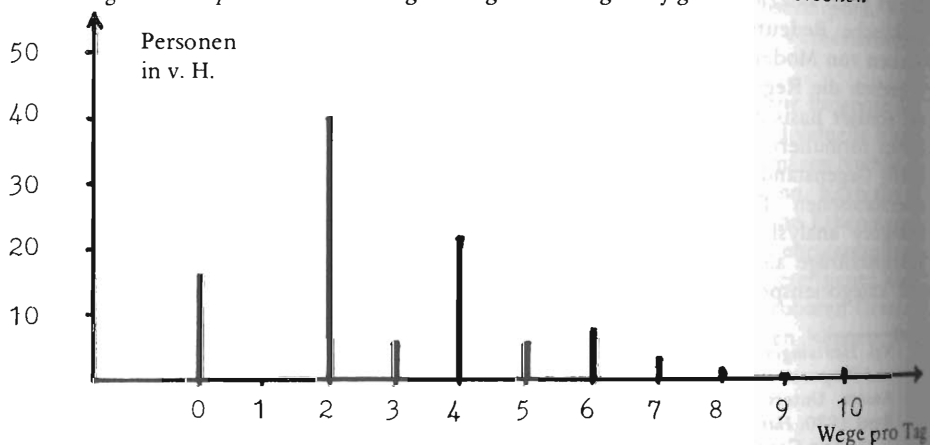
nung verdient schließlich noch ein haushaltsbezogenes Verkehrserzeugungsmodell, welches von *Kanafani*[4] vorgeschlagen wurde. Hierbei wird das Haushaltseinkommen als Bestimmungsfaktor der Wegehäufigkeit betrachtet und das statistische Modell der gemischten *Poisson*-Verteilung verwendet.

Ausnahmslos alle bisherigen Verkehrserzeugungsmodelle sind dadurch gekennzeichnet, daß die tägliche Wegehäufigkeit von Personen, Haushalten oder zonal abgegrenzten Personengruppen in direkter Abhängigkeit von gewissen Personen-, Haushalts- oder Zonenmerkmalen betrachtet wird. Diese Betrachtungsweise berücksichtigt nicht die grundlegende Erkenntnis, daß das individuelle Verkehrsverhalten in befriedigender Weise nur im Kontext des gesamten täglichen Aktivitätenmusters von Personen bzw. Haushalten erklärt werden kann. Der im folgenden dargestellte aktivitätenbezogene Modellansatz versucht, diesen Umstand weitestgehend Rechnung zu tragen. Das vorgeschlagene neue Konzept zur Personenverkehrsprognose genügt insofern der Forderung, wonach die Prognose der individuellen Aktivitätennachfrage als fundamentaler Schritt der eigentlichen Verkehrsnachfrageprognose voranzustellen sei[5].

2.2 *Vorliegende empirische Erkenntnisse zur Wegehäufigkeit von Individuen*

Empirische Häufigkeitsverteilungen der individuellen täglichen Anzahl von Wegen zeigen stets das bekannte Phänomen, wonach gerade Wegezahlen relativ häufig, ungerade Wegezahlen dagegen nur relativ selten auftreten. Abbildung 2.1 stellt ein typisches Beispiel hierfür dar[6]. Wenn empirische Verteilungen solchermaßen irreguläre Formen aufweisen,

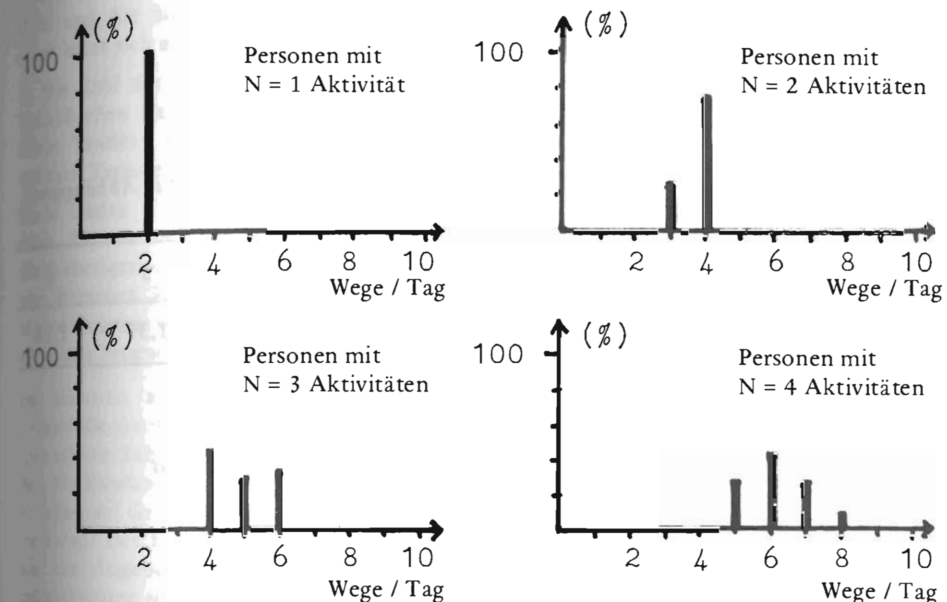
Abbildung 2.1: *Empirische Verteilung der täglichen Wegehäufigkeit von Personen*



4) *Kanafani, A. K.*, An Aggregative Model of Trip Making, in: Transportation Research, Vol. 6 (1972), S. 119 – 124.
5) Vgl. hierzu *Wermuth, M. J.*, Struktur und Effekte von Faktoren der individuellen Aktivitätennachfrage als Determinanten des Personenverkehrs, Bad Honnef, 1978 sowie *Jones, P. M.*, New Approaches to Understanding Travel Behaviour, in: *Hensher, D. A.* und *Stopher, P. R.* (Hrsg.), Behavioural Travel Modelling, London 1979, S. 55 – 80.
6) Quelle der Daten: *Hautzinger, H.* und *Kessel, P.*, Mobilität im Personenverkehr (= Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 231), Bonn-Bad Godesberg 1977.

so liegt dies meist daran, daß das betrachtete Untersuchungsmerkmal in verschiedenen Teilgesamtheiten der Population unterschiedlich verteilt ist (Nichthomomerität der Verteilung). Daß dies auch hier der Fall ist, wird deutlich, wenn man die bedingte Verteilung der täglichen Wegehäufigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl außerhäuslicher Aktivitäten der Person betrachtet. Wie Abbildung 2.2 zeigt[7], stellt die tägliche Aktivitätenhäufigkeit einen zentralen Bestimmungsfaktor der täglichen Wegezahl von Individuen dar. Dies steht völlig im Einklang mit der bereits erwähnten Hypothese von der „abgeleiteten" Natur der individuellen Verkehrsnachfrage.

Abbildung 2.2: *Empirische Verteilung der täglichen Wegehäufigkeit von Personen in Abhängigkeit von der Anzahl der außerhäuslichen Aktivitäten*



Gemäß Abbildung 2.3 wächst die mittlere tägliche Wegehäufigkeit von Personen degressiv mit der Anzahl außerhäuslicher Aktivitäten[8], die Wegehäufigkeit ist also der Aktivitätenhäufigkeit nicht einfach direkt proportional. Diese empirische Beobachtung, die im übrigen nicht neu ist[9], legt die weitere Hypothese nahe, daß es eine Tendenz des Individuums zur „Verkettung" von außerhäuslichen Aktivitäten gibt: Indem die Person sich bei wachsender Aktivitätenzahl verstärkt von einer Aktivität direkt zur nächsten begibt – ohne eine dazwischengeschaltete Rückkehr zur Wohnung – sinkt die Zahl der pro Aktivität durchgeführten Wege kontinuierlich ab (vgl. Tabelle 2.1).

7) Quelle der Daten: *Hautzinger, H.* und *Kessel, P.*, Entwicklung . . . , a.a.O.
8) Quelle der Daten: wie bei Abbildung 2.2.
9) Vgl. *Vidakovic, V. S.*, A Harmonic Series Model of the Trip Chains, in: *Buckley, D. J.* (Hrsg.), Transportation and Traffic Theory, New York 1974, S. 375 – 386.

Abbildung 2.3: *Empirischer Mittelwert der täglichen Wegehäufigkeit von Personen in Abhängigkeit von der Anzahl außerhäuslicher Aktivitäten*

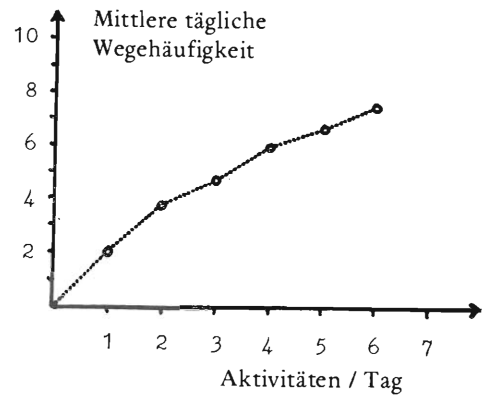
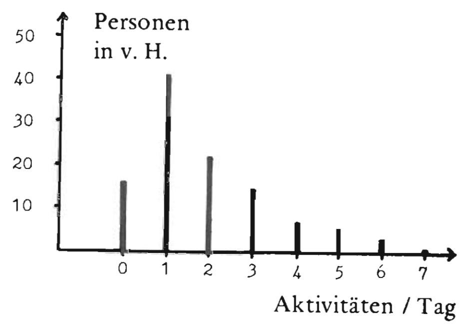


Tabelle 2.1: *Mittlere Anzahl von Wegen pro außerhäuslicher Aktivität in Abhängigkeit von der Aktivitätenhäufigkeit*

Aktivitäten / Tag	1	2	3	4	5	6
Wege / Aktivität	2,00	1,89	1,59	1,54	1,35	1,28

Quelle der Daten: wie bei Abb. 2.2.

Abbildung 2.4: *Empirische Verteilung der täglichen Aktivitätenhäufigkeit*



Eine weitere empirische Erkenntnis muß in diesem Zusammenhang noch erwähnt werden. Es ist dies die Tatsache, daß beobachtete empirische Verteilungen der täglichen Aktivitätenhäufigkeit von Personen jeweils in starkem Maße einer *Poisson*-Verteilung ähneln[10].

10) Vgl. *Wermuth, M. J.*, Struktur . . . , a.a.O., S. 111.

Abbildung 2.4 zeigt eine typische empirische Aktivitätenhäufigkeitsverteilung[11]. Wie später gezeigt wird, kann die *Poisson*-Eigenschaft in vorteilhafter Weise bei der Modellbildung ausgenutzt werden.

3. Allgemeine Struktur aktivitätenbezogener Verkehrserzeugungsmodelle

3.1 Grundprinzipien

Aktivitätenbezogene Verkehrserzeugungsmodelle stellen eine Klasse von Verkehrsprognosemodellen dar, welche auf folgenden Annahmen basieren:

1. Die Zahl der Fahrten und Fußwege einer Person ist in erster Linie abhängig von der Zahl und Art ihrer Aktivitäten außerhalb der Wohnung. Die individuelle Verkehrsnachfrage leitet sich aus der individuellen Aktivitätennachfrage ab.

2. Die Zahl der Fahrten und Fußwege einer Person ist darüber hinaus abhängig von der individuellen Neigung zur Verkettung aufeinanderfolgender außerhäuslicher Aktivitäten. Diese Tendenz zur Verkettung von Aktivitäten ist um so stärker, je mehr Aktivitäten auf dem Tagesprogramm des Individuums stehen.

Diese beiden Grundannahmen haben den Vorzug der Einfachheit und empirischen Validität. Sie erlauben die Entwicklung von Verkehrserzeugungsmodellen, welche anders als die bisherigen – im Grunde rein deskriptiven – Modelle die beobachtbaren Wegemuster von Personen kausal aus den individuellen Aktivitätenmustern erklären. Indem aktivitätenbezogene Verkehrserzeugungsmodelle also kausaler Natur sind, darf man von damit erstellten Prognosen eine höhere Plausibilität und Treffsicherheit erwarten.

Im Rahmen aktivitätenbezogener Verkehrserzeugungsmodelle müssen also zunächst einmal alle die Größen berücksichtigt werden, welche das Aktivitätenmuster einer Person, speziell die Zahl und Art der außerhäuslichen Aktivitäten, wesentlich beeinflussen. Neben den Merkmalen, welche die Lebensphase einer Person und deren „Rolle" in Haushalt, Familie und Gesellschaft kennzeichnen, sind in diesem Zusammenhang noch die Strukturmerkmale des Haushalts, die Verfügbarkeit privater und öffentlicher Verkehrsmittel sowie das Angebot an Aktivitätsgelegenheiten (Arbeitsplätze, Einkaufs- und Erholungsmöglichkeiten usw.) und dessen räumliche Verteilung von Bedeutung[12]. Diese Faktoren beeinflussen auch die individuelle Neigung zur Verkettung von Aktivitäten, doch muß diese auch in unmittelbarer Abhängigkeit von der Struktur des Aktivitätenmusters selbst gesehen werden.

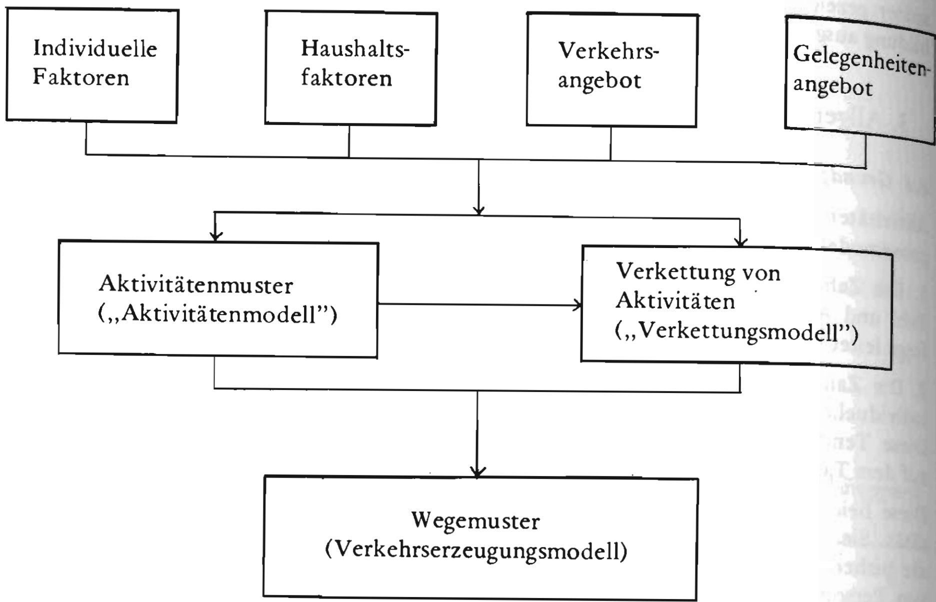
Dieser Erklärungsansatz impliziert, daß ein aktivitätenbezogenes Verkehrserzeugungsmodell stets zwei Submodelle umfassen muß:

1. Ein *Aktivitätenmodell*, welches Zahl und Art der außerhäuslichen Aktivitäten einer Person in einen funktionalen Zusammenhang zu den Bestimmungsgrößen des individuellen Aktivitätenmusters stellt.

11) Quelle der Daten: wie bei Abbildung 2.2.

12) Vgl. hierzu *Hautzinger, H., Kessel. P.* und *Baur, R.*, Mobilitätschancen unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen im Personenverkehr (= Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 310), Bonn-Bad Godesberg 1980.

Abbildung 3.1: *Struktur aktivitätenbezogener Verkehrserzeugungsmodelle*



2. Ein *Verkettungsmodell,* welches den Prozeß der Realisierung des täglichen Aktivitätenprogramms und das daraus resultierende Ortsveränderungsmuster abbildet.

In Abbildung 3.1 ist die Struktur aktivitätenbezogener Verkehrserzeugungsmodelle schematisch dargestellt.

Grundlegend für jedes aktivitätenbezogene Verkehrserzeugungsmodell ist eine formalisierte Beschreibung des Aktivitäten- und Wegemusters von Personen. Eine Darstellung der wichtigsten Zusammenhänge findet sich im nachfolgenden Abschnitt.

3.2 Beschreibung des Zusammenhangs zwischen dem Aktivitäten- und Wegemuster von Personen

Das tägliche *Aktivitätenmuster* einer Person kann als eine endliche Folge $a_1, a_2, \ldots, a_n$ von Aktivitäten betrachtet werden, wobei a_i die i-te außerhäusliche Aktivität der Person bezeichnet. Unterscheidet man m einzelne Aktivitätskategorien $A_1, \ldots, A_m$ (z. B. Arbeiten, Einkaufen, Sich-Erholen usw.), so gilt

$$a_i \in \{A_1, \ldots, A_m\} \qquad \text{für alle } i=1, \ldots, n\,.$$

Bei m Aktivitätskategorien gibt es für eine Person mit n Aktivitäten insgesamt m^n mögliche Aktivitätenmuster. Für $m = 5$ und $n = 3$ wären dies also bereits $5^3 = 125$ mögliche Aktivitätenmuster. Wie man weiß, ist aber nur eine relativ kleine Zahl von Aktivitätenmustern empirisch relevant[13].

13) Vgl. *Hautzinger, H.* und *Kessel, P.,* Mobilität . . . , a.a.O.

Um ein bestimmtes Aktivitätenmuster $a_1, \ldots, a_n$ zu realisieren, muß das Individuum eine gewisse Anzahl von Wegen durchführen. Bei gegebener Aktivitätenhäufigkeit n hängt die Zahl y der Wege davon ab, wie häufig die Person von einer außerhäuslichen Aktivität a_i zur Wohnung zurückkehrt, bevor die nachfolgende Aktivität a_{i+1} ausgeübt wird. Es wird angenommen, daß die Person von der n-ten Aktivität stets nach Hause zurückkehrt. Um den Zusammenhang zwischen dem Aktivitäten- und dem Wegemuster einer Person zu beschreiben, kann man den Begriff *Wegekette* einführen. Hierunter wird eine Folge von Wegen verstanden mit folgenden Eigenschaften: der erste Weg dieser Folge beginnt in der Wohnung und die Folge wird als abgeschlossen betrachtet, wenn die Wohnung erstmals wieder erreicht wird. Wir führen nun folgende Symbolik ein:

n_j Anzahl Aktivitäten, welche im Rahmen der j-ten Wegekette ausgeübt werden ($j = 1, \ldots, k$)

y_j Anzahl Wege, aus welchen sich die j-te Wegekette zusammensetzt

k Anzahl der Wegeketten (= Anzahl der Rückwege zur Wohnung)

Die *Aktivitätenhäufigkeit* n und *Wegehäufigkeit* y ist somit durch

$$(3.1) \qquad n = \sum_{j=1}^{k} n_j \quad \text{bzw.} \quad y = \sum_{j=1}^{k} y_j$$

gegeben. Da offenkundig gilt

$$(3.2) \qquad y_j = n_j + 1 \qquad \text{für alle } j=1, \ldots, k$$

erhält man nach Summation über j die folgende Darstellung, welche von grundsätzlicher Bedeutung für die Modellbildung ist:

$$(3.3) \qquad y = n + k\,.$$

Die Wegehäufigkeit ist also stets gleich der Summe aus Aktivitätenhäufigkeit und Zahl der Wegeketten. Wegen

$$(3.4) \qquad 1 \leqslant k \leqslant n$$

erfüllt die Wegehäufigkeit stets die Ungleichung

$$(3.5) \qquad n+1 \leqslant y \leqslant 2n\,.$$

Wege, welche in der Wohnung beginnen oder enden, werden üblicherweise *wohnungsbezogen* genannt. *Nicht wohnungsbezogen* sind demgegenüber solche Wege, welche direkt von einer Aktivität a_i zur nachfolgenden Aktivität a_{i+1} gerichtet sind. Da jede Wegekette genau 2 wohnungsbezogene Wege enthält, gilt für die Zahl y^* der wohnungsbezogenen Wege einer Person

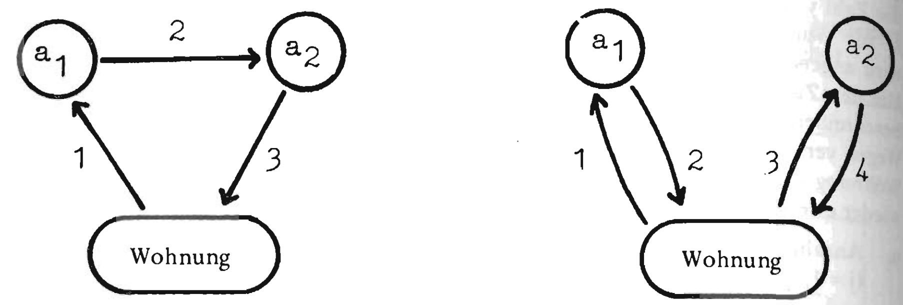
$$(3.6) \qquad y^* = 2k\,.$$

Die Zahl y^{**} der nicht wohnungsbezogenen Wege ist somit gemäß (3.3) und (3.6) gleich

$$(3.7) \qquad y^{**} = y - y^* = n - k\,.$$

Das *Wegemuster* einer Person wird eindeutig beschrieben durch Angabe der Zahl der Wegeketten und Benennung der Aktivitäten, welche im Rahmen jeder einzelnen Wegekette ausgeübt werden. Da bei den ersten n-1 Aktivitäten jeweils eine binäre Entscheidung

Abbildung 3.2: *Schematische Darstellung der möglichen Wegemuster einer Person mit zwei außerhäuslichen Aktivitäten a_1, a_2*



Wegemuster Nr. 1
1 Wegekette
3 Wege

Wegemuster Nr. 2
2 Wegeketten
4 Wege

zwischen direktem Weitergehen zur nächsten Aktivität und Rückkehr zur Wohnung getroffen wird, gibt es bei n Aktivitäten 2^{n-1} mögliche Wegemuster. Diese Zusammenhänge zwischen Aktivitätenmuster und Wegemuster sind in Abbildung 3.2 schematisch dargestellt.

Ausgehend von den eben beschriebenen Grundzusammenhängen wird im nachfolgenden Abschnitt eine allgemeine Darstellung der Struktur von Modellen gegeben, welche zur Klasse der aktivitätenbezogenen Verkehrserzeugungsmodelle gehören.

3.3 Allgemeine Charakterisierung von aktivitätenbezogenen Verkehrserzeugungsmodellen

Für eine aus einer bestimmten Bevölkerungsgruppe zufällig ausgewählte Person kann man die Aktivitätenhäufigkeit und die Zahl der Wegeketten als diskrete Zufallsvariable betrachten und mit N bzw. K bezeichnen. An die Verteilung von N bzw. die bedingte Verteilung von K müssen folgende Anforderungen gestellt werden:

$$P\{N=n\} \begin{cases} \geq 0 & \text{für } n=0, 1, 2, \ldots \\ = 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{3.8a}$$

$$P\{K=k \mid N=0\} = \begin{cases} 1 & \text{für } k=0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{3.8b}$$

$$P\{1 \leq K \leq N \mid N \geq 1\} = 1\,. \tag{3.8c}$$

Die Wegehäufigkeit der zufällig ausgewählten Person ist ebenfalls eine Zufallsvariable Y, welche als Funktion von N und K darstellbar ist:

$$Y = N + K\,. \tag{3.9}$$

Da wir die Verkehrsnachfrage als abgeleitete Nachfrage betrachten, interessieren wir uns zunächst für die bedingte Verteilung von Y bei gegebener Aktivitätenhäufigkeit N = n. Falls n = 0, so gilt

$$P\{Y=y \mid N=0\} = \begin{cases} 1 & \text{falls } y=0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{3.10}$$

da Personen ohne außerhäusliche Aktivitäten auch keine Wege durchführen. Falls $n \geq 1$, so ist wegen (3.9)

$$P\{Y=y \mid N=n\} = \begin{cases} P\{K=y-n \mid N=n\} & \text{für } y=n+1, \ldots, 2n \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{3.11}$$

Die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Wegehäufigkeit Y ist also durch die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zahl K der Wegeketten darstellbar. Insbesondere gilt:

$$E(Y \mid N=n) = n + E(K \mid N=n) \tag{3.12a}$$

für den bedingten Erwartungswert und

$$\mathrm{var}(Y \mid N=n) = \mathrm{var}(K \mid N=n) \tag{3.12b}$$

für die bedingte Varianz der Wegehäufigkeit.

Im Rahmen von Verkehrsprognosen interessiert man sich naturgemäß weniger für die bedingte als vielmehr für die unbedingte Verteilung der Wegehäufigkeit. Insbesondere möchte man den Erwartungswert der Wegehäufigkeit als solchen bestimmen. Hier gilt ganz allgemein für die Verteilung der Wegehäufigkeit

$$P\{Y=y\} = \sum_{n=0}^{\infty} P\{K=y-n \mid N=n\} \; P\{N=n\} \tag{3.13}$$

für y = 0, 1, 2, ... Für die erwartete Wegehäufigkeit erhält man die allgemeine Darstellung

$$\begin{aligned} E(Y) &= \sum_{n=0}^{\infty} E(Y \mid N=n) \; P\{N=n\} \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} (n + E(K \mid N=n)) \; P\{N=n\} \\ &= E(N) + E(K) \end{aligned} \tag{3.14a}$$

Die Varianz der Wegehäufigkeit ist in allgemeiner Form durch

$$\begin{aligned} \mathrm{var}(Y) = {} & E(\mathrm{var}(K \mid N)) + \mathrm{var}(N) + \mathrm{var}(E(K \mid N)) \\ & + 2\,\mathrm{cov}(N, E(K \mid N)) \end{aligned} \tag{3.14b}$$

gegeben. Im folgenden wird unter einem *aktivitätenbezogenen Verkehrserzeugungsmodell* stets ein Modell verstanden, bei welchem die Verteilung der Wegehäufigkeit in der durch (3.13) bis (3.14b) beschriebenen Form dargestellt wird.

Bei Prognosen des Verkehrsaufkommens spielt häufig die Zahl nicht wohnungsbezogener Wege eine bedeutende Rolle. Analog zu (3.7) kann man diese Größe duch die Zufallsvariable

$$Y^{**} = N - K \tag{3.15}$$

repräsentieren, für deren bedingten bzw. unbedingten Erwartungswert gilt

$$E(Y^{**} \mid N=n) = n - E(K \mid N=n) \qquad (n=0, 1, 2, \ldots) \tag{3.16}$$

$$E(Y^{**}) = E(N) - E(K)\,. \tag{3.17}$$

Wie die Gleichungen (3.13) bis (3.14b) zeigen, sind (a) die Wahrscheinlichkeitsverteilung $P\{N = n\}$ der täglichen Aktivitätenhäufigkeit und (b) die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung $P\{K = k \mid N = n\}$ der Zahl der Wegeketten die beiden wesentlichen Elemente eines jeden aktivitätenbezogenen Verkehrserzeugungsmodells, da hierdurch die Wahrscheinlichkeitsverteilung $P\{Y = y\}$ der Wegehäufigkeit eindeutig bestimmt wird. Um zu einem operationalen aktivitätenbezogenen Verkehrserzeugungsmodell zu kommen, müssen also die Verteilungen $P\{N = n\}$ und $P\{K = k \mid N = n\}$ dem Typ nach festgelegt und die Art ihrer Abhängigkeit von gewissen verhaltensbeeinflussenden Bestimmungsfaktoren genau spezifiziert werden.

3.4 Submodelle eines aktivitätenbezogenen Verkehrserzeugungsmodells

Ein aktivitätenbezogenes Verkehrserzeugungsmodell besteht immer aus zwei Submodellen, die zu einem Gesamtmodell zusammengefaßt werden.

Submodell 1: Aktivitätenmodell

In diesem Submodell wird die Wahrscheinlichkeit $P\{N = n\}$, daß eine Person $n = 0, 1, 2, \ldots$ Aktivitäten pro Tag ausübt, als Funktion gewisser, in einem Vektor $\underline{x}$ zusammengefaßter, Bestimmungsfaktoren des Aktivitätenmusters dargestellt:

$$P\{N=n\} = f(n;\underline{x},\underline{\lambda}) \qquad (n=0, 1, 2, \ldots)\,. \tag{3.18}$$

Hierbei ist $\underline{\lambda}$ ein Parametervektor, dessen Komponenten die relativen Gewichte der Bestimmungsfaktoren sind. Hat man die funktionale Form von f spezifiziert, so kann man auch E(N) und var(N) als Funktion der in $\underline{x}$ zusammengefaßten Bestimmungsfaktoren angeben:

$$E(N) = f_1(\underline{x},\underline{\lambda}) \qquad var(N) = f_2(\underline{x},\underline{\lambda})\,. \tag{3.19}$$

Submodell 2: Verkettungsmodell

In diesem Submodell wird die bedingte Verteilung $P\{K = k \mid N = n\}$ der Zahl der Wegeketten als Funktion der Aktivitätenhäufigkeit n und gewisser weiterer Bestimmungsfaktoren, welche als Komponenten eines Vektors $\underline{z}$ betrachtet werden, dargestellt:

$$P\{K=k \mid N=n\} = g(k,n;\underline{z},\underline{\theta}) \tag{3.20}$$

für $k = 1, \ldots, n$ und $n = 0, 1, 2, \ldots$ In (3.20) ist $\underline{\theta}$ ein Vektor von Variablengewichten. Hat man die Form der Funktion g geeignet festgelegt, so läßt sich der bedingte Erwartungswert und die bedingte Varianz der Zahl K der Wegeketten als Funktion von n, $\underline{z}$ und $\underline{\theta}$ schreiben:

$$E(K \mid N=n) = g_1(n;\underline{z},\underline{\theta}) \tag{3.21a}$$

$$var(K \mid N=n) = g_2(n;\underline{z},\underline{\theta})\,. \tag{3.21b}$$

Gesamtmodell: Aktivitätenbezogenes Verkehrserzeugungsmodell

Setzt man (3.18) und (3.20) in Gleichung (3.13) ein, so resultiert hieraus das angestrebte aktivitätenbezogene Verkehrserzeugungsmodell, welches symbolisch wie folgt dargestellt werden kann:

$$P\{Y=y\} = h(y;\underline{x},\underline{z},\underline{\lambda},\underline{\theta}) \tag{3.22}$$

für $y = 0, 1, 2, \ldots$ Die Wahrscheinlichkeit, mit welcher ein Individuum eine gewisse Anzahl von Wegen (y) durchführt, hängt gemäß (3.22) also von den Bestimmungsfaktoren des Aktivitätenmusters ($\underline{x}$) und den Bestimmungsfaktoren des Verkettungsverhaltens ($\underline{z}$) sowie von den relativen Gewichten dieser Faktoren ($\underline{\lambda}$ bzw. $\underline{\theta}$) ab. Ganz analog sind damit auch der Erwartungswert und die Varianz der Wegehäufigkeit letztlich Funktion der verschiedenen Bestimmungsfaktoren und ihrer Gewichte:

$$E(Y) = h_1(\underline{x},\underline{z},\underline{\lambda},\underline{\theta}) \tag{3.23}$$

$$var(Y) = h_2(\underline{x},\underline{z},\underline{\lambda},\underline{\theta})\,. \tag{3.24}$$

Die Gleichungen (3.18) bis (3.24) beschreiben ein stochastisches aktivitätenbezogenes Verkehrserzeugungsmodell in allgemeiner Form. Diese formelmäßige Darstellung entspricht dem Strukturschema in Abbildung 3.1.

3.5 Operationalisierung des Modells

Damit ein aktivitätenbezogenes Verkehrserzeugungsmodell praktisch angewandt werden kann, müssen über die Funktionen f und g gewisse Annahmen getroffen werden. Anders ausgedrückt, es müssen *Hypothesen* formuliert werden über

- die Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Aktivitätenhäufigkeit von ihren Bestimmungsfaktoren, und über
- die Abhängigkeit der bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zahl der Wegeketten von ihren Bestimmungsfaktoren.

Diese Hypothesen sind dann in geeigneter Weise zu formalisieren.

Man muß an diese Hypothesen und ihre Formalisierung naturgemäß einige Anforderungen theoretischer, empirischer und praktischer Art stellen. Zum einen müssen die Funktionen f und g aus theoretischen Gründen so gewählt werden, daß die Grundeigenschaften (3.8a) bis (3.8c) erfüllt sind. Aus empirischen Gründen muß verlangt werden, daß die durch die Funktionen f und g spezifizierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen die realen Gegebenheiten möglichst gut approximieren. Aus Gründen der Praktikabilität ist schließlich zu fordern, daß die Funktionen f und g so gestaltet sind, daß die Wegehäufigkeitsverteilung (3.22), sowie insbesondere der Erwartungswert und die Varianz der Wegehäufigkeit eine möglichst einfache analytische Form annimmt. Speziell die empirischen und die praktischen Anforderungen stehen vielfach in gewissem Widerspruch zueinander.

Zu einer unter Umständen beträchtlichen Vereinfachung kommt man, wenn man nicht über die bedingte Verteilung, sondern vielmehr über den bedingten Erwartungswert und die bedingte Varianz der Zahl der Wegeketten eine Annahme macht. Die Hypothese über die Funktion g wird dann ersetzt durch Hypothesen über die Funktionen g_1 und g_2. Bei einem solchen Ansatz kann natürlich nur noch der Erwartungswert E(Y) und die Varianz var(Y) der Wegehäufigkeit, nicht aber die Wahrscheinlichkeitsverteilung $P\{Y = y\}$ der Wegehäufigkeit selbst als Funktionen der verschiedenen Bestimmungsgrößen dargestellt werden. Für praktische Zwecke wird dies im allgemeinen aber vollkommen ausreichend sein.

3.6 Aggregierte Prognosen mit Hilfe aktivitätenbezogener Verkehrserzeugungsmodelle

In der eben beschriebenen Form stellt das Modell ein „Individualverhaltensmodell" dar. Im Rahmen von Verkehrsprognosen interessiert man sich jedoch für das tägliche Fahrten- und Fußwegevolumen T von gewissen räumlich und soziodemographisch abgegrenzten Bevölkerungsgruppen, speziell für den Erwartungswert und die Varianz von T. Handelt es sich um M Personen und schreibt man Y_k für die tägliche Wegehäufigkeit der k-ten Person, so ist

$$T = \sum_{k=1}^{M} Y_k \tag{3.25}$$

und somit

$$E(T) = \sum_{k=1}^{M} E(Y_k)\,. \tag{3.26}$$

Nimmt man, was nicht besonders restriktiv erscheint, Unabhängigkeit der Zufallsvariablen Y_k an, so gilt ferner

$$\mathrm{var}(T) = \sum_{k=1}^{M} \mathrm{var}(Y_k)\,. \tag{3.27}$$

Die Erwartungswerte $E(Y_k)$ und Varianzen $\mathrm{var}(Y_k)$ sind nicht identisch, sondern vielmehr von den Werten der verschiedenen Bestimmungsfaktoren für die Personen $k = 1, \ldots, M$ abhängig. Es gilt also wegen (3.23)

$$E(T) = \sum_{k=1}^{M} h_1(\underline{x}_k, \underline{z}_k, \underline{\lambda}, \underline{\theta}) \tag{3.28}$$

wobei $\underline{x}_k$ und $\underline{z}_k$ die Werte von $\underline{x}$ bzw. $\underline{z}$ für die k-te Person bezeichnen. Eine analoge Formel erhält man für die Varianz von T. Gleichung (3.28) bildet die Basis für eine aggregierte Prognose des Fahrten- und Fußwegaufkommens von Personengesamtheiten.

Es wäre unrealistisch anzunehmen, daß für den Prognosezeitpunkt die Vektoren $\underline{x}_k, \underline{z}_k$ für alle Personen $k = 1, \ldots, M$ bekannt sind. Man kann allenfalls erwarten, daß es eine Segmentierung der M Personen in R (R<M) Teilgruppen gibt, welche bezüglich der x- und z-Variablen homogen sind. Schreibt man $\underline{x}_{(r)}$ und $\underline{z}_{(r)}$ für die Vektoren der Mittelwerte der verschiedenen Bestimmungsfaktoren in der r-ten Teilgruppe ($r = 1, \ldots, R$) von Personen, so gilt die folgende näherungsweise Darstellung des erwarteten Fahrten- und Fußwegaufkommens:

$$E(T) \cong M \sum_{r=1}^{R} p_{(r)}\, h_1(\underline{x}_{(r)}, \underline{z}_{(r)}, \underline{\lambda}, \underline{\theta})\,. \tag{3.29}$$

Hierbei bezeichnet $p_{(r)}$ den Anteil der Personen in der r-ten Teilgruppe an der Gesamtzahl M aller Personen. In dem wichtigen Spezialfall, wo alle x- und z-Variablen qualitativer (kategorieller) Natur sind, ist mit (3.29) sogar eine exakte Darstellung von E(T) möglich.

Zur Erstellung einer aggregierten Verkehrsaufkommensprognose benötigt man also

- ein vollständig spezifiziertes Individualverhaltensmodell der täglichen Wegehäufigkeit gemäß (3.23), dessen Parametervektoren $\underline{\lambda}$ und $\underline{\theta}$ mit Hilfe geeigneter Kalibrierungsverfahren numerisch bestimmt wurden,
- eine Segmentierung der Bevölkerung in Teilgruppen, welche bezüglich der betrachteten Einflußfaktoren homogen sind, und
- eine Prognose der gruppenspezifischen Bevölkerungsanteile und Variablenmittelwerte.

Wie man sieht, geht dieser Informationsbedarf für den Prognosezeitpunkt nicht über den Informationsbedarf herkömmlicher Verkehrserzeugungsmodelle hinaus.

4. Anwendungsbeispiel: Ein doppelt exponentielles aktivitätenbezogenes Verkehrserzeugungsmodell

4.1 Vorbemerkungen

Während im vorausgegangenen Kapitel 3 aktivitätenbezogene Verkehrserzeugungsmodelle in ganz allgemeiner Form unter vorwiegend strukturellen Gesichtspunkten betrachtet wurden, soll nunmehr ein operationales Verkehrsprognosemodell dieses Typs vorgestellt werden. Das Gesamtmodell setzt sich hierbei aus einem *Poisson*-Modell der Aktivitätenhäufigkeit und einem negativ exponentiellen Verkettungsmodell zusammen[14]. Soweit empirische Ergebnisse der Modellanwendung wiedergegeben werden, basieren diese auf Daten der KONTIV-Stichprobe der Monate September und Oktober 1976.

4.2 Ein Poisson-Modell der Aktivitätenhäufigkeit

Die Analyse empirischer Verteilungen der Aktivitätenhäufigkeit (vgl. Abbildung 2.4) legt die Annahme nahe, N als eine *Poisson*-verteilte Zufallsvariable zu betrachten. Unsere Hypothese über $P\{N = n\}$ lautet somit:

$$P\{N = n\} = \frac{\mu^n \exp^{-\mu}}{n!} \qquad (\mu > 0) \tag{4.1}$$

für $n = 0, 1, 2, \ldots$ Der Parameter μ, der ja bekanntermaßen gleich dem Erwartungswert von N ist, kann als ein Maß für die „Aktivitätsneigung" einer Person aufgefaßt werden: Je größer μ, desto größer ist wegen $E(N) = \mu$ die im Mittel zu erwartende tägliche Aktivitätenzahl der Person. Da die individuelle Neigung zur Ausübung außerhäuslicher Aktivitäten von einer ganzen Reihe von Einflußfaktoren $x_1, \ldots, x_s$ abhängt, wird die weitere Hypothese

[14] Die Ausführungen hierzu sind bewußt knapp gehalten. Eine detaillierte Darstellung findet sich in: *Hautzinger, H.* und *Kessel, P.*, Entwicklung . . . , a.a.O.

(4.2) $\mu = \phi(x_1, \ldots, x_s)$

formuliert, wobei ϕ eine nichtnegative Funktion ist. Es bietet sich hier an, einen exponentiellen Zusammenhang zu unterstellen:

(4.2a) $\mu = \exp(\lambda_0 + \lambda_1 x_1 + \ldots + \lambda_s x_s)$.

Durch (4.1) in Verbindung mit (4.2a) ist ein operationales Aktivitätenhäufigkeitsmodell auf Individualbasis gegeben. Damit dieses Modell zu Prognosezwecken verwendet werden kann, müssen in einer Kalibrierungsphase zunächst die wesentlichen Einflußfaktoren ermittelt und die Modellparameter statistisch geschätzt, d. h. numerisch bestimmt werden. Eine Parameterschätzung ist mit Hilfe eines Maximum-Likelihood-Verfahrens auf einfache Weise möglich. Hierfür erforderliche Computer-Software läßt sich problemlos vom Anwender selbst erstellen. Es stehen aber auch bereits komplette Statistik-Programmpakete zur Verfügung – z. B. das Programmsystem GLIM (Generalized Linear Interactive Modelling) –, welche entsprechende Unterprogramme enthalten.

Bei einer Anwendung des Modells wird man den Einfluß einiger besonders wichtiger Faktoren dadurch berücksichtigen, daß die Gesamtbevölkerung in geeigneter Weise segmentiert wird. Innerhalb jedes Segments lassen sich dann die Effekte weiterer Faktoren differenziert untersuchen. Eine Anwendung des Modells auf die genannten KONTIV-Daten ging von einer Segmentierung nach den Merkmalen Berufstätigkeit (Hausfrau, Rentner, Voll- und Teilzeitbeschäftigte) und Geschlecht, als wesentlichen Bestimmungsfaktoren des täglichen Aktivitätenmusters aus. Insgesamt wurden sieben Segmente gebildet. Die Stichprobe umfaßte insgesamt 3.450 Personen, die Besetzungshäufigkeit der einzelnen Segmente lag zwischen 218 und 1.369 Personen. Innerhalb jedes Segments wurden drei binäre Erklärungsvariablen x_1, x_2 und x_3 verwendet, und zwar je eine Indikatorvariable für den Sozialstatus (Schulabschluß hoch/niedrig), die Lebensphase (Altersgruppe alt/jung) und die Mobilitätschancen (PKW-Verfügbarkeit ja/nein).

Die in Tabelle 4.1 wiedergegebenen Kalibrierungsergebnisse erlauben zum einen die Berechnung von Schätzwerten für die erwartete Aktivitätenhäufigkeit einer Person in Abhängigkeit von den verschiedenen Bestimmungsfaktoren der Aktivitätsneigung. Für voll erwerbstätige männliche Personen (Segment 5) mit hohem Sozialstatus ($x_1 = 1$), die relativ jung sind ($x_2 = 0$) und über einen PKW verfügen ($x_3 = 1$) erhält man beispielsweise den Schätzwert

$$\begin{aligned}\hat{\mu} &= \exp(0{,}763 + 0{,}135 \cdot 1) - 0{,}092 \cdot 0 + 0{,}039 \cdot 1) \\ &= 2{,}55 \text{ (Aktivitäten/Tag)} .\end{aligned}$$

Für eine ältere Person aus Segment 5 mit niedrigem Sozialstatus und ohne PKW-Verfügbarkeit ergibt sich entsprechend der Schätzwert $\hat{\mu} = 1{,}96$ (Aktivitäten/Tag). Analog können solche Schätzwerte für alle (5 x 8) + (2 x 4) = 48 Untergruppen berechnet werden.

Darüber hinaus liefern die Kalibrierungsergebnisse wichtige Einsichten in strukturelle Zusammenhänge, da die Beträge der Parameterschätzwerte direkt als Maßzahlen für die relative Wichtigkeit der einzelnen Bestimmungsfaktoren interpretiert werden können. Ein Vergleich der stark unterschiedlichen Absolutglieder λ_0 zeigt, wie überaus groß der Einfluß der Segmentierungsvariablen Berufstätigkeit und Geschlecht auf das Aktivitäten-

Tabelle 4.1: *Kalibrierungsergebnisse für das Poisson-Modell der Aktivitätenhäufigkeit: Schätzwerte für die Modellparameter*

Lfd. Nr.	Bevölkerungssegment	Absolutglied λ0	Status λ1	Alter[1] λ2	PKW-Verf. λ3
1	Hausfrau mit Kleinkind	0,405	0,302	– 0,127	0,084
2	Übrige Hausfrauen	0,072	0,788	– 0,606	0,041
3	Rentner männlich	0,135	0,366	– 0,197	2)
4	Rentner weiblich	0,068	0,682	– 0,612	2)
5	Erwerbstätige männlich	0,763	0,135	– 0,092	0,039
6	Erwerbstätige weiblich	0,654	0,178	– 0,109	0,089
7	Teilzeitbesch. weiblich	0,579	0,167	– 0,165	0,097

1) Die Abgrenzung „alt/jung" ist segmentspezifisch.
Segment 1: 30 Jahre; Segmente 3 und 4: 70 Jahre;
übrige Segmente: 45 Jahre.
2) Nicht signifikant auf dem 1-Prozent-Niveau.

muster von Personen ist. Ein Vergleich innerhalb und zwischen den Segmenten macht deutlich, daß die drei Bestimmungsfaktoren „Status", „Lebensphase" und „Mobilitätschancen" je nach Bevölkerungsgruppe von ganz unterschiedlicher Bedeutung für die Zahl der ausgeübten außerhäuslichen Aktivitäten sind. So spielt bei Betrachtung der Gesamtaktivitätenhäufigkeit beispielsweise der Faktor „Status" bei erwerbstätigen Personen eine wesentlich geringere Rolle als bei Nichterwerbstätigen, was auf die „erzwungene" Aktivität „Arbeiten" zurückgeht. Betrachtet man nur Gelegenheitsaktivitäten, so ist auch bei Erwerbstätigen der Einfluß des Sozialstatus stärker ausgeprägt.

Die Kalibrierungsergebnisse offenbaren auch das Vorhandensein beträchtlicher Interaktionseffekte zwischen den verschiedenen Erklärungsvariablen. So erkennt man beispielsweise, daß bei weiblichen Personen der Einfluß des Alters und der PKW-Verfügbarkeit auf die Aktivitätennachfrage deutlich stärker als bei Männern ist.

Das *Poisson*-Modell der Aktivitätenhäufigkeit läßt sich dahingehend erweitern, daß unterschiedliche Aktivitätskategorien betrachtet und die Gesamtaktivitätenhäufigkeit in „partielle" Aktivitätenhäufigkeiten zerlegt wird. Näheres zu einem solchen „zusammengesetzten Multinomialmodell" der Aktivitätenhäufigkeit findet man in den in Fußnote 1 angegebenen Arbeiten.

4.3 Ein negativ-exponentielles Verkettungsmodell

Im Rahmen eines Verkettungsmodells ist eine Hypothese über die bedingte Verteilung (bzw. den bedingten Erwartungswert und die bedingte Varianz) der Zahl der Wegeketten einer Person zu formulieren. Hierfür ist es zweckmäßig, zunächst die Zahl K der Wegeketten als Summe von binären Zufallsvariablen darzustellen. Bei gegebener Aktivitätenhäufigkeit N = n gilt offenkundig

$$K = \sum_{j=1}^{n-1} R_j + 1 \tag{4.3}$$

wobei

$$R_j = \begin{cases} 1 & \text{falls Rückkehr zur Wohnung nach der j-ten Aktivität} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{4.4}$$

Würde man den allgemeinen Fall annehmen, daß bei gegebenem N = n die Zufallsvariablen $R_1, \ldots, R_{n-1}$ voneinander abhängig sind, so bestünde das große Problem, die gemeinsame Verteilung dieser n-1 Zufallsvariablen zu spezifizieren. Falls dies in befriedigender Form gelänge, ließe sich die bedingte Verteilung von K in expliziter Form – wenn auch durch relativ komplizierte Formeln – angeben[15]. Das Problem vereinfacht sich wesentlich, wenn man unterstellt, daß die Zufallsvariablen $R_1, \ldots, R_{n-1}$ unabhängig voneinander sind. Dies ist gleichbedeutend mit der Annahme, daß die Wahrscheinlichkeit für eine Rückkehr zur Wohnung nach Ausübung der Aktivität a_j nicht davon abhängt, ob die Person von den Aktivitäten $a_1, \ldots, a_{j-1}$ direkt zur Wohnung zurückkehrte und auch nicht davon, ob sie von den Aktivitäten $a_{j+1}, \ldots, a_{n-1}$ direkt den Rückweg zur Wohnung antreten wird. Als näherungsweise Beschreibung der Realität erscheint die Unabhängigkeitshypothese ohne weiteres vertretbar.

Geht man also von der Unabhängigkeit der Variablen $R_1, \ldots, R_{n-1}$ aus, so kann die Wahrscheinlichkeit

$$p(j \mid n) = P\{R_j = 1 \mid N = n\} \tag{4.5}$$

wobei $j = 1, \ldots, n-1$ und $n = 1, 2, \ldots$, *bedingte Rückkehrwahrscheinlichkeit j-ter Ordnung* genannt werden. Nach Voraussetzung ist $0 \leq p(j \mid n) \leq 1$ für $j=1, \ldots, n-1$. Wir setzen $p(j \mid n) = 1$ für $j = n$, d. h. nach der n-ten Aktivität kehrt die Person nach Hause zurück. Da allgemein gilt

$$E(R_j \mid N=n) = p(j \mid n) \qquad (j=1, \ldots, n)$$

erhält man für $E(K \mid N=n)$ die Darstellung

$$E(K \mid N=n) = \sum_{j=1}^{n} p(j \mid n) \tag{4.6}$$

d. h. bei gegebener Aktivitätenhäufigkeit ist die erwartete Zahl der Wegeketten einer Person gleich der Summe der bedingten Rückkehrwahrscheinlichkeiten. Wegen

$$\operatorname{var}(R_j \mid N=n) = p(j \mid n)\,(1 - p(j \mid n)) \qquad (j=1, \ldots, n)$$

ergibt sich ferner

15) Vgl. *Parzen, E.*, Modern Probability Theory and Its Applications, New York 1960, S. 76 ff.

$$\operatorname{var}(K \mid N=n) = \sum_{j=1}^{n} p(j \mid n)\,(1 - p(j \mid n))\,. \tag{4.7}$$

Bei gegebener Aktivitätenhäufigkeit N = n folgt die Zahl K der Wegeketten einer verallgemeinerten Binomialverteilung (*Bernoulli*-Versuche mit variablen Erfolgswahrscheinlichkeiten), wobei bedingter Erwartungswert und bedingte Varianz von K gemäß (4.6) bzw. (4.7) als Funktionen der bedingten Rückkehrwahrscheinlichkeiten $(p(j \mid n)$ dargestellt werden können[16].

Zu einem Verkettungsmodell kommt man unter der hier getroffenen Unabhängigkeitsannahme also durch eine Hypothese über die bedingte Rückkehrwahrscheinlichkeit $p(j \mid n)$. Hat man $p(j \mid n)$ als Funktion gewisser Einflußgrößen formelmäßig dargestellt, so hat man gemäß (4.6) und (4.7) auch die gewünschten Darstellungen von $E(K \mid N = n)$ und $\operatorname{var}(K \mid N = n)$ als Funktionen der Bestimmungsgrößen des „Verkettungsverhaltens".

Empirisch läßt sich zeigen, daß $p(j \mid n)$ um so kleiner ist, je kleiner j im Verhältnis zu n ist. Anders ausgedrückt: die direkte Rückkehr zur Wohnung von der Aktivität a_j ist um so weniger wahrscheinlich, je größer die Zahl $n - j$ der noch nicht durchgeführten Aktivitäten ist. Nimmt man an, daß $p(j \mid n)$ von der Zahl n der Aktivitäten insgesamt und von der Stellung der gerade durchgeführten Aktivität innerhalb des gesamten Aktivitätenmusters – ausgedrückt durch den Index j – abhängt, so sind Modellvarianten[17] wie z. B.

$$p(j \mid n) = \frac{1}{n - j - 1} \qquad (j=1, \ldots, n) \tag{4.8}$$

oder

$$p(j \mid n) = \frac{2}{1 + \exp(\alpha(n-j))} \qquad (j=1, \ldots, n) \tag{4.9}$$

wobei $\alpha > 0$, denkbar[18].

Eine beträchtliche Vereinfachung des Gesamtmodells ist dadurch möglich, daß man anstelle einer Hypothese über die bedingte Rückkehrwahrscheinlichkeit $p(j \mid n)$ eine Annahme über die *mittlere bedingte Rückkehrwahrscheinlichkeit*

$$\bar{p}_n = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} p(j \mid n) \qquad (n=1, 2, \ldots) \tag{4.10}$$

macht. Für $\bar{p}_n$ gilt $(1/n) \leq \bar{p}_n \leq 1$. Man kann, wie man direkt sieht, den bedingten Erwartungswert $E(K \mid N=n)$ in Abhängigkeit von $\bar{p}_n$ darstellen:

$$E(K \mid N=n) = n\,\bar{p}_n \qquad (n=1, 2, \ldots)\,. \tag{4.11}$$

16) Man kann auch die bedingte Verteilung $P\{K=k \mid N=n\}$ als Funktion der bedingten Rückkehrwahrscheinlichkeiten darstellen. Vgl. *Parzen, E.*, Modern . . . , a.a.O.

17) Die Variante (4.8) geht zurück auf *Vidakovich, V. S.*, A Harmonic . . . , a.a.O.

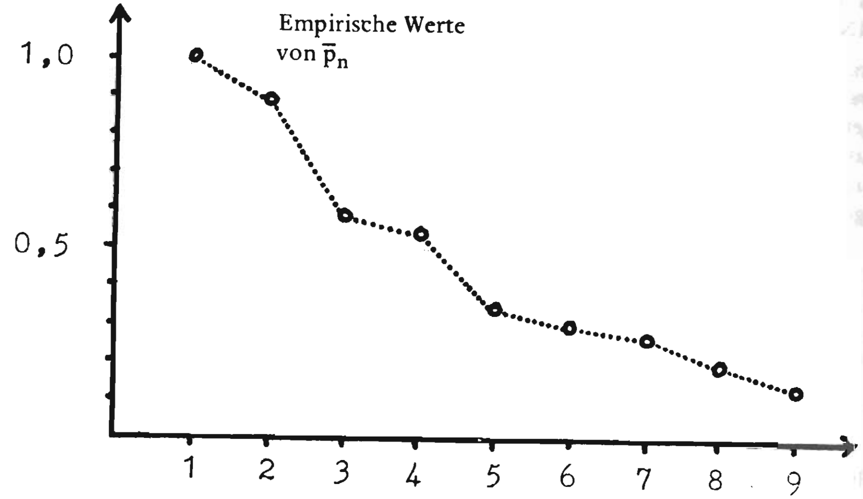
18) Näheres siehe *Hautzinger, H.* und *Kessel, P.*, Entwicklung . . . , a.a.O.

Die bedingte Verteilung $P\{K=k \mid N=n\}$ läßt sich natürlich nicht als Funktion von $\bar{p}_n$ darstellen, dasselbe gilt für die bedingte Varianz von K. Man kann jedoch den Maximalwert von $var(K \mid N=n)$ in Abhängigkeit von $\bar{p}_n$ darstellen[19]. Es gilt nämlich

$$(4.12) \qquad var(K \mid N=n) \begin{cases} = 0 & \text{für } n=1 \\ \leqslant \dfrac{n(1-\bar{p}_n)(n\bar{p}_n - 1)}{n-1} & \text{für } n \geqslant 2 \end{cases}$$

Verwendet man diese Abschätzung für $var(K \mid N = n)$, so ist man bei der Beurteilung der Aussagekraft von Punktschätzungen für $E(K \mid N = n)$ stets auf der sicheren Seite.

Abbildung 4.1: *Empirische Werte der mittleren bedingten Rückkehrwahrscheinlichkeit* $\bar{p}_n$



Wählt man der Einfachheit halber einen Modellansatz, bei welchem $\bar{p}_n$ lediglich als Funktion

$$\bar{p}_n = g(n)$$

der Aktivitätenhäufigkeit n betrachtet wird, so ist zu beachten, daß die Doppelungleichung

$$(4.13) \qquad \frac{1}{n} \leqslant g(n) \leqslant 1$$

für alle n = 1, 2, . . . erfüllt sein muß. Neben diesem theoretischen Erfordernis muß aus empirischen Gründen verlangt werden, daß die Funktion g in n monoton fallend ist (vgl. Abbildung 4.1). Es sind eine ganze Reihe von Funktionstypen denkbar, welche die eben genannten Eigenschaften besitzen, z. B.

$$(4.14) \qquad g(n) = n^{-\theta} \qquad (0 < \theta < 1;\ n=1, 2, \ldots).$$

19) Der Beweis basiert auf Überlegungen, wie sie sich bei *Feller, W.*, An Introduction to Probability Theory and Its Applications, Volume I, 1965, S. 217, finden.

Bei der Entscheidung über den Typ der Funktion g(n) sollte man solche Funktionstypen bevorzugen, welche gewährleisten, daß der letztendlich interessierende Erwartungswert E(Y) der täglichen Wegehäufigkeit, der ja gemäß (3.14a) und (4.11) die Darstellung

$$E(Y) = \sum_{n=0}^{\infty} (n + E(K \mid N=n))\ P\{N=n\}$$

$$(4.15) \qquad = \sum_{n=0}^{\infty} (n + ng(n))\ P\{N=n\} \qquad (g(0) \equiv 0)$$

besitzt, eine möglichst einfache analytische Form aufweist, wenn man N als *poissonverteilt* annimmt. Eine in dieser Hinsicht gut geeignete Funktion ist die negative Exponentialfunktion

$$(4.16) \qquad g(n) = e^{-\theta(n-1)} \qquad (n=1, 2, \ldots).$$

Ein kleiner theoretischer „Schönheitsfehler" der Funktion (4.16) liegt darin, daß die notwendige Bedingung (4.13) nicht mehr erfüllt ist, wenn n einen gewissen kritischen Wert n_o, der von θ abhängt, übersteigt. Es läßt sich jedoch zeigen[20], daß $n_o \cong 11$, d. h. im gesamten empirisch relevanten Teil des Definitionsbereichs besitzt (4.16) die gewünschte Eigenschaft (4.13).

Im Fall des negativ exponentiellen Verkettungsmodells hat $E(K \mid N = n)$ die Form

$$(4.17) \qquad E(K \mid N=n) = n\, e^{-\theta(n-1)} \qquad (n=0, 1, 2, \ldots).$$

Der bedingte Erwartungswert der Wegehäufigkeit ist somit durch

$$(4.18) \qquad E(Y \mid N=n) = n(1 + e^{-\theta(n-1)})$$

für n=0, 1, 2, . . . gegeben. Wegen der Gleichheit der bedingten Varianzen von Y und K (vgl. (3.12b)) stellt (4.12) auch eine Abschätzung von $var(Y \mid N=n)$ nach oben dar.

Für die statistische Schätzung des Parameters θ des Verkettungsmodells (4.17) stehen mehrere Verfahren zur Verfügung[21]. Besonders einfach für praktische Kalibrierungsarbeiten ist der Kleinste-Quadrate-Schätzwert

$$(4.19) \qquad \hat{\theta} = -\frac{\sum((n_i - 1)\ \ln(k_i/n_i))}{\sum(n_i - 1)^2}$$

wobei n_i und k_i die Aktivitätenhäufigkeit bzw. die Zahl der Wegeketten der i-ten Person in der Stichprobe bezeichnet (nur Personen mit $n_i \geqslant 1$).

Tabelle 4.2 zeigt, daß das Verkettungsmodell (4.18) eine ausgezeichnete Abbildungsgenauigkeit besitzt und daß selbst der Maximalwert der bedingten Varianz von Y im Verhältnis zum bedingten Erwartungswert von Y sehr klein ist. Dies bedeutet, daß mit Hilfe des Modells eine sehr zuverlässige Prognose der Wegehäufigkeit bei gegebener Aktivitätenhäufigkeit möglich ist.

20) Vgl. *Hautzinger, H.*, Combined Modelling . . . , a.a.O.
21) Näheres siehe *Hautzinger, H.* und *Kessel, P.*, Entwicklung . . . , a.a.O.

Tabelle 4.2: *Empirische und theoretische Werte der mittleren täglichen Wegehäufigkeit als Funktion der Aktivitätenhäufigkeit*

Aktivitätenhäufigkeit (n)	E(Y I N = n) empir.	E(Y I N = n) theor.[1]	var (Y I N = n) (Maximalwert)	$\sqrt{\text{var}(Y \mid N=n)}$ / E (Y I N=n) (Maximalwert)
1	2,00	2,00	0	0
2	3,77	3,56	0,25	0,14
3	4,77	4,82	0,49	0,14
4	6,14	5,93	0,64	0,13
5	6,77	6,98	0,75	0,12
6	7,70	8,00	0,80	0,11

1) Theoretische Werte für $\theta = 0{,}236$.

4.4 Ein doppelt exponentielles Gesamtmodell der Wegehäufigkeit

Durch Einsetzen von (4.1) und (4.16) in (4.15) erhält man nach einigen Umformungen den gesuchten Erwartungswert der Wegehäufigkeit als Funktion der Bestimmungsfaktoren $x_1, \ldots, x_s$ des Aktivitätenmusters und deren Gewichte sowie des „Verkettungsparameters" θ:

$$E(Y) = \mu \left[1 + e^{\mu\{e^{-\theta} - 1\}}\right] \tag{4.20}$$

wobei $\theta > 0$ und

$$\mu = \exp(\lambda_0 + \lambda_1 x_1 + \ldots + \lambda_s x_s) \, . \tag{4.21}$$

Wegen der funktionalen Form von (4.20) kann man von einem „doppelt exponentiellen" Gesamtmodell der Wegehäufigkeit sprechen. Bei diesem Modell ist die erwartete Wegehäufigkeit E(Y) ceteris paribus eine monoton wachsende Funktion der durch μ gemessenen „Aktivitätenneigung" und eine monoton fallende Funktion des Parameters θ, der ein Maß für die Neigung zur Verkettung von Aktivitäten darstellt. Beide Eigenschaften entsprechen den a-priori-Erwartungen. Vgl. hierzu Tabelle 4.3.

Tabelle 4.3: *Erwartungswert der Wegehäufigkeit für ausgewählte Werte von μ und θ*

μ \ θ		1,80	1,90	2,00
	E (Y)			
0,20		3,10	3,25	3,39
0,25		3,01	3,15	3,28
0,30		2,93	3,06	3,19

Bei den hier verwendeten Stichprobendaten ergab sich als Schätzwert für μ der Wert $\hat{\mu} = 1{,}85$ (Aktivitäten / Tag). Setzt man diesen Wert zusammen mit $\hat{\theta} = 0{,}236$ in (4.20) ein, so erhält man als Schätzwert für E(Y) den Wert 3.10 Wege/Tag. Der empirische Mittelwert betrug 3,08 Wege, d. h. auch das Gesamtmodell weist eine überaus gute Anpassungsqualität auf.

Der Grad der Abhängigkeit der erwarteten Verkehrsnachfrage von der individuellen Aktivitätsneigung μ läßt sich durch die Elastizität η von E(Y) in Bezug auf μ quantifizieren:

$$\eta = 1 + \frac{c\,\mu\, e^{-c\mu}}{1 + e^{-c\mu}} \tag{4.22}$$

wobei $c = \exp(-\theta) - 1$. Man kann zeigen, daß gilt

$$0 < \eta < 1 \tag{4.23}$$

falls $\theta > 0$. Die erwartete Verkehrsnachfrage ist also relativ unelastisch in bezug auf die Aktivitätsneigung. Für die verwendeten Stichprobendaten ergab sich $\eta = 0{,}84$, d. h. unter den gegebenen Bedingungen ($\mu = 1{,}85$ und $\theta = 0{,}236$) führt eine 1-prozentige Steigerung der mittleren Aktivitätenhäufigkeit nur zu einer 0,8-prozentigen Zunahme der mittleren Wegehäufigkeit. Dies ist darauf zurückzuführen, daß bei steigender Aktivitätenhäufigkeit die Tendenz zur Verkettung von Aktivitäten wächst und somit die mittlere bedingte Rückkehrwahrscheinlichkeit sinkt.

Gemäß (4.2) ist die erwartete Aktivitätenhäufigkeit μ selbst eine Funktion $\mu = \phi(x_1, \ldots, x_s)$ von gewissen Einflußfaktoren x_k (k=1, . . . , s). Man überlegt sich leicht, daß die Elastizität η_k der erwarteten Wegehäufigkeit E(Y) in Bezug auf den Einflußfaktor x_k durch

$$\eta_k = \eta\, x_k \frac{\delta\phi}{\delta x_k} \Big/ \phi(x_1, \ldots, x_s) \tag{4.24}$$

gegeben ist. Im Fall einer exponentiellen Form von ϕ gemäß (4.2a) vereinfacht sich (4.24) zu

$$\eta_k = \eta\, \lambda_k\, x_k \qquad (k=1, \ldots, s) \, . \tag{4.24a}$$

Durch (4.20) und (4.21) ist eine einfache Darstellung der erwarteten Wegehäufigkeit als Funktion ihrer Bestimmungsfaktoren gegeben, die als Basis für Modellprognosen des Verkehrsaufkommens dienen kann. Man muß hierfür in einem ersten Schritt die Gesamtbevölkerung eines Planungsraums analog zur hier beschriebenen Segmentierung in homogene Gruppen zerlegen und innerhalb jeder Gruppe die wesentlichen Einflußfaktoren der Aktivitätenhäufigkeit ermitteln und deren Gewichte sowie den Verkettungsparameter θ statistisch schätzen. In einem zweiten Schritt kann dann die aggregierte Prognose des Verkehrsaufkommens nach dem beschriebenen Verfahren getrennt nach Bevölkerungsgruppen und Verkehrszonen erfolgen, sobald Prognosen oder Szenarien für die erklärenden Variablen des Modells vorliegen. Neben dem Verkehrsaufkommen insgesamt kann auf der Grundlage der Gleichungen (3.14a) und (3.17) auch das Aufkommen an wohnungsbezogenen und nicht wohnungsbezogenen Fahrten und Fußwegen im Rahmen eines konsistenten Modellansatzes prognostiziert werden.

5. Ausblick

Die vorausgegangenen Ausführungen haben gezeigt, daß aktivitätenbezogene Verkehrserzeugungsmodelle, obwohl sie eine ganz neue Entwicklung darstellen, bereits jetzt als vollwertige Alternativen zu herkömmlichen Modellen der Verkehrserzeugung angesehen werden können. Ihre wesentlichen Vorzüge gegenüber den bisherigen Ansätzen sind

- eine umfassende theoretische Fundierung, die von dem Grundsatz ausgeht, daß Verkehrsnachfrage nur im Kontext der Aktivitätennachfrage befriedigend erklärt werden kann,
- die empirische Validität dieses Modelltyps,
- die Möglichkeit einer weitgehend unverfälschten Quantifizierung des Einflusses der verschiedenen Bestimmungsfaktoren der Aktivitäten- und Verkehrsnachfrage,
- die Einfachheit der Modellkalibrierung und der Modellanwendung zu Prognosezwecken,
- die Prognose des Verkehrsaufkommens getrennt nach wohnungsbezogenen und nicht wohnungsbezogenen Fahrten und Fußwegen im Rahmen eines konsistenten Modells,
- die Möglichkeit weiterer Verfeinerungen und Verallgemeinerungen des Modells.

Der vorliegende Beitrag hätte dann sein Ziel erreicht, wenn er das Interesse an aktivitätenbezogenen Verkehrserzeugungsmodellen als einem neuartigen Instrument der Verkehrsplanung wecken und Weiterentwicklungen dieses Verkehrsprognosekonzepts stimulieren würde.

Summary

In the field of empirical traffic research, there is nearly general agreement on the fact that the traffic behavior of individuals can only be reasonably well explained by means of individual patterns of activities. For the first time, an attempt is made on this paper to work out a model of the individual demand for a change of place which is explicitly based on a model of the demand for activities. Based on a survey of the available empirical knowledge of the frequency of activities and the frequency of moving from one place to the next, at first a general description of activity-related traffic generation models is given. In this connection, it is also demonstrated how a model of the frequency of individual activities can be combined with a model illustrating the process of linking activities outside the home in order that an instrument to forecast trip frequency and the frequency of making trips on foot may be obtained. After that, a special activity-related traffic generation model is presented which is the result from a Poisson model of the frequency of activities and a negatively exponential correlation model. First application examples illustrate the various advantages of this novel concept of forecasting the traffic of people in comparison to conventional model concepts.

Résumé

Dans le domaine de la recherche empirique concernant la circulation, on trouve entretemps l'avis en majorité unanime que le comportement des individus ne s'explique d'une manière logique que par un modèle d'activités individuel. Dans le cadre de cet exposé, il est essayé pour la première fois de baser un modèle de besoin de changement de lieu individuel sur un modèle d'activités. Se basant sur un résumé des résultats empiriques disponibles concernant la fréquence d'activités et le nombre de trajets parcourus, une caractérisation générale des modèles de circulation se référant aux activités est donnée. Il est ainsi montré comment un modèle de fréquence d'activité individuelle est combiné avec un modèle que représente le processus d'enchaînement d'activités en dehors de la maison dans le but d'obtenir un instrument de prévision pour la fréquence de trajets parcours avec un véhicule et à pied. Est ensuite présenté un modèle créant une circulation reliée aux activités qui résulte d'un modèle Poisson de fréquence d'activités et un modèle d'enchaînement exponentiel négatif. De premiers exempies d'application illustrent les avantages multiples de ce nouveau concept de prévision de traffic par rapport aux modèles conventionnels.

Richtlinien für ökonomische Systemanalysen?

VON ERHARD MOOSMAYER, BONN

Solange Knappheit an Sach- und Dienstleistungen zur Befriedigung elementarer Bedürfnisse herrscht, fällt es nicht schwer, den erforderlichen Umfang und die erforderliche Art der Produktion zu erkennen. Mit steigendem Wohlstand erfährt aber der Bedarf eine erhebliche Differenzierung. Hohe Einkommen erweitern jedoch nicht nur den Spielraum für Käufe, sondern auch jene für die Wahl des Wohn-, Erwerbs- und Erholungsorts. Deshalb beschleunigt sich der Wandel sektoraler Wirtschaftsstrukturen ebenso wie die Änderung von Besiedlungsformen. Verlangsamt sich zugleich das gesamtwirtschaftliche Wachstum auch unabhängig von konjunkturellen Schwankungen, etwa weil die Sparquote sinkt und/oder sich die marginale Kapitalproduktivität verringert und/oder sich technische Innovationen verzögern und/oder Roh- und Hilfsstoffquellen versiegen und/oder die Belastbarkeit der Umwelt abnimmt, verschärft sich die Gefahr von Fehlinvestitionen weiter. Davon bleibt sogar die öffentliche Hand nicht verschont, obwohl sich die private Nachfrage immer stärker auf solche Leistungen richtet, die der Staat anbieten muß, weil sie jenseits einer Bereitschaft zu Vergütungen zur Verfügung stehen.

So nimmt es nicht wunder, daß sich gegen Ende der sechziger Jahre in den Gebietskörperschaften Bemühungen verstärkten, politische Entscheidungen wissenschaftlich vorzubereiten. Dazu gehören nicht zuletzt neue Maßstäbe für die Planung von Straßen[1].

Erschien es früher als ausreichend, den Bedarf an Netzergänzungen und -verdichtungen im wesentlichen an Vergleichen zwischen Kapazitäten und prognostizierten Belastungen zu messen, so kam es nunmehr darauf an, Methoden der klassischen Wirtschaftlichkeitsberechnungen von Investitionen weiterzuentwickeln und auf außerverkehrliche Wirkungsarten auszudehnen[2].

Die für die Ermittlung des Bedarfs an verkehrlicher Infrastruktur gewonnenen Erkenntnisse dürfen nicht auf die Planung überregionaler Verkehrswege beschränkt bleiben. Vielmehr erscheint es als erwünscht, sie so aufzubereiten, daß sie sich auch auf die Durchführung von Projekten, also auf die Bestimmung der Linien, auf die Überprüfung der Vereinbarkeit mit raumordnungspolitischen Anforderungen und auf die Genehmigung der erwogenen Maßnahmen, sowie auf die Verkehrswegeplanung anderer Gebietskörperschaften anwenden lassen.

Anschrift des Verfassers:
Regierungsdirektor Dr. Erhard Moosmayer
Bundesministerium für Verkehr
Kennedyallee 72
5300 Bonn 2

1) *Huber, H. J.* und *Keller, H. J.*, Rechtfertigung von Straßenplanungen, in: Straße und Autobahn, Heft 11/1980, S. 491 – 498.

2) *Schussmann, K.*, Die Paretianische Kosten-Nutzen-Analyse (= Münchener Universitäts-Schriften, Reihe der Staatswirtschaftlichen Fakultät, Band 3), Kallmünz 1973.