

HELMUT SCHNEEWOLF

Ein Modell zur Prognose des Berufsverkehrs auf der Basis der amtlichen Statistik*Einführung*

Die räumliche Konzentration von Arbeitsplätzen in den Innenstädten und von Wohnungen in den Randlagen führen zwangsläufig zur permanenten Zunahme der Pendlerzahlen und des Verkehrsaufwandes im täglichen Berufsverkehr. Maßnahmen zur Bewältigung dieser Verkehrsnachfrage verschlingen Unsummen. Bei Diskussionen über die verkehrstechnische Bewältigung (Leistungsfähigkeit von Verkehrsanlagen, Substitutionstendenzen zwischen Verkehrsträgern usw.) wird vielfach die Frage nach dem ursächlichen Problem nicht oder nicht deutlich genug gestellt. Es läßt sich etwa durch das Stichwort „optimale Zuordnung von Wohn- und Arbeitsplätzen“ umreißen. Unter diesem Blickwinkel werden theoretische Möglichkeiten zur positiven Beeinflussung des Berufsverkehrsaufkommens durch die strukturelle Siedlungsplanung recht deutlich.

Die Pendlerströme der Berufstätigen nicht global, sondern in relevanten Merkmalsgliederungen zu analysieren und für Prognoseberechnungen modellmäßig zu beschreiben, sind Ziele einer Forschungsarbeit¹, deren erste Ergebnisse mit diesem Aufsatz vorgestellt werden.

Datenbasis und -analyse

Die Untersuchung basiert hauptsächlich auf den Daten der Volks- und Berufszählung vom 6. 6. 1961²; dadurch entfallen aufwendige Primärerhebungen. Die weitgehende Einheitlichkeit bei Erhebung und Aufbereitung (vgl. [1]³) durch Städte und Gemeinden erlaubt außerdem eine Übertragung der Vorgehensweise bei der Analyse und des Modellansatzes auch auf andere Stadtregionen.

Zur Entwicklung des Modellansatzes wurden Stadt und Großraum Hannover ausgewählt. Die Auswahl dieser Stadtregion wurde bestimmt durch Anforderungen bezüglich Mindestgröße, monozentraler Lage, geeigneter Zahl und Größe der statistischen Bezugsflächen, Vergleichbarkeit mit Daten späterer Erhebungen u. a. Ausgehend von den statistischen Bezirken im Stadtgebiet sowie in den

von der sozioökonomischen Struktur unterschiedlicher Gemeindegrößen und -typen. Untersuchung der PROGNOSE AG, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr. – Basel 1969.

² Für die Erstellung des Modell-Ansatzes ist die Tatsache, daß die Daten von 1961 veraltet sind, von untergeordneter Bedeutung. In einer zweiten Untersuchungsphase wird z. Z. mit den inzwischen aufbereiteten Daten der Pendlerstatistik von 1968 die zeitliche Stabilität des Ansatzes überprüft.

³ Die Verweiszahlen in [] beziehen sich auf die am Ende des Beitrags aufgeführte Literatur.

¹ Hübschle, J.; D. Grimm; H. Schneewolf; H. Afheldt: Die künftige Nachfrage nach Personenverkehrsleistungen in Abhängigkeit

nach von	1.	k	 73	E
1		$V_{1,k}$		E_1
⋮		⋮		⋮
⋮		⋮		⋮
i	$V_{i,1}$	$V_{i,k}$	 $V_{i,73}$	E_i
⋮		⋮		⋮
⋮		⋮		⋮
73		$V_{73,k}$		E_{73}
B	B_1	B_k	 B_{73}	P

Abb. 1:
Schema einer
Pendlermatrix

Gemeinden im übrigen Großraum als kleinsten Erhebungseinheiten, sind – unter weitgehender Beibehaltung der Erwerbstätigen- und Beschäftigtenstruktur – 73 Verkehrszellen gebildet worden, daraus wiederum 30 Gebiete und 4 Zonen (zur Gebiets- und Zoneneinteilung vgl. Abb. 4).

Das Datenmaterial enthält – bislang viel zu wenig genutzte – Informationen über die Pendlerbeziehungen (V_{ik}) zwischen Wohn- und Arbeitsstätten von Berufspendlern. Abweichend von [1] werden unter Pendler (P) alle Berufstätigen verstanden, nicht nur solche, die zum Erreichen der Arbeitsstätte eine Gemeindegrenze überschreiten; ebenfalls erfaßt sind Berufstätige, deren Arbeitsstätte auf dem Wohngrundstück liegt (sog. Nicht-Pendler). Die Erfassung am Wohnort kennzeichnet den Pendler als Erwerbstätigen (E_i), die Erfassung am Arbeitsplatz als Beschäftigten (B_k). Die Aufspaltung in einzelne Pendlerschichten umfaßt solche Merkmalsgliederungen, für die ein „Verdacht“ auf unterschiedliches gegenwärtiges Verhalten und/oder auf unterschiedliche Wachstumstendenz bestand. So wurde beispielsweise untersucht, ob männliche

Pendler andere Entfernungen zurücklegen als weibliche und inwieweit für jüngere weibliche Pendler wiederum andere Verhältnisse gelten als für ältere. Neben diesen geschlechts- und altersspezifischen Merkmalen wurden die Untergliederungen nach Wirtschaftsbereichen (verarbeitendes Gewerbe, Handel usw.) und rechtlichem Wohnverhältnis (Eigentümer, Mieter) geprüft. Außerdem ließ die Aufgliederung der Mieter nach Haushaltsgröße interessante Ergebnisse erwarten. Insgesamt umfaßt die Auswahl 24 Merkmalsschichtungen (vgl. Tab. 1, Sp. 1 bis 3).

Die Pendlerströme V_{ik} der einzelnen Merkmalsschichten sind als Matrizenelemente (vgl. Abb. 1) in den Matrizen 1 bis 21 abgespeichert; die Matrizen 22 bis 24 errechnen sich durch Überlagerungen entsprechender Teilmatrizen (vgl. auch Abb. 2). Auf der Basis von 73 Zellen ergeben sich – einschließlich der Binnenpendler – insgesamt 5329 und auf der Basis von 30 Gebieten 900 mögliche Pendlerbeziehungen für jede der 24 Matrizen. Zur Analyse dieser Vielzahl von räumlichen Verflechtungen wurden die in Abb. 2 aufgeführten Programme entwickelt.

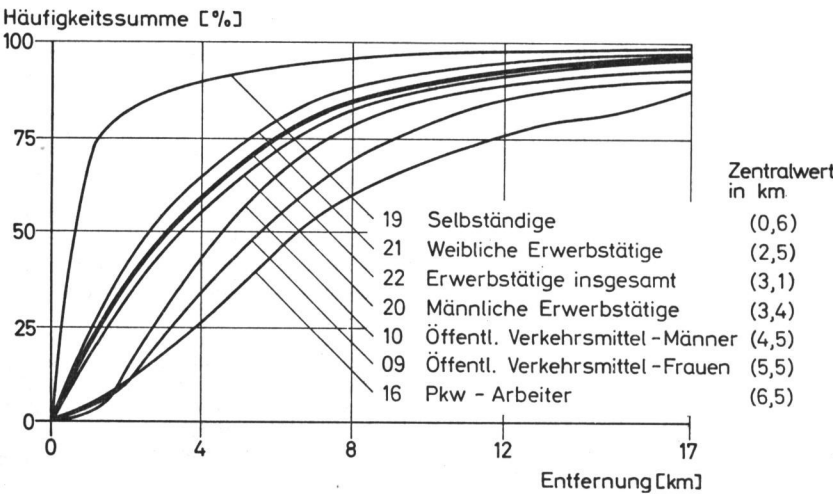


Abb. 3:
Entfernungen
zwischen Wohn- und
Arbeitsstätten

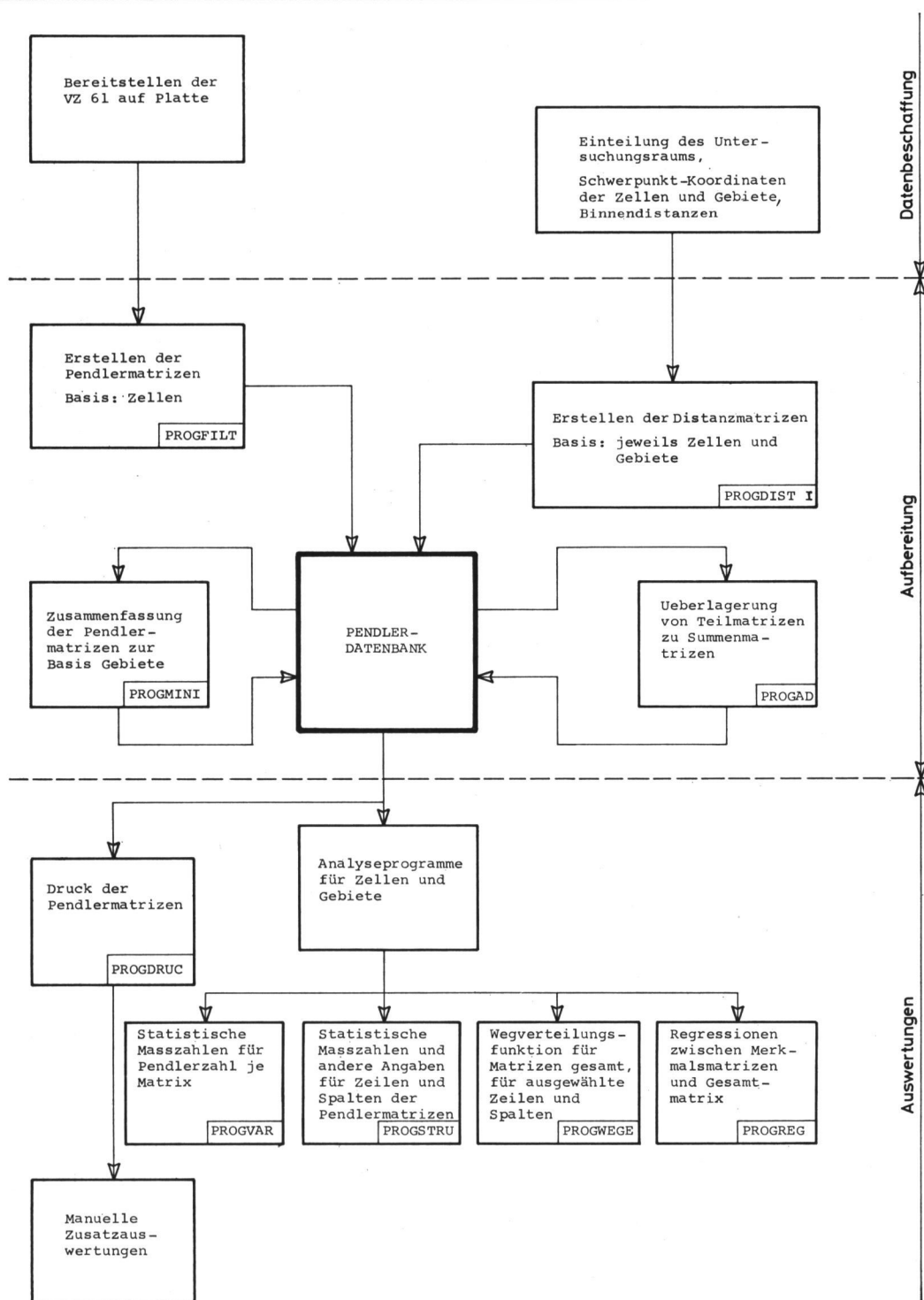


Abb. 2: Ablaufschema der statistischen Auswertungen

Tabelle 1 enthält das Pendlertotal je Merkmalsschicht (Sp. 4) sowie deren Anteil an der Gesamt-Pendlerzahl (Sp. 5). Die Anteile der innerstädtischen Pendler (Sp. 6) an den Pendlern des gesamten Untersuchungsgebietes (Großraum Hannover) liefern bereits Hinweise auf schichtenspezifisches Pendlerverhalten. Mit 24% Anteil sind beispielsweise männliche Berufspendler zwischen Stadtgebiet und übrigem Großraum weniger „distanzempfindlich“ als weibliche (19%).

Die Unterschiede in der Nachfrage nach Verkehrsleistungen innerhalb der einzelnen Merkmalsschichten lassen sich durch Häufigkeitssummen der Entfernungen (zwischen Wohn- und Arbeitsstätte je Pendler) überschaubar darstellen (Abb. 3). Für die Hälfte aller Pendler errechnet sich eine Entfernung von mehr bzw. weniger als $\bar{l} = 3,1$ km (= Zentralwert). Für die weiblichen Pendler (Anteil 37%, vgl. Tab. 1, Sp. 5) ist der Zentralwert mit $\bar{l} = 2,5$ km deutlich niedriger als für die männlichen Pendler ($\bar{l} =$

Tabelle 1: Angaben zu den Merkmalsmatrizen

Matrizen-Nr. ¹	1. Merkmal	2. Merkmal	Pendler-Total	Anteil an Matrix 22 (%)	Davon Pendler innerhalb der Stadt (%)	Gesamtfehler S (α)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
01	Verarbeitendes Gewerbe	Männer	115 434	35	70	70
02	Handel	Männer	27 007	8	83	65
03	Verkehr	Männer	20 907	6	76	88
04	Dienstleistungen	Männer	24 480	7	94	80
05	Öffentlicher Dienst	Männer	20 654	6	90	118
06	Verarbeitendes Gewerbe	Frauen	42 946	13	75	79
07	Handel	Frauen	28 436	9	83	61
08	Verkehr, Dienstl., öffentl. Dienst	Frauen	52 015	16	86	90
09	Öffentliche Verkehrsmittel	Männer	55 835	17	65	53
10	Öffentliche Verkehrsmittel	Frauen	55 156	17	71	40
11	Hauptmieter	Haushaltsgr. 1–2 Pers.	72 553	22	84	56
12	Hauptmieter	Haushaltsgr. 3 Pers.	72 649	22	80	52
13	Hauptmieter	Haushaltsgr. 4–8 Pers.	82 486	25	78	53
14	Untermieter		47 958	14	79	51
15	Eigentümer (Haus, Wohnung)		46 077	14	60	74
16	Pkw	Arbeiter	20 012	6	53	99
17	Frauen	bis 24 Jahre	41 657	13	75	58
18	Frauen	über 24 Jahre	81 740	25	85	67
19	Selbständige		28 081	9	95	187
20	Männer		208 482	63	76	57
21	Frauen		123 397	37	81	63
22	Gesamt-Matrix		331 879	100	72	55
23	Hauptmieter (Σ 11–13)		227 688	67	81	53
24	Dienstleistungen (Σ 03–05)	Männer	66 041	20	83	75

¹⁾ Die Numerierung entspricht dem Arbeitsablauf.

3,4 km). Interessante Kontrastbilder zeigen die Diagramme für Selbständige einerseits mit $l = 0,6$ km sowie Benutzer öffentlicher Verkehrsmittel und Arbeiter mit Pkw mit $\bar{l} \geq 4,5$ km andererseits. Im ersten Fall macht sich der hohe Anteil der Nicht-Pendler bemerkbar, im zweiten Fall der Einfluß, daß öffentliche und private Verkehrsmittel sich offenbar erst bei größeren Entfernungen lohnen.

Abb. 4 kennzeichnet für verschiedene Pendlerschichten die unterschiedlichen Einzugsbereiche ausgewählter Arbeitsplatzkonzentrationen. Die Pendlerströme V_{ik} der im Handel beschäftigten Frauen (Matrix 07) sind für das Zielgebiet $k = 02$ (= Spalte k , vgl. Abb. 1) auf die Zahl der wohnhaften Erwerbstätigen des Herkunftsgebietes i (= Spalten-Summen E_i , vgl. Abb. 1) bezogen. Trotz starker gebietsweiser Unterschiede in den Absolutzahlen zeigen die dargestellten Relativwerte innerhalb der Zonen eine hohe Gleichmäßigkeit; bis auf die stärker beteiligten Einzugsbereiche in unmittelbarer Nähe des Zielgebietes (Zone I) pendeln aus allen städtischen Gebieten der Zonen II und III zwischen 10 % und 20 % dieser Pendlerschicht in das Gebiet 02. Die dagegen auf 20 % bis 30 % ansteigenden Werte für Einzugsgebiete außerhalb der Stadtgrenze (Zone III) charakterisieren die Attraktivität der Innenstadt für diese weiblichen Berufstätigen.

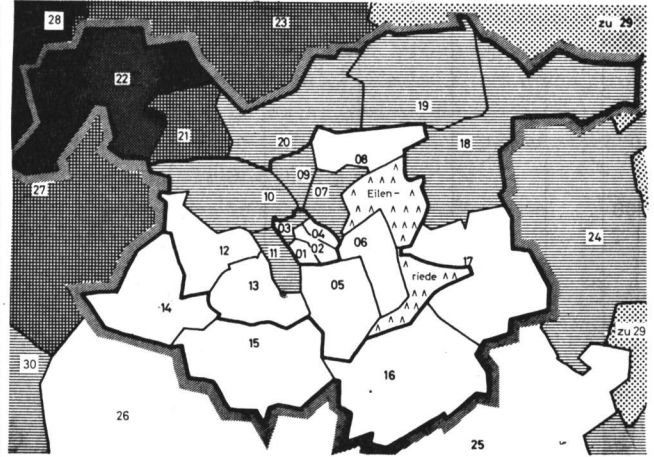
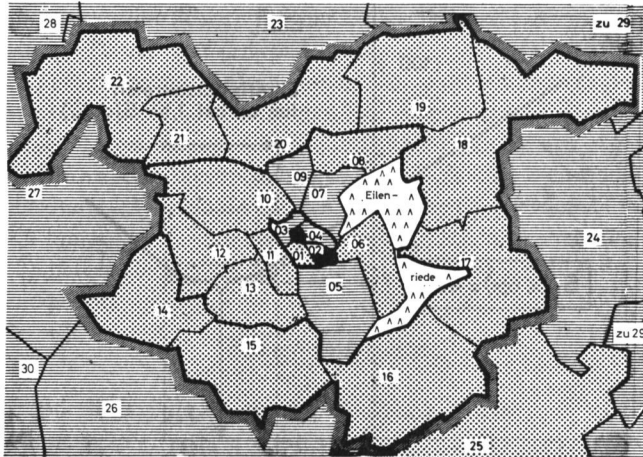
Bei Zielgebieten in Randlagen gruppieren sich die Einzugsbereiche nicht mehr ringförmig. Für die männlichen Pendler mit dem Merkmal „Verarbeitendes Gewerbe“ ($M = 01$) und für das Zielgebiet $k = 22$ (Werke von VW und Continental) zeichnet sich eindeutig der „Windschatten“ der Stadtmitte ab. Die offensichtlich bevorzugten Wohnlagen lassen sich durch die Attraktivität von Verkehrsverbindungen deuten: Schnelle Fahrtmöglichkeiten bieten von nördlichen und östlichen Gebieten aus die Bundesautobahn („Mißbrauch“ als städtische Umgehungsstraße!) und zwischen dem betrachteten Zielgebiet und der Innenstadt die öffentlichen Verkehrsmittel.

Modell-Formulierung

Ansatzpunkte für das zu erstellende Verkehrsmodell finden sich im Bereich der Verkehrstechnik, die die Kenntnisse über Zusammenhänge zwischen Nachfrage und Einflußgrößen in den letzten Jahren stark vorangetrieben hat (vgl. z. B. [2], [3], [4]). Diese Modelle zur Verkehrserzeugung und Verkehrsverteilung werden vornehmlich dazu genutzt, ein Prognose-Verkehrsnetz (oder Netz-Varianten) zu entwerfen und zu dimensionieren, das einer aus vorgegebener Siedlungsstruktur resultierenden Verkehrsnachfrage „angepaßt“ ist.

Matrix M = 07 (Handel - Frauen)
Zielgebiet $k_o = 02$
 $B_{k_o} = \sum_i V_{ik_o} = 10060$ Beschäftigte

Matrix M = 01 (Verarbeit. Gewerbe - Männer)
Zielgebiet $k_o = 22$
 $B_{k_o} = \sum_i V_{ik_o} = 19274$ Beschäftigte



$V'_{ik_o} (V_{ik_o}/E_i) \cdot 100 [\%]$
= Pendlerbeziehungen aus allen Gebieten i zu den Zielgebieten k_o , bezogen auf die Erwerbstätigen in i

Abb. 4: Einzugsbereiche für ausgewählte Zielgebiete

Im Gegensatz dazu soll ein Modell zum Berufsverkehr formuliert werden, das nach Vorgabe von alternativen Prognosedaten (Erwerbstätige und Beschäftigte je Gebiet) das günstigste Siedlungskonzept, gemessen am Entfernungsaufwand, herausfindet.

Das Literaturstudium ergab keine konkreten Hinweise auf Modellansätze ähnlicher Fragestellung, bekräftigte jedoch den Entschluß, einen Lösungsansatz vom Typ des Gravitationsmodells zu wählen. Verschiedene Ansätze führten zu dem folgenden Ergebnis

$$V_{ik}^M = \frac{c_i^M \cdot b_k^M}{d_{ik}^{\alpha_{v\mu}} \cdot C_{v\mu}^M} \cdot P^M \quad \text{wobei}$$

- V_{ik}^M = Zahl der Berufspendler zwischen den Gebieten i und k,
 M = Merkmalsmatrix,
 P^M = Pendler-Total der Merkmalsmatrix M,
 c_i = Anteil der Erwerbstätigen in i am Pendlertotal (= E_i/P),
 b_k = Anteil der Beschäftigten in k am Pendlertotal (= B_k/P),
 d_{ik} = Luftliniendistanz zwischen i und k,
 $\alpha_{v\mu}$ = zonenabhängiger Distanzexponent $v, \mu = 1 \dots 4$,
 $C_{v\mu}$ = Normierungskonstante.

Wegen des zonenabhängigen Parameters $\alpha_{v\mu}$ wurde der Ansatz als Zonen-Modell bezeichnet. Die Elemente der α -Matrix errechnen sich innerhalb eines Matrixteiles $v-\mu$ für $i \in v$ und $k \in \mu$ iterativ durch Minimierung des Fehlermaßes

$$S(\alpha) = n \frac{\left[\sum_{i,k} (V_{ik}^{Ist} - V_{ik}^{Soll})^2 \right]^{1/2}}{\sum_{i,k} V_{ik}^{Ist}} \cdot 100 (\%);$$

dabei erleichtert die Normierung auf das jeweilige Pendlertotal den Vergleich zwischen den Merkmalsmatrizen. Die Konstanten C werden so bestimmt, daß

$$\sum V_{ik} = z_{v\mu} \cdot P, i \in v \wedge k \in \mu$$

wobei $z_{v\mu}$ den Anteil der Pendler von Zone v nach Zone μ am Total P je Merkmalsmatrix darstellt.

Die verworfenen Alternativ-Untersuchungen umfassen:

- (1) Eine Widerstandsfunktion mit einem einzigen Distanz-Exponenten α für jeweils eine Matrix.
Die Fehlermaße waren insgesamt zu hoch. Die systematischen Fehler in den Zeilen- und Spaltensummen veranlaßten uns daher, den Parameter zonenweise zu approximieren.
- (2) Eine Widerstandsfunktion mit Berücksichtigung von „Gunst-“ und „Attraktivitäts-Faktoren“.
Deren – wider Erwarten – hohe Schwankungsbreiten waren aus den Strukturdaten der zugehörigen Bezugsfläche, insbesondere bei starker Merkmalsuntergliederung, nicht zu erklären.

Das Fehlermaß, das die Abweichung zwischen allen errechneten und tatsächlichen Matrixelementen umfaßt (s. o.), errechnet sich für die Gesamtheit der Pendler (Matrix 22) zu $S(\alpha) = 55\%$ (Tab. 1, Sp. 7). Die Tatsache, daß diese Anpassungsgüte sich für die Mehrzahl der Untergliederungen der Pendler nach Schichten nicht verbessert,

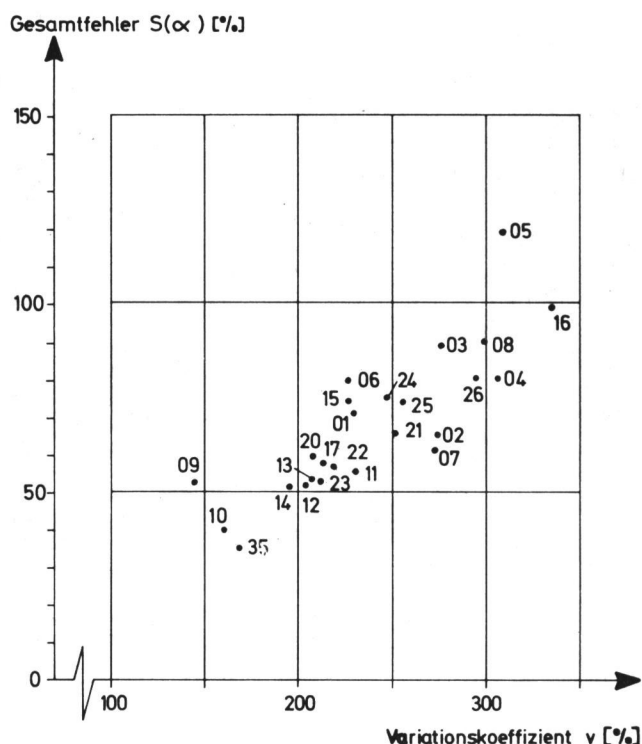


Abb. 5: Variationskoeffizienten für tatsächliche und Gesamtfehler für errechnete Pendlerströme

gründet sich offensichtlich auf die mit der Untergliederung wachsende Streuung der Matrixelemente (Abb. 5).

Niedrige Variationskoeffizienten kennzeichnen die geringen „Ungleichgewichte“ zwischen Wohn- und Arbeitsplätzen für Pendler, die öffentliche Verkehrsmittel benutzen (M 09 und M 10); sie legen längere Berufswege zurück als Pendler anderer Schichten (vgl. Abb. 3). Damit vermindern sich die Pendlerströme V_{ik} im Bereich der Diagonalen (Binnenpendler und Pendler zwischen Nachbargebieten). Weil diese Elemente V_{ik} zumeist die stärksten Pendlerströme bilden, vermindert sich der Haupteinfluß auf die das Ungleichgewicht ausdrückenden Streuungsmaße.

Fehlerangaben als Gütemaßstab zu Verkehrs- und Verteilungsmodellen sind in der Literatur selten zu finden. Sill/Seitz geben in [2], Anlage 55, Fehler zwischen 100 und 200% an, die sich nur bei Ausschluß der $V_{ik} \leq 10$ vermindern. Zudem sind in den Rechnungen zu [2] die Binnenpendler nicht enthalten.

Modell-Anwendung

Zur rechnerischen Ermittlung künftiger Berufsverkehrsbeziehungen sind außer den prognostizierten Erwerbstätigen- und Beschäftigtenzahlen je Gebiet (hier zunächst ohne sozioökonomische Untergliederung) folgende Daten als Input vorzugeben:

(1) Die Zonen-Matrix der Parameter α

Hierbei muß vorläufig die zeitliche Konstanz der Werte des Analyse-Jahres unterstellt werden (mit Untersuchungen

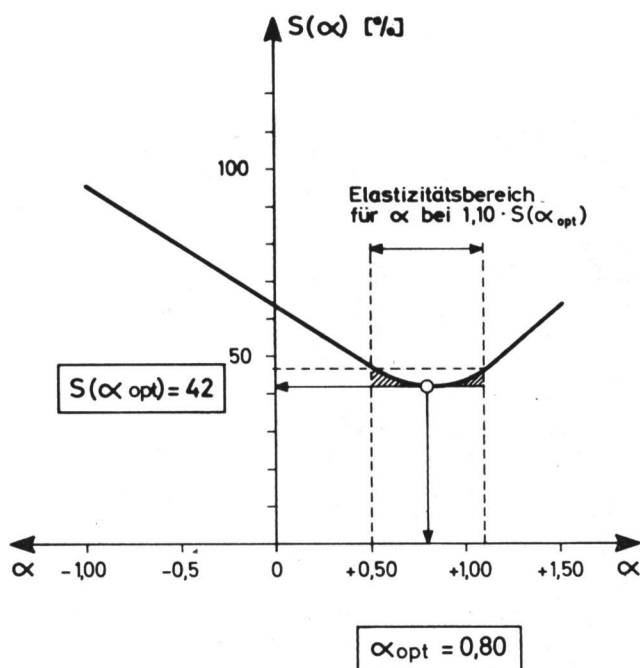


Abb. 6: Zusammenhang zwischen Parameter α und Gesamtfehler $S(\alpha)$

über eventuelle Entwicklungstrends wird z. Z. begonnen). Sensibilitätsprüfungen ergeben, daß die aus Abb. 6 erkennbare „Elastizität“ des α -Wertes charakteristisch ist für die Mehrzahl der Zonenteile. Damit entschärft sich das Parameter-Problem erheblich: eine Veränderung des α -Wertes um $\pm 40\%$ erhöht den Gesamtfehler um nur 10% .

(2) Die Zonenanteile z

Zur Bestimmung der Konstanten $C_{\nu\mu}$ werden die relativen Pendlerbeziehungen (Bezugswert P) zwischen den Zonen benötigt. Die Randspalten dieser Zonenanteilmatrix sind praktisch durch die prognostizierten Erwerbstätigen E_i und Beschäftigten B_k je Gebiet i bzw. k gegeben; sie sind in Anlehnung an die Analyse-Matrix auf Zeilen und Spalten aufzuteilen. Mit dem Ziel der Verkehrsminimierung können dabei bereits bestimmte alternative Planungsziele verfolgt werden.

Für die künftige Verteilung der Erwerbstätigen E_i und Beschäftigten B_k in einem Untersuchungsraum sind z. B. folgende Alternativen denkbar: Verdichtung von Wohn- und Arbeitsstätten in der City (Variante 1), ringförmige Verdichtung abwechselnd für Wohn- und Arbeitsstätten (2), proportionale Zunahme, d. h. Anstreben von Funktionsmischungen (3).

In einem ersten Schritt wurden solche Varianten mit Prognose-Daten durchgespielt, wie sie von der Flächennutzungsplanung üblicherweise aufgestellt werden. Das Gesamtbild der Entfernungsverteilungen zeigte kaum erkennbare Unterschiede für die drei Varianten, jedoch ergaben sich insgesamt Zunahmen der Entfernungen gegenüber dem Analyse-Fall (Matrix 22 in Abb. 3). Diese Siedlungskonzeptionen verursachen längere Wege zwischen

Wohn- und Arbeitsstätten, sie vergrößern die Zentralwerte von $\tilde{l} = 3,0$ auf $\tilde{l} = 4,3$ Kilometer.

Die kaum erkennbaren Unterschiede gaben Anlaß, in einem zweiten Schritt für die Fälle (1) bis (3) Simulations-Daten zu verwenden, denen zwar willkürliche „Umräumungen“, jedoch innerhalb nicht unrealistischer Spannweiten, zugrunde liegen. Die Auswirkungen der mit diesen Daten angesteuerten Ziele zeigen sich in den Abnahmen der Wegverteilungen. Im Falle der Funktionsmischung (3) reduzieren sich die Arbeitswege auf $\tilde{l} = 2,0$ km, selbst der ungünstigste Fall der Funktionstrennung (2) liefert einen Wert $\tilde{l} = 3,0$ km, der dem Analyse-Fall entspricht.

Zusammenfassung

Die hier vorgestellte Untersuchung bildet eine erste Phase, in der versucht wurde, zunächst schichtenspezifisches Pendlerverhalten nach Maß und Zahl und die Relevanz von Schichteneinteilungen zu bestimmen. Danach erfolgte die Modell-Formulierung für den Zusammenhang zwischen dem Pendlerverhalten und dessen Einflußgrößen für jede einzelne Schicht.

Wenn auch Verteilungsdiagramme der Arbeitswege und der durchschnittliche Entfernungsaufwand noch unvollkommene Meßinstrumente für eine Beurteilung der „Güte einer Siedlungsstruktur“ darstellen, so läßt sich mit ihnen doch die anzustrebende Richtung einer Siedlungsplanung erkennen. Das Modell erlaubt, mit Hilfe von alternativen Strukturdaten (E und B) solche Siedlungskonzepte herauszufinden, welche die Nachfrage nach Verkehrsleistungen im Berufsverkehr minimieren.

Literatur

- [1] Die methodischen Grundlagen der Volks- und Berufszählung 1961. Hrsg.: Statistisches Bundesamt Wiesbaden. – Stuttgart 1967. = Fachserie A: Bevölkerung und Kultur, Volks- und Berufszählung vom 6. 6. 1961, H. 1.
- [2] Sill, Otto; Paul Seitz: Stadtstruktur und Verkehr. Forschungsarbeit der Deutschen Akademie für Städtebau und Landesplanung. Hrsg. vom Bundesministerium für Wohnungswesen und Städtebau. – Bad Godesberg 1966.
- [3] Mücke, Paul. A.: Das Prognoseverfahren in der Straßenverkehrsplanung. – Wiesbaden 1964.
- [4] Ruske, Wilfried: Stochastische und deterministische Modelle zur Errechnung des Verkehrsaufkommens aus Strukturgrößen. Diss. T. H. Aachen. – (Aachen 1968).