

## Ein Straßenverkehrsnachfragemodell für die Bundesrepublik Deutschland\*

VON GERTRAUD FOOS, KARLSRUHE, UND MARC GAUDRY, MONTREAL

### 1. Einleitung

Das Automobil als privates Transportmittel hat in der Bundesrepublik Deutschland seit den fünfziger Jahren steigende Bedeutung erlangt, obwohl das zunehmende Verkehrsaufkommen immer neue Probleme verursachte. Hohe Unfallzahlen, wachsende Umweltprobleme sowie zwei Energiekrisen, die die gesamte Weltwirtschaft schweren Belastungen ausgesetzt hatten, führten dazu, daß immer häufiger über Maßnahmen diskutiert wurde, die helfen sollen, die negativen Folgen der Automobilmutzung zu mildern.

Dabei darf jedoch nicht vergessen werden, daß das Automobil für eine moderne Volkswirtschaft ein unentbehrliches Transportmittel ist und die gesamtwirtschaftliche Entwicklung ganz entscheidend von der Entwicklung der Automobilindustrie und der mit ihr verflochtenen Wirtschaftsbereiche abhängt. Wenn durch staatliche Eingriffe mit dem Ziel, die negativen Effekte des Straßenverkehrs zu verringern (z. B. durch Vorschriften über die Abgasreinigung oder durch Geschwindigkeitsbeschränkungen) die Attraktivität des privaten Automobils sinken sollte, ist auch mit Auswirkungen auf die Konjunkturlage zu rechnen.

Bevor regulierend in das Verkehrsgeschehen eingegriffen wird, sollten daher Anhaltspunkte darüber vorhanden sein, welche direkten und indirekten Auswirkungen auf den Pkw-Besitz und die Pkw-Nutzung zu erwarten sind, d. h. es müssen Kenntnisse darüber vorliegen, welche Faktoren die Verkehrsnachfrage beeinflussen und wie groß die Bedeutung einzelner Faktoren ist. Auch für die Planung von Verkehrsinfrastrukturinvesti-

#### *Anschriften der Verfasser:*

Dr. Gertraud Foos  
Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung  
Universität Karlsruhe  
Postfach 6380  
7500 Karlsruhe

Prof. Dr. Gaudry  
Département de sciences économiques et Centre  
de recherche sur les transports  
Université de Montréal  
B.P. 6128  
Montréal, Canada H3C 3J7

\*) Die Arbeiten zu dieser Studie wurden teilweise durch das F.C.A.R.-Programm des Erziehungsministeriums in Quebec, Kanada, dem S.S.H.R.C. und dem N.S.E.R.C. von Kanada und der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt. Ein Teil des Beitrags von Marc Gaudry entstand während seines Aufenthalts als Humboldt-Stipendiat im Jahr 1985 an der Universität Karlsruhe. Die Autoren danken Ulrich Blum für viele nützliche Anregungen und Reiner Koblo für die Durchführung der Programmierarbeiten.

tionen ist es notwendig, die zukünftige Verkehrsnachfrage unter Einbeziehung möglicher Veränderungen ihrer Einflußfaktoren (Benzinpreise, Qualität des ÖPNV, Aktivitätsniveaus usw.) abschätzen zu können.

Ziel dieser Untersuchung ist es, mit Hilfe eines ökonomischen Modells eine Nachfragefunktion für Pkw-Fahrten zu formulieren, die es erlaubt, die wesentlichen Bestimmungsfaktoren der Verkehrsnachfrage zu erkennen und die Stärke ihres Einflusses zu quantifizieren. Auf der Grundlage dieser Nachfragefunktion wird es möglich, die Auswirkungen geplanter Maßnahmen oder zukünftiger Ereignisse auf die Nachfrage im Individualverkehr zu ermitteln.

Dabei wird ein ökonomisches Modell angewendet, in dem die funktionale Form der Verhaltensfunktion durch die Daten bestimmt wird und das die Informationen, die in der stochastischen Komponente enthalten sind, auswertet. Durch diesen flexiblen Ansatz werden Ergebnisse erzielt, die überzeugender sind als diejenigen, die mit Spezifikationen erzielt werden, denen a priori eine große Zahl von Beschränkungen auferlegt sind.

Die Verkehrsnachfrage wird üblicherweise mit Hilfe der Indikatoren Verkehrsaufkommen (beförderte Personen), Verkehrsleistung (Personenkilometer) und Fahrzeugfahrleistungen (Fahrzeugkilometer) beschrieben. Da die Daten für diese Größen vom Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) auf der Grundlage des Kraftstoffverbrauchs jährlich geschätzt werden und damit Sekundärdaten darstellen, wird der Benzinverbrauch (Normal- und Superbenzin) als Ersatzgröße für die Pkw-Fahrleistungen verwendet. Die Untersuchung umfaßt den Zeitraum von Januar 1968 bis Dezember 1983 und basiert auf aggregierten Daten, die sich auf die Bundesrepublik Deutschland beziehen.

### 2. Das Modell

#### 2.1 Das ökonomische Modell

Der gesamte Benzinverbrauch in einer gegebenen Region in einem gegebenen Zeitraum wird bestimmt durch

- die Zahl der Kraftfahrzeuge mit Benzinmotor (KFZB),
- den technisch determinierten spezifischen Energieverbrauch dieser Fahrzeuge (SEV),
- den durch die Wetter-, Verkehrs- und Betriebsbedingungen und das Fahrverhalten, insbesondere die dabei realisierten Fahrgeschwindigkeiten (G) determinierten Energieverbrauch,
- die Fahrleistungen (FL).

Jede dieser Größen wird ihrerseits durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst. Unter der Annahme, daß der Kraftfahrzeugbestand und der spezifische Energieverbrauch kurzfristig gegeben sind, lautet das Gleichungssystem für das Nachfragemodell:

$$KFZB = \overline{KFZB} \quad (1)$$

$$SEV = \overline{SEV} \quad (2)$$

$$G = f_1 \cdot (\overline{SEV}, FL, X^G) \quad (3)$$

$$FL = f_2 \cdot (\overline{KFZB}, \overline{SEV}, G, X^{FL}) \quad (4)$$

mit

- KFZB: Kraftfahrzeuge mit Benzinmotor  
 SEV: spezifischer Energieverbrauch  
 G: Geschwindigkeit  
 FL: Fahrleistungen  
 X<sup>G</sup>: Faktoren, die die Geschwindigkeit beeinflussen  
 X<sup>FL</sup>: Faktoren, die die Fahrleistungen beeinflussen.

Da die Geschwindigkeit nicht beobachtet werden kann, lautet die reduzierte Form der Nachfragegleichung:

$$BV = f_1 \cdot f_2 (\overline{KFZB}, \overline{SEV}, X^G, X^{FL}) \quad (5)$$

mit

BV: Benzinverbrauch.

Die allgemeine Nachfragefunktion des Benzinverbrauchs enthält somit neben den Bestimmungsgrößen der Fahrleistungen  $X^{FL}$  auch die Bestimmungsgrößen der Fahrgeschwindigkeit  $X^G$ . Diese werden sieben Variablengruppen zugeordnet:

- (1) Preise (P),
- (2) Kraftfahrzeuge (K),
- (3) Infrastruktur (I),
- (4) Wetter (W),
- (5) Einkommen (Y),
- (6) Aktivitäten (A),
- (7) Et cetera (ET).

Damit lautet die ökonomische Formulierung des Modells:

$$BV = f(P, K, I, W, Y, A, ET) \quad (6)$$

Diese Spezifikation wird als Niveaumodell bezeichnet<sup>1)</sup> und beschreibt ein Nachfragemodell, das in die Gruppe der direkten Nachfragemodelle eingeordnet werden kann, auch wenn es sich auf ein Land als Ganzes bezieht und nicht auf bestimmte Quell-Ziel-Beziehungen.<sup>2)</sup>

Diese Spezifikation des Nachfragemodells unterscheidet sich von den häufig in mikroökonomischen Untersuchungen für ein Konsumgut angewandten Spezifikation dadurch,

1) Es wurde auch die Spezifikation

$$BV = f \left( P, \frac{K}{A_a}, I, W, \frac{Y}{A_a}, \frac{A_1}{A_a}, \frac{A_2}{A_a}, \dots, \frac{A_{a-1}}{A_a}, A_a, ET \right),$$

mit

$A_i$ : Aktivitätsvariable,  $i = 1, \dots, a$   
 die als Pro-Erwerbstätigen-Spezifikation bezeichnet wird (weil für  $A_a$  die Variable Erwerbstätige eingesetzt wird), getestet. Die Ergebnisse der Niveau-Spezifikation waren jedoch statistisch besser und ökonomisch plausibler; vgl. Foos, G., Die Determination der Verkehrsnachfrage – Eine ökonomische Analyse (= Karlsruher Beiträge zur Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung, Heft 12), Karlsruhe 1986.

2) Vgl. Ruiter, E. R., Analytical Structures. Report, in: Brand, D., Manheim, M. L., (Ed.), Urban Travel Demand Forecasting (« Highway Research Board, Special Report 143), Washington D. C. 1973.

daß über Preise und Einkommen hinaus weitere Variablengruppen berücksichtigt werden. Diese Variablengruppen erfüllen ganz bestimmte Funktionen:

Die Gruppe Kraftfahrzeuge spiegelt vor allem den Einfluß der Pkw-Verfügbarkeit bei gegebenem Aktivitätsniveau auf den modal split wider. Die Kategorien Infrastruktur und Wetter sollen die Qualität der Verkehrsnetze (Bequemlichkeit, Bedienungshäufigkeit, Geschwindigkeit) erfassen. Da die Nachfrage nach Benzin eine abgeleitete Nachfrage ist, wird die Variablengruppe Aktivitäten berücksichtigt, die Informationen über die Endnachfrageaktivitäten sowie die Aktivitäten im Produktionsbereich, die Pkw-Fahrten induzieren, enthält. Die Gruppe Et cetera umfaßt z. B. solche Größen, mit deren Hilfe der Tatsache Rechnung getragen wird, daß die Monate eine unterschiedliche Anzahl von Arbeitstagen, Samstagen, Sonn- und Feiertagen besitzen.

## 2.2 Das ökonometrische Modell

Das ökonometrische Modell besteht aus zwei Teilen: Der erste Teil beschreibt die Beziehung zwischen der abhängigen und den unabhängigen Variablen und wird im folgenden als systematischer Teil bezeichnet. Den zweiten Teil bildet das Fehlermodell, das die stochastische Komponente des Modells repräsentiert.

Der systematische Teil lautet für jede Beobachtung  $t$ :

$$y_t^{(\lambda_y)} = \sum_{k=1}^K \beta_k X_{kt}^{(\lambda_{xk})} + u_t, \quad (7)$$

mit  $t = 1, \dots, N$ .

Die Indices  $(\lambda_y)$  und  $(\lambda_{xk})$  zeigen an, daß die Variablen nach Box und Cox (1964) transformiert wurden. Die BOX-COX-Transformation einer Variablen  $q$  (wenn alle  $q_t > 0$ ) ist definiert als

$$q^{(\lambda_q)} = \begin{cases} \frac{q^{\lambda_q} - 1}{\lambda_q} & , \lambda_q \neq 0 \\ \ln q & , \lambda_q = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Variable sind nicht transformierbar nach Box und Cox, wenn sie negative Beobachtungen enthalten oder Beobachtungen, die gleich Null sind.

Mit der Bestimmung der Transformationsvariablen  $(\lambda_y)$  und  $(\lambda_{xk})$ , die gleichzeitig mit der Schätzung der Koeffizienten erfolgt, wird erreicht, daß die Daten die optimale funktionale Form des Modells bestimmen. Wird für alle transformierbaren unabhängigen Variablen ein einheitliches  $\lambda_x$  geschätzt, erhält man die lineare Funktion (für  $\lambda_y = \lambda_x = 1$ ) und die log-lineare Funktion (für  $\lambda_y = \lambda_x = 0$ ) als Spezialfälle der BOX-COX-Transformation.

Das Fehlermodell lautet nach Gaudry/Dagenais<sup>3)</sup>

– für die Untersuchung der Residuen auf Heteroskedastizität:

3) Gaudry, M. J. L., Dagenais, M. G., Heteroscedasticity and the Use of Box-Cox-Transformations, in: Economic Letters 2, 3, S. 225 – 229.

$$u_t = \exp \left( \left( \delta_0 + \sum_{m=1}^M \delta_m Z_{mt}^{\lambda_{2m}} \right)^{1/2} \right) v_t \quad (9)$$

– und für die Untersuchung der Residuen auf Autokorrelation:

$$v_t = \sum_{l=1}^r p_l v_{t-l} + w_t \quad (10)$$

In (9) werden unter der Annahme, daß der zugrundeliegende stochastische Prozeß heteroskedastisch ist, die Variablen  $Z_m$  eingeführt, durch deren Berücksichtigung im Fehlermodell der Schätzfunktion die Homoskedastizitätshypothese aufrechterhalten werden kann. Die  $Z_m$  können auch solche Variable sein, die im systematischen Teil nicht enthalten sind.

Mit der Anwendung dieses Fehlermodells werden zwei Ziele verfolgt:

(a) Es soll sichergestellt werden, daß die Varianz der Restschwankungen (Residuen) über den untersuchten Zeitraum hinweg konstant ist. Die BOX-COX-Transformation beeinflußt die Varianz der Residuen insbesondere dann, wenn sie auf die abhängige Variable angewandt wird. Um Restschwankungen zu erhalten, deren Varianz konstant ist, benötigt man ein Modell, das es erlaubt, auch die Heteroskedastizität zu überprüfen, wobei die Form des Modells nicht mit der Varianz der Residuen vermischt wird. Die Funktion (9) stellt eine allgemeine Formulierung für die Heteroskedastizität dar und enthält die in der Literatur benutzten Funktionen als Spezialfälle, insbesondere auch den Spezialfall der klassischen Heteroskedastizität: Wenn alle  $\lambda_{2m}$  und alle  $\delta_m = 0$  außer einem  $\delta$ , das gleich 2 ist, erhält man  $u_t = (\delta \cdot Z_{mt}^2)^{1/2}$ .

(b) Es soll sichergestellt werden, daß die Restschwankungen zeitlich voneinander unabhängig sind. Dies wird durch ein autoregressives Verfahren höherer Ordnung erreicht. Die nach dem  $r$ -ten autoregressiven Prozeß sich ergebenden Residuen  $w_t$  haben folgende Eigenschaften:

- sie sind unkorreliert,
- ihr Erwartungswert ist gleich Null,
- sie haben eine konstante Varianz.

Für die Schätzung von (7), (9) und (10) wird der von Liem *et al.*<sup>4)</sup> entwickelte L-1.1-Algorithmus angewendet. Ein wesentlicher Punkt ist, daß alle Parameter des Gleichungssystems gleichzeitig geschätzt werden, um ein „weißes Rauschen“ der Residuen zu erhalten. Der L-1.1-Algorithmus basiert auf der Annahme, daß der Fehler  $w_t$  normalverteilt ist.

Die beiden Elemente (7) sowie (9) und (10) verkörpern zwei Richtungen der Modellbildung. Die Befürworter der ersten Richtung formulieren ein Regressionsmodell und vernachlässigen dabei weitgehend die Analyse der stochastischen Komponente oder nehmen an, daß die Varianz der Residuen konstant sei und keine Autokorrelation auftrete. Sie schätzen dann ein lineares und ein log-lineares Modell und benutzen das „bes-

4) Liem, T. C., Dagenais, M. G., Gaudry, M. J. I., L-1.1: A Program for Box-Cox-Transformations in Regression Models with Heteroscedastic and Autoregressive Residuals (= Département de sciences économiques et Centre de recherche en développement économique – Cahier 8314), Université de Montréal, 1983.

sere“. In den Untersuchungen, die der zweiten Richtung zuzuordnen sind, interessiert man sich nicht für die erklärenden Variablen, sondern versucht, nur die abhängige Variable durch ihre eigenen verzögerten Werte und die verzögerten Werte des Fehlers  $u_t$  wiederzugeben. Diese Vorgehensweise wird als BOX-JENKINS-Analyse bezeichnet. Sie wird im L-1.1-Algorithmus benutzt, um die Autokorrelations-Struktur zu identifizieren.

Während die Modelle der ersten Richtung die Informationen, die in der Fehlerkomponente  $u_t$  enthalten sind, nicht berücksichtigen, können die Modelle der zweiten Richtung die Vergangenheitsentwicklung sehr gut nachvollziehen, sind aber nicht in der Lage, die Auswirkungen zukünftiger Ereignisse auf die abhängige Variable abzuschätzen.

Im L-1.1-Programm wird versucht, die Vorteile der nicht-linearen Regressionsanalyse mit denen der BOX-JENKINS-Analyse zu verbinden, um möglichst viel von den Informationen, die in der Fehlerkomponente enthalten sind, zu verwerten.

### 2.3 Abgrenzung zu anderen Straßenverkehrsnachfragemodellen

Es sollen hier nur die fünf für das Untersuchungsgebiet Bundesrepublik Deutschland bekannten relevanten Studien<sup>5)</sup> für Vergleiche herangezogen werden.

Die zahlreichen im Ausland durchgeführten Untersuchungen und ihre Ergebnisse sollen hier ausgeklammert bleiben.<sup>6)</sup> Das hier vorgestellte Modell unterscheidet sich von bisherigen Ansätzen vor allem in drei Punkten:

– Länge der Zeitperioden:

Lebbert, Kriegsmann und Fotiadis *et al.* verwenden Jahresdaten, Flemig faßt saisonbereinigte Monatsdaten zu Quartalsdaten zusammen, und Teichmann führt seine Analyse mit saisonbereinigten Monatsdaten durch.

In dieser Untersuchung werden Monatsdaten verwendet, weil die monatlichen Schwankungen des Benzinverbrauchs nicht zufällig sind, sondern innerhalb der Jahre eigene strukturelle Besonderheiten aufweisen. Die ausgeprägten kurzfristigen Schwankungen des Benzinverbrauchs werden von den Wetterbedingungen und ökonomischen Einflüssen verursacht, die sich ihrerseits von Monat zu Monat ändern.

Eine Analyse mit Monatsdaten ist auch aus statistischen Gesichtspunkten sinnvoll, weil die Zahl der Beobachtungen und damit die Zahl der Freiheitsgrade größer wird,

5) Lebbert, B., Untersuchung der kurz- und langfristigen Elastizitäten der Energienachfrage in bezug auf die Energiepreise in der Bundesrepublik Deutschland (= Kieler Arbeitspapiere Nr. 59), Kiel 1977; Flemig, G., Der Einfluß der Preise auf Einfuhr und Verbrauch von Mineralöl. Eine empirische Untersuchung für die Bundesrepublik Deutschland, Kiel 1979; Kriegsmann, K.-P., Energieverteilung und sektoraler Strukturwandel als Determination des Energieverbrauchs, in: Die Weltwirtschaft, Heft 1/1980, S. 100 – 120; Fotiadis, F., Hutzel, J. W., Wied-Nebbeling, S., Fronia, J., Konsum und Investitionsverhalten in der Bundesrepublik Deutschland seit den fünfziger Jahren, Band 1, Bestimmungsgründe des Konsumverhaltens. Eine theoretische und empirische Analyse konjunktureller und struktureller Aspekte (= Schriftenreihe des Ifo-Instituts für Wirtschaftsforschung, Nr. 105), Berlin 1980; Teichmann, U., Messung der Beeinflussbarkeit des Individualverkehrs in den Städten mit Hilfe von Preis- und Einkommenselastizitäten, Diss. Köln 1982.

6) Weitere Literatur zu Zeitreihen- und Querschnittsanalysen sowie eine zusammenfassende Darstellung in- und ausländischer Zeitreihenstudien finden sich bei Foos, G., Die Determinanten . . . , a.a.O.

sodaß ein statistisch besser gesichertes Ergebnis erzielt wird. Allerdings müssen dann auch jahreszeitliche Einflüsse durch zusätzliche Variablen berücksichtigt werden. Die Verwendung von saisonbereinigten Monatsdaten wie bei *Teichmann* und *Flemig* ist jedoch nicht geeignet, denn dabei gehen wichtige Informationen über die Bestimmungsgründe des Benzinverbrauchs verloren, insbesondere dann, wenn die Methode der Saisonbereinigung nicht offengelegt wird.

#### – Ökonomisches Modell:

In den fünf Arbeiten besteht Übereinstimmung darüber, daß der reale Benzinpreis und das reale Einkommen die wichtigsten Einflußgrößen des Benzinverbrauchs sind.<sup>7)</sup> *Lehbert* bezieht die Gradtagszahlen ein, um Wettereinflüsse zu berücksichtigen, diese erweisen sich jedoch als nicht signifikant. *Fotiadis et al.* ermitteln in Variante A als dritte signifikante unabhängige Variable die Veränderung der Ausgaben für Kraftfahrzeuge.

Die Modelle von *Lehbert* und *Fotiadis et al.* enthalten zusätzlich die um eine Periode verzögerte abhängige Variable, deren Regressionskoeffizient für die Berechnung von sogenannten langfristigen Elastizitäten verwendet wird. Die vorliegende Untersuchung konzentriert sich auf die Ermittlung kurzfristiger Elastizitäten, denn die richtige Messung langfristiger Elastizitäten erfordert neben der Einbeziehung einer verzögerten endogenen Variablen die Berücksichtigung von Änderungen in der Anzahl der Kraftfahrzeuge und ihrer Energieverbrauchswerte. Dies erfordert die Formulierung zusätzlicher Funktionen, um den Pkw-Bestand und den spezifischen Energieverbrauch zu erklären.

Die verzögerte Endogene enthält in einem Modell mit nur zwei exogenen Variablen zu einem großen Teil Einflüsse anderer Bestimmungsgrößen, die im Modell nicht berücksichtigt sind. Durch die Einbeziehung weiterer Variablen<sup>8)</sup> lassen sich bisher verborgene Zusammenhänge zwischen dem Benzinverbrauch und seinen Determinanten aufdecken.

#### – Ökonometrisches Modell:

In den fünf Untersuchungen wird die funktionale Form a priori festgelegt, in dieser Arbeit wird die funktionale Form durch die Daten bestimmt. *Lehbert*, *Flemig* und *Fotiadis et al.* benutzten lineare, *Kriegsmann* und *Teichmann* log-lineare Schätzgleichungen.

Die Restschwankungen werden mit Ausnahme von *Kriegsmann* immer mit Hilfe des Durbin-Watson-Tests auf Autokorrelationen 1. Ordnung untersucht. *Flemig* und *Teichmann* ermitteln dabei DW-Werte, die auf das Vorliegen autokorrelierter Restschwankungen hindeuten. Bei *Lehbert* und *Fotiadis et al.*, deren Modelle die verzögerte endogene Variable enthalten, ist der Durbin-Watson-Test nur beschränkt aussagefähig, so daß zusätzliche Autokorrelationsüberprüfungen notwendig sind, die bei *Fotiadis et al.* auch durchgeführt werden, nicht jedoch bei *Lehbert*.

Während demnach für diese fünf sehr einfachen Nachfragemodelle nicht davon ausgegangen werden kann, daß die Restschwankungen die Forderung der Unkorreliert-

7) *Teichmann* benutzt alternativ reale und nominale Geldgrößen.

8) und durch eine geeignete Untersuchung der Fehlerkomponente

heit und der konstanten Varianz erfüllen, können mit Hilfe des hier vorgestellten Modells Residuen  $w_t$  erzielt werden, die annähernd ein „weißes Rauschen“ darstellen.

### 3. Die ökonometrische Analyse

#### 3.1 Fragestellungen

Den Ausgangspunkt der ökonometrischen Analyse bildet eine Variablenliste, die sich aus den sieben Gruppen mit insgesamt 24 unabhängigen Variablen (einschl. der Konstanten) zusammensetzt. Auf der Grundlage dieser Liste werden die folgenden Fragestellungen untersucht:

- Kann durch die Verwendung flexibler Funktionsformen ein besseres Schätzergebnis erzielt werden als mit einer linearen oder log-linearen Funktion?
- Kann unter der Annahme autokorrelierter und/oder heteroskedastischer Restschwankungen  $u_t$  das Schätzergebnis durch ein angemessenes Fehlermodell verbessert werden?
- Sind die Ergebnisse für die einzelnen Variablen stabil im Hinblick auf Veränderungen der funktionalen Form und/oder des Fehlermodells?

Um diese Fragen zu untersuchen, werden neun Nachfragemodelle formuliert. Zunächst wird ein lineares und ein log-lineares Modell unter der Annahme, daß die Restschwankungen unkorreliert sind und eine konstante Varianz besitzen, geschätzt (Gleichung 1 und Gleichung 2). Danach wird mit jeder weiteren Gleichung mindestens eine Beschränkung aufgehoben, d. h. ein zusätzlich zu schätzender Parameter eingeführt. Das Modell wird dadurch immer allgemeiner und enthält die vorangehenden Modelle als Spezialfälle.

Die Annahmen über die zu schätzenden Transformationsparameter sowie über die Struktur des stochastischen Prozesses, die den neun Schätzgleichungen zugrundegelegt werden, sind Tabelle 1 zu entnehmen.

#### 3.2 Tabellarische Darstellungsform

Die Schätzergebnisse sind in der folgenden Tabelle 2 enthalten. Im ersten Teil der Tabelle finden sich für jede Variable folgende Angaben:

##### (a) Elastizitätskoeffizienten:

Da die Elastizitätsberechnung bei Variablen, die den Wert 0 annehmen können (Quasi-Dummy-Variable) und bei Variablen, die entweder den Wert 1 oder den Wert 0 besitzen (Dummy-Variable), modifiziert werden muß, gilt:

- Wenn der Codename der Variablen nicht unterstrichen ist, wie z. B. beim realen Benzinpreis (RBPNs), wird die Elastizität auf der Basis des Mittelwertes von  $X_k$  und des Erwartungswertes von  $y$ ,  $E(y)$ , berechnet.
- Wenn der Codename der Variablen einmal unterstrichen ist, z. B. beim Sonntagsfahrverbot SFV73 (Quasi-Dummy-Variable), wird die Elastizität auf der Basis des Mittelwertes von  $y$  und des Mittelwertes der positiven  $X_k$  berechnet.
- Wenn der Codename der Variablen zweimal unterstrichen ist, z. B. bei der niedrigen Höchstgeschwindigkeit 1973 – 1974, NHG7374, ist die Elastizität als

Tabelle 1: Modellspezifikationen

Gleichung Nr.	systematischer Teil		Fehlermodell			
	Kurzbezeichnung	zu schätzende Parameter	Kurzbezeichnung	zu schätzende Parameter	Residuen $u_t$ sind unkorreliert	Residuen $w_t$ sind unkorreliert
1	LINEAR	$\beta_k$	-	keine	ja	ja
2	LOG-LINEAR	$\beta_k$	-	keine	ja	ja
3	BC(1)	$\beta_k, \lambda_y = \lambda_x$	-	keine	ja	ja
4	BC(2)	$\beta_k, \lambda_y, \lambda_x$	-	keine	ja	ja
5	BC(2)	$\beta_k, \lambda_y, \lambda_x$	AUTO (1,12)	$\rho_1, \rho_{12}$	nein	ja
6	BC(2)	$\beta_k, \lambda_y, \lambda_x$	AUTO (1,12) +HG	$\rho_1, \rho_{12}, \delta, \lambda_z$	nein	nein
7	BC(3)	$\beta_k, \lambda_y, \lambda_{x1}, \lambda_{x2}$	AUTO (1,12)	$\rho_1, \rho_{12}$	nein	ja
8	BC(4)	$\beta_k, \lambda_y, \lambda_{x1}, \lambda_{x2}, \lambda_{x3}$	AUTO (1,12)	$\rho_1, \rho_{12}$	nein	ja
9	BC(5)	$\beta_k, \lambda_y, \lambda_{x1}, \lambda_{x2}, \lambda_{x3}, \lambda_{x4}$	AUTO (1,12)	$\rho_1, \rho_{12}$	nein	ja

Einfluß der Variablen im Durchschnitt, wenn der Einfluß gegeben ist, auf die abhängige Variable im Durchschnitt definiert. Das bedeutet, daß in diesem Fall die Elastizität den Einfluß der prozentualen Veränderung der abhängigen Variablen aufgrund der Einbeziehung der Dummy-Variablen ausdrückt.

## (b) T-Statistiken:

Unter den geschätzten Elastizitätswerten werden die T-Werte der zugrundeliegenden Regressionskoeffizienten in Klammern angegeben. Sie werden unter der Bedingung, daß die Transformationsparameter ihre optimalen Werte annehmen, berechnet und daher hier als *bedingte T-Werte* bezeichnet. Die Ursache liegt darin, daß nicht-bedingte T-Werte dieser Regressionskoeffizienten nicht invariant gegenüber den Maßeinheiten der  $X_k$  bei Anwendung von BOX-COX-Transformationen sind.<sup>9)</sup>

## (c) Transformationen:

In der dritten Zeile, unterhalb der T-Statistik, ist die Variablengruppe, in der die transformierte Variable erscheint, angegeben. Dabei bedeutet

- keine Angabe, daß die Variable nicht transformierbar ist oder nicht transformiert wurde,
- die Angabe FL1, daß das  $\lambda$ , das zu dieser Variablen gehört, einen bestimmten Wert besitzt wie alle Variablen der Gruppe 1, in der diese Variable erscheint; die festgelegten Werte sind im unteren Teil der Ergebnistabelle angegeben.

Im zweiten Teil der Tabelle 2 sind folgende Informationen über die Funktionen enthalten:

## (a) Autokorrelation:

Die Struktur der Autokorrelation ist in Form der geschätzten Autoregressionskoeffizienten  $\rho_1$  und deren Werten für die T-Statistik angegeben.

## (b) BOX-COX-Transformationen:

Es werden die Werte für die Transformationsparameter (FLY und FL1 – FLk) angegeben, und zwar in den ersten beiden Spalten die Werte 1 bzw. 0 für die lineare bzw. die log-lineare Funktion, in den anderen Spalten die optimalen geschätzten Werte.

## (c) Heteroskedastizität:

Die Ergebnisse der Untersuchung auf Heteroskedastizität umfassen den Wert des geschätzten  $\delta$  sowie den zugehörigen T-Wert sowie den Wert des optimalen  $\lambda_z$ .

## (d) Maximalwert der Log-likelihood-Funktion:

Der Log-likelihood-Test stellt einen Vergleich des Wertes des Logarithmus der Wahrscheinlichkeit für ein Modell mit dem eines Modells, bei dem jeweils ein oder mehrere Modellparameter verändert wurden, dar. Die Differenz der beiden Log-likelihood-Werte, multipliziert mit dem Faktor 2, besitzt eine  $\text{CHI}^2$ -Verteilung mit einer Anzahl von Freiheitsgraden, die gleich der Veränderung in der Zahl der auferlegten Beschränkungen ist.

(e) Bestimmtheitsmaß PSEUDO- $R^2$ 

<sup>9)</sup> Vgl. *Burguette, J.-F., Gallant, A. R., Souza, G.*, On Unification of the Asymptotic Theory of Nonlinear Econometric Models, in: *Econometric Review*, Vol. 1, 2 (1982), S. 151 – 190; *Spitzer, J. J.*, Variance Estimates in Models with Box-Cox-Transformation: Implications for Estimation and Hypothesis Testing, in: *The Review of Economics and Statistics*, Vol. 66 (1984), S. 645 – 652.

E L A S T I Z I T Ä T E N										
( T-STÄDTEREGION )										
CODE NP. *	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
ADH. VAR. *	RV	RV	RV	RV	RV	RV	RV	RV	RV	RV
D * PREISE										
REALER BEWEISPREIS NORMAL U. SUPER	RPNS	-0,267	-0,310	-0,295	-0,268	-0,283	-0,281	-0,230	-0,231	-0,229
		( -0,27 )	( -0,32 )	( -0,32 )	( -0,44 )	( -0,15 )	( -0,96 )	( -0,90 )	( -0,10 )	( -0,10 )
		FL1								
REALE PREISE UND TRANSPORTKOSTEN	RPAT	0,237	0,068	0,174	0,236	0,333	0,429	0,419	0,403	0,398
		( 1,26 )	( 0,37 )	( 0,95 )	( 1,20 )	( 1,57 )	( 1,73 )	( 1,81 )	( 1,85 )	( 1,81 )
		FL1								
K * KRAFTFAHRZEUGE										
BESTAND AN NEU MIT BEZUGSZAHL	PKW	0,457	0,239	0,358	0,507	0,113	-0,038	0,186	0,268	0,292
		( 1,34 )	( 0,74 )	( 1,07 )	( 1,43 )	( 0,31 )	( -0,11 )	( 0,52 )	( 2,25 )	( 2,35 )
		FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL2	FL2	FL2
SPEZ. SVSST. VERMO. PKW N. BEZUGSZAHL	SPVVKW	0,423	0,270	0,381	0,433	0,612	0,740	0,678	0,489	0,422
		( 2,24 )	( 1,57 )	( 2,13 )	( 2,12 )	( 2,37 )	( 2,66 )	( 2,49 )	( 2,38 )	( 1,99 )
		FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL2	FL2	FL2
I * INFRASTRUKTUR										
NIEDRIGE HOCHSTOCCSW. 1973-1974	HU7374	-0,080	-0,107	-0,092	-0,091	-0,057	-0,053	-0,063	-0,071	-0,080
		( -2,86 )	( -3,89 )	( -3,35 )	( -3,57 )	( -1,94 )	( -1,61 )	( -2,19 )	( -2,85 )	( -3,19 )
		*****								
NIEDRIGE HOCHSTOCCSW. 1972,5-1974	HU72	-0,030	-0,040	-0,024	-0,024	-0,021	-0,020	-0,022	-0,024	-0,028
		( -1,59 )	( -2,22 )	( -1,87 )	( -1,46 )	( -0,93 )	( -0,86 )	( -0,99 )	( -1,30 )	( -1,52 )
		*****								
SONNTAGSFABRIKATION 1973	SP73	-0,017	-0,017	-0,016	-0,014	-0,026	-0,030	-0,028	-0,020	-0,019
		( -0,38 )	( -0,46 )	( -0,39 )	( -0,39 )	( -1,00 )	( -1,00 )	( -1,00 )	( -0,79 )	( -0,72 )
		*****								
ANTEIL AUTZAHLEN AN DEN STRASSENK.	AKSL	-0,260	0,239	-0,045	-0,494	-0,167	0,182	-0,265	-0,180	-0,224
		( -0,45 )	( 0,44 )	( -0,08 )	( -0,86 )	( -0,31 )	( 0,34 )	( -0,48 )	( -0,31 )	( -0,40 )
		FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL2	FL2	FL4

STRASSENLENGEN	SL	3,350	3,210	3,400	5,070	3,450	1,640	2,800	1,550	1,780
		( 2,31 )	( 1,73 )	( 2,25 )	( 4,42 )	( 1,95 )	( 0,83 )	( 1,49 )	( 0,89 )	( 1,08 )
		FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL2	FL2	FL4
BEDIENUNGSSTAKT IN GEPH	BT	0,067	0,070	0,072	0,157	0,029	-0,012	0,029	0,003	0,023
		( 1,08 )	( 1,11 )	( 1,10 )	( 2,51 )	( 0,38 )	( -0,15 )	( 0,33 )	( 0,05 )	( 0,35 )
		FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL2	FL3	FL4
W * WEITER										
ZU WARM IN FRANKFURT	ZWF	0,007	0,010	0,008	0,007	0,008	0,007	0,008	0,008	0,010
		( 0,82 )	( 1,23 )	( 0,99 )	( 0,84 )	( 0,86 )	( 1,00 )	( 0,84 )	( 0,93 )	( 1,12 )
		*****								
ZU KALT IN FRANKFURT	ZKF	-0,044	-0,042	-0,046	-0,059	-0,043	-0,039	-0,041	-0,044	-0,042
		( -0,21 )	( -0,07 )	( -0,42 )	( -0,26 )	( -0,89 )	( -0,20 )	( -0,61 )	( -0,10 )	( -0,63 )
		*****								
ANTEIL DER REGENTAGE IN FRANKFURT	BFPT	-0,013	-0,009	-0,012	-0,014	-0,013	-0,012	-0,013	-0,014	-0,013
		( -2,00 )	( -1,64 )	( -1,94 )	( -2,48 )	( -2,90 )	( -2,73 )	( -2,92 )	( -2,93 )	( -2,73 )
		FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL2	FL3	FL4
T * EINKOMMEN										
REALES VERP. EINKOMMEN PRO KOPF	RVKPF	-0,039	-0,224	-0,108	0,124	0,247	0,202	0,315	0,221	0,246
		( -0,12 )	( -0,87 )	( -0,33 )	( 0,43 )	( 0,97 )	( 0,79 )	( 1,19 )	( 0,92 )	( 1,09 )
		FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL2	FL2	FL4
A * AKTIVITÄTEN										
ERWERBSSTÄTIGE	E	0,086	0,264	0,188	-0,306	0,468	0,898	0,427	0,517	0,402
		( 0,18 )	( 0,52 )	( 0,37 )	( -0,59 )	( 0,78 )	( 1,51 )	( 0,71 )	( 1,41 )	( 1,12 )
		FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL2	FL2	FL2
REAL. EH. UNTERS. NÄHRUNGSS. U. PEKUL.	REUNB	0,219	0,274	0,237	0,221	0,237	0,233	0,241	0,227	0,242
		( 9,38 )	( 10,45 )	( 9,76 )	( 10,10 )	( 9,00 )	( 7,82 )	( 8,33 )	( 8,51 )	( 8,57 )
		FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL2	FL2	FL2
UBERWACHTUNGEN GESAMT	UMGC	0,016	0,031	0,017	0,000	0,019	0,020	0,020	0,016	0,019
		( 1,03 )	( 1,57 )	( 0,96 )	( 0,02 )	( 1,40 )	( 2,07 )	( 1,43 )	( 1,17 )	( 1,14 )
		FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL2	FL2	FL2
VERKEHR MIT LASTKRAFTFAHRZEUGEN IN T	PKLV	3,292	0,264	0,277	0,260	0,245	0,218	0,246	0,245	0,260
		( 6,74 )	( 5,02 )	( 5,87 )	( 6,75 )	( 6,03 )	( 5,02 )	( 5,80 )	( 5,74 )	( 5,44 )
		FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL1	FL2	FL2	FL4

-----  
 BY = BY CIGMA  
 -----

REALE STEUERANTIZIPATION	RSCA	0.016 ( 0.50)	0.013 ( 0.53)	0.014 ( 0.50)	0.013 ( 0.36)	0.004 ( 0.10)	0.008 ( 0.19)	0.005 ( 0.14)	0.005 ( 0.12)	0.006 ( 0.14)
REALE STEUERANTIZIPATION VERZÜGERT	RSEAV	-0.024 ( -0.55)	-0.020 ( -0.37)	-0.022 ( -0.48)	-0.024 ( -0.51)	-0.024 ( -1.16)	-0.012 ( -0.65)	-0.024 ( -1.13)	-0.024 ( -1.01)	-0.025 ( -1.01)
ARBEITSTAGE	AT	0.340 ( 4.15) FL1	0.234 ( 2.66) FL1	0.306 ( 3.65) FL1	0.365 ( 4.64) FL1	0.371 ( 4.29) FL1	0.348 ( 4.36) FL1	0.370 ( 4.21) FL2	0.379 ( 4.23) FL3	0.332 ( 3.88) FL4
SONN- UND FREITAGE	SF	0.096 ( 1.04) FL1	0.070 ( 2.08) FL1	0.087 ( 3.07) FL1	0.094 ( 4.15) FL1	0.096 ( 3.33) FL1	0.096 ( 3.37) FL1	0.086 ( 3.47) FL2	0.091 ( 3.63) FL3	0.076 ( 3.39) FL4
SAKSTAGE	ST	-0.072 ( -2.72) FL1	-0.076 ( -3.40) FL1	-0.040 ( -2.97) FL1	-0.071 ( -2.75) FL1	-0.065 ( -2.61) FL1	-0.088 ( -1.87) FL1	-0.064 ( -2.63) FL2	-0.065 ( -2.45) FL3	-0.071 ( -2.01) FL4
KONSTANTE	CONSTANT	-2.070 ( -1.47)	-1.340 ( -0.86)	-1.400 ( -1.30)	-3.130 ( -2.00)	-1.990 ( -1.02)	-0.328 ( -0.16)	-2.110 ( -1.07)	-1.620 ( -1.26)	-2.070 ( -1.39)

-----

P A R A M E T E R	COND. NR.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
( T-STATISTIKEN )	INH. VAR.	BV								

-----

AUTOKORRELATION

1. ORDNUNG	RHO 1	0.235 ( 2.57)	0.267 ( 2.93)	0.239 ( 2.64)	0.160 ( 1.71)	0.144 ( 1.54)
12. ORDNUNG	RHO 12	0.373 ( 4.10)	0.417 ( 4.90)	0.392 ( 4.50)	0.344 ( 3.78)	0.329 ( 3.61)

BOX-COX TRANSFORMATIONEN ( GEGEDEN )

LAMBDA(Y)	FLY	1.000	0.0	0.577	0.617	0.745	0.629	0.757	0.591	0.507
LAMBDA(X) - GRUPPE 1	FL1	1.000	0.0	0.577	1.439	1.696	2.029	3.563	3.254	3.267
LAMBDA(X) - GRUPPE 2	FL2							1.619	-2.330	-1.637
LAMBDA(X) - GRUPPE 3	FL3								1.776	1.154
LAMBDA(X) - GRUPPE 4	FL4									2.439
HETEROSKEDASTIZITÄT ( GESCHAETZT )										
( VARIABLE = UMG )	DEL 1								-0.062 ( -2.31)	
HETEROSKEDASTIZITÄT ( GEGEBEN )										
( VARIABLE = UMG )	LAM 1								3.071	

-----

LOG-LIKELIHOOD	277.801	276.506	274.309	262.047	293.320	296.107	293.403	296.264	297.141
PSEUDO-R2	0.966	0.965	0.946	0.967	0.971	0.972	0.971	0.972	0.972
ANZAHL BEOBSACHTUNGEN	180	180	180	180	180	180	180	180	180
SCHÄTZPERIODE	13-192	13-192	13-192	13-192	13-192	13-192	13-192	13-192	13-192
ANZAHL DER UNABHÄNGIGEN VARIABLEN	24	24	24	24	24	24	24	24	24

-----

- (f) Zahl der Beobachtungen
- (g) Schätzzeitraum
- (h) Zahl der unabhängigen Variablen (einschl. der Konstanten).

### 3.3 Ergebnisse

#### 3.3.1 Allgemeine Bemerkungen zu den Schätzfunktionen

Auf der Grundlage der Werte der Log-likelihood im unteren Teil der Tabelle 2 kann über die ersten vier Gleichungen, in denen angenommen wird, daß die Restschwankungen zufällig sind und eine konstante Varianz besitzen, folgendes gesagt werden:

Wenn nur eine BOX-COX-Transformation durchgeführt wird, erhält man als optimale Transformation eine Wurzeltransformation ( $\lambda = 0,57$ ). Obwohl dieser Wert in der Mitte zwischen 0 und 1 liegt, ist er signifikant von Null verschieden, aber nicht von Eins. Wenn unterschiedliche Transformationsparameter für  $\lambda_y$  und  $\lambda_x$  zugelassen werden, verbessert dies den Log-likelihood-Wert signifikant, und es werden Ergebnisse erzielt ( $\lambda_y = 0,61$ ;  $\lambda_x = 1,43$ ), die sowohl von linearen als auch von log-linearen Funktionsformen signifikant verschieden sind.

Die zusätzliche Berücksichtigung der geeigneten Autokorrelationsstruktur in Gleichung 5 verbessert den Wert der Log-likelihood enorm. Die Erweiterung des Fehlermodells um Heteroskedastizität nach (9) in Gleichung 6 erhöht den Log-likelihood-Wert nur geringfügig.

Läßt man verschiedene BOX-COX-Transformationen für verschiedene Gruppen von Variablen in den Gleichungen 7 bis 9 – bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Autokorrelationen 1. und 12. Ordnung – zu, erhöht sich selbstverständlich der Wert der Log-likelihood, jedoch nicht genug, um eines dieser Modelle als dasjenige zu bezeichnen, das besser als Modell 5 ist. Darüber hinaus sind die Ergebnisse für die einzelnen Variablen bei Verwendung von Informationen aus der Autokorrelationsstruktur effizienter als die entsprechenden Ergebnisse in Gleichung 4. Ein großer Teil der hohen Elastizitäten, die in Gleichung 4 zu finden sind (z. B. für die Straßenlängen) wird niedriger, wenn Autokorrelationen 1. und 12. Ordnung berücksichtigt werden. Nur der Elastizitätswert der Preise anderer Transportmittel ist in Gleichung 5 deutlich höher.

Zahlreiche Testrechnungen auf der Grundlage dieses ökonomischen Modells ergaben keinen Hinweis auf die Existenz multipler Lösungen.

#### 3.3.2 Ergebnisse für die einzelnen Variablen

Eine Überprüfung der Nachfrageelastizitäten im ersten Teil der Tabelle 2 zeigt, daß sie sehr stabil sind und bis auf wenige Ausnahmen den Erwartungen entsprechen. Die folgende Ergebnisdiskussion bezieht sich auf Modell 5, das – wie bereits erwähnt – aus statistischen Gründen die beste Schätzung darstellt.

Es ist zweckmäßig, die Reihenfolge der Variablen in der Tabelle einzuhalten.<sup>10)</sup>

10) Der Leser findet eine kurze Definition aller Variablen im Anhang; zu einer ausführlichen Beschreibung vgl. Foos, G., Die Determinanten . . . , a.a.O.

#### P: Preise:

Die Elastizität des Benzinverbrauchs in bezug auf Veränderungen des *realen Benzinpreises* (RBPNS) beträgt  $-0,28$ . Dieser Wert ist betragsmäßig kleiner als alle bisher für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland geschätzten Kraftstoffpreiselastizitäten, nur Lebbert ermittelt eine Preiselastizität von  $-0,25$ , jedoch für den Zeitraum 1960 – 1973.<sup>11)</sup>

Die Bedeutung des Benzinpreises für die Verkehrsnachfrage liegt jedoch nur in zweiter Linie darin, daß Preiserhöhungen den Benzinverbrauch senken und Preissenkungen die Benzinnachfrage erhöhen, sondern in erster Linie, daß er Substitutionsprozesse in Gang setzt. Die Anpassung an ein höheres Benzinpreisniveau erfolgt jedoch nur in ganz geringem Maße über die Substitution des privaten Kraftfahrzeugs durch öffentliche oder private, nicht-motorisierte Transportmittel, sondern fast vollständig durch ein neues Fahrzeug mit benzinsparendem Motor, teilweise auch durch ein energiebewußtes Fahrverhalten. Durch den günstigeren Verbrauch pro gefahrenem Kilometer ist es – zwar nicht sofort, aber nach einer gewissen Anpassungsfrist – möglich, die vor der Preiserhöhung realisierte Fahrleistung beizubehalten. Daraus folgt, daß die Preiselastizität des Benzinverbrauchs betragsmäßig größer ist als die Preiselastizität der Fahrleistungen. Das bedeutet, daß Mineralölsteuererhöhungen sich als Instrument der Energiepolitik sehr gut eignen, weniger jedoch unter dem Gesichtspunkt der Einnahmierzwecke, weil die Möglichkeiten der Steuervermeidung (durch technologische Verbesserungen) durchaus wahrgenommen werden. Die Mineralölsteuer ist als Mittel zur Beeinflussung des Verkehrsvolumens im Individualverkehr offensichtlich unwirksam.

Für die Kreuzpreiselastizität des Benzinverbrauchs in bezug auf Veränderungen der *realen Preise anderer Transportmittel* (RPATM) wird ein Wert von  $0,39$  geschätzt. Dieses Ergebnis ist etwas höher als erwartet; es sollte jedoch nicht überbewertet werden, weil der T-Wert des zugrundeliegenden Koeffizienten niedrig ist.

#### K: Kraftfahrzeuge:

Der Elastizitätswert des *Pkw-Bestandes mit Benzinmotor* (PKWB) ist wie erwartet positiv und mit  $0,11$  relativ niedrig. Das bedeutet, daß bei gegebenem spezifischem Verbrauch der Fahrzeuge und bei gegebenem Aktivitätsniveau ein Zuwachs des Pkw-Bestandes nur einen geringen Benzinmehrverbrauch zur Folge hat.<sup>12)</sup>

Der *spezifische Energieverbrauch von Personenkraftwagen mit Benzinmotor* (SEVPKW) besitzt einen Elastizitätswert von  $0,61$ , d.h. eine Senkung des spezifischen Energieverbrauchs um  $1\%$  bedeutet eine Verringerung des gesamten Benzinverbrauchs um nur  $0,61\%$ . Da mit einem sparsameren Fahrzeug der Preis pro gefahrenem Kilometer sinkt, wird bei normaler Reaktion der Autofahrer die Fahrleistung und damit auch der Benzinverbrauch steigen, wodurch der Effekt des günstigeren Normverbrauchs wieder teilweise kompensiert wird. Die Variable SEVPKW wurde auf der Grundlage von Daten über den Pkw-

11) Foos hat gezeigt, daß die Beschränkung auf wenige erklärende Variablen dazu führt, daß eine betragsmäßig höhere Benzinpreiselastizität erzielt wird; vgl. Foos, G., Die Determinanten . . . , a.a.O.

12) Foos hat gezeigt, daß der Verzicht auf Aktivitätsvariablen diesen Elastizitätswert erhöht. Er nimmt dann Werte an, die in der Nähe derjenigen liegen, die in Modellen ohne Aktivitätsvariablen ermittelt werden; vgl. Foos, G., Die Determinanten . . . , a.a.O.

Bestand, die Pkw-Neuzulassungen und deren Verbrauchswerte berechnet, wobei keine nach dem Alter differenzierte Gewichtung vorgenommen wurde, da Informationen über unterschiedliche Nutzungsintensitäten nicht vorhanden sind. In einem Modell, in dem zwischen der Benzinnachfrage alter und neuer Pkw unterschieden werden kann, wird möglicherweise ein höherer Elastizitätswert erzielt, wenn man davon ausgeht, daß neue Pkw für einen überproportionalen Anteil an der Fahrleistung verantwortlich sind.

#### I: Infrastruktur:

Die niedrige Höchstgeschwindigkeit (NHG72) von 100 km/h auf Bundes-, Kreis- und Landstraßen, die seit Oktober 1972 (mit einer Unterbrechung von November 1973 bis März 1974) gilt, bewirkte eine Benzineinsparung von 2,1 %. Während der ersten Energiekrise führten dieses Tempolimit und die weitere Herabsetzung der niedrigen Höchstgeschwindigkeit auf 80 km/h sowie die Einführung von 100 km/h auf Autobahnen (NHG7374) zusammen zu einer Verringerung des Benzinverbrauchs um 5,7 %. Der isolierte Effekt der zwischen November 1973 und März 1974 verschärften Regelung beträgt damit nur 3,6 %.

Eine Verdoppelung der Zahl der *autofreien Sonntage* (SFV73) läßt den Benzinverbrauch um 2,6 % zurückgehen.

Der Elastizitätskoeffizient des *Anteils der Autobahnen an den Straßenlängen* (AASL) ist negativ, d. h. eine Erhöhung des Autobahnanteils führt zu einer – zwar geringfügigen und nicht signifikanten – Verringerung des Benzinverbrauchs. Die verbrauchssenkenden Auswirkungen der Beseitigung von Engpässen auf Autobahnen und anderen Straßen durch neue Autobahnen scheinen etwa gleich stark zu sein wie die verbrauchssteigernden Effekte durch die Verbesserung der Qualität des Straßennetzes, so daß sich beide Effekte weitgehend kompensieren.

Der Elastizitätswert für die *Straßenlängen* (SL) ist mit 3,45 relativ hoch. In Querschnittsmodellen werden jedoch häufig Werte um 2 ermittelt. Außerdem gibt dieser Koeffizient die steigenden Kommunikationskosten, die durch die im Beobachtungszeitraum zunehmenden Entfernungen zwischen Aktivitätsstandorten verursacht werden, wieder. Wenn es möglich wäre, die Dekonzentration der Aktivitätsstandorte zu verringern, hätte dies eine enorme Auswirkung auf die abgeleitete Nachfrage nach Fahrten. Möglicherweise übernehmen die Straßenlängen zum Teil auch die Rolle einer Trendvariablen.

Der Elastizitätswert des *Bedienungstaktes* (BT) besitzt wie erwartet ein positives Vorzeichen, ist jedoch nicht signifikant. Daraus folgt, daß Veränderungen der Qualität des öffentlichen Personennahverkehrs – möglicherweise mit Ausnahme städtischer Regionen, die jedoch nur einen Teil des Untersuchungsgebietes ausmachen – keinen spürbaren Effekt auf die Nachfrage nach Pkw-Fahrleistungen hat.

#### W: Wetter:

Die Ergebnisse für die drei *Wettervariablen* (ZWF, ZKF, RFPT) zeigen, daß Veränderungen der Wetterbedingungen einen größeren Einfluß auf das Aktivitätsniveau haben als auf die Substitution zwischen Verkehrsmitteln.

#### Y: Einkommen:

Unter der Annahme, daß im Modell viele Aktivitätsvariablen enthalten sind, die die Endnachfrageaktivitäten sowie die Aktivitäten im Produktionssektor beschreiben, wird nicht

erwartet, daß das *reale verfügbare Einkommen pro Kopf* (RVEPK) mehr als eine untergeordnete Rolle spielt. Die Einkommenselastizität von 0,24 spiegelt teilweise den steigenden Wert der Zeit wieder und zeigt außerdem, daß nur ein sehr kleiner Teil der Nachfrage keine abgeleitete Nachfrage ist. Daher ist die Elastizität gering und statistisch nicht signifikant.

Dieses Ergebnis weicht beträchtlich von den Ergebnissen der übrigen Zeitreihenanalysen für die Bundesrepublik Deutschland – mit Ausnahme des bei *Flemig* ermittelten Wertes von 0,27 – ab. In Niveaumodellen mit nur zwei unabhängigen Variablen (*Lebbert, Kriegsmann, Fotiadis et al., Teichmann*) werden dem Einkommen einerseits indirekte Einflüsse, die hier mit den Aktivitätsvariablen und dem Pkw-Bestand erfaßt sind, zugerechnet, andererseits übernimmt das Einkommen dort teilweise eine Trendfunktion, ähnlich wie die Straßenlängen in diesem Modell, so daß häufig Einkommenselastizitäten, die größer als Eins sind, auftreten.

#### A: Aktivitäten:

Alle Ergebnisse für die einzelnen Aktivitätsvariablen sind plausibel. Es ist interessant zu sehen, daß, wenn sich die Aktivitäten, das Einkommen und der Pkw-Bestand verdoppeln, der Benzinverbrauch überproportional, und zwar um 130 %, steigt.

Dies spiegelt den komplexen direkten und indirekten Beitrag des Gutes Benzin für die Bestimmung nicht nur der Endnachfrageaktivitäten, sondern auch der Vorleistungsaktivitäten im Produktionssektor wieder. Um die näheren Zusammenhänge zu erfahren, ist es notwendig, die Struktur der Input-Output-Beziehungen zu untersuchen.

#### ET: Et cetera:

Die Tatsache, daß Mineralölsteuererhöhungen vorher angekündigt werden, führt manchmal zu geringen spekulativen Nachfrageverschiebungen. Die Aggregationsvariablen haben ihre Funktion, die in einer Korrektur oder Normalisierung der abhängigen Variablen besteht, wie erwartet erfüllt.

## 4. Schlußbemerkungen

In dieser Studie wurde ein aggregiertes Zeitreihennachfragemodell für Benzin formuliert, dessen Parameter mit Hilfe von flexiblen Funktionsformen geschätzt wurden und bei dem gleichzeitig die systematischen Informationen, die in den Restschwankungen enthalten sind, berücksichtigt wurden.

Aufgrund der Ergebnisse wurden die in der Literatur häufig verwendeten linearen und log-linearen Funktionsformen zugunsten einer allgemeineren Form verworfen.

Die Länge der monatlichen Zeitreihen machte es möglich, eine ausführliche Formulierung, die 24 unabhängige Variablen, eingeteilt in sieben Gruppen, enthält, zu spezifizieren. Durch diese Spezifikation konnten Strukturen aufgedeckt werden, die normalerweise in Modellen, die weniger erklärende Variablen verwenden, verborgen bleiben.

## Anhang

## Die Variablen

**BV: Benzinverbrauch:**

Bei den in der Statistik als „Verbrauch“ bezeichneten Daten handelt es sich um „Ablieferungen zum Verbrauch“, die manchmal auch als „Inlandsabsatz“ bezeichnet werden. Nach Auskunft des Mineralölwirtschaftsverbandes e. V., Hamburg, können in Anbetracht relativ konstanter Bestandshaltung die Ablieferungen mit dem Verbrauch gleichgesetzt werden.

**RBPNS: Realer Benzinpreis von Normal und Super:**

Die Variable RBPNS stellt einen nach der Bedeutung im Warenkorb des Statistischen Bundesamtes gewichteten Index des nominalen Preises für Normalbenzin und des nominalen Preises für Superbenzin dar, der mit dem Preisindex für die Lebenshaltung aller privaten Haushalte deflationiert wurde. Basisjahr für alle Preisindices ist das Jahr 1970.

**RPATM: Reale Preise anderer Transportmittel:**

Der Index der Preise anderer Transportmittel enthält die Preise von Bahnfahrten im Nah- und Fernverkehr sowie die Preise von örtlichen Verkehrsleistungen. Dieser nominale Preisindex wurde mit dem Preisindex für die Lebenshaltung aller privaten Haushalte deflationiert.

**PKWB: Bestand an Personenkraftwagen mit Benzinmotor:**

Die Anzahl der Personenkraftwagen (einschl. Kombinationskraftwagen) wird vom Kraftfahrtbundesamt halbjährlich, die Anzahl der Personenkraftwagen (einschl. Kombinationskraftwagen) mit Benzinmotor nur jährlich erfaßt. Die Daten für PKWB wurden zunächst als Halbjahresdaten ermittelt und danach auf der Grundlage des Anteils der Monate an den Neuzulassungen in Monatsdaten umgerechnet.

**SEVPKW: Spezifischer Energieverbrauch von Personenkraftwagen mit Benzinmotor:**

Der spezifische Energieverbrauch wurde mit Hilfe einer Modellrechnung auf der Grundlage von Daten über die Pkw-Neuzulassungen, die Verbrauchswerte neuer Pkw, die Zahl der verschrotteten Personenkraftwagen und den Pkw-Bestand (jeweils mit Benzinmotor) ermittelt.

**NHG7374: Niedrige Höchstgeschwindigkeit 1973–1974:**

Von November 1973 – März 1974 wurde auf Autobahnen eine Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h und auf Bundes-, Land- und Kreisstraßen von 80 km/h festgesetzt.

**NHG72: Niedrige Höchstgeschwindigkeit 1972 und seit 1974:**

Die Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h auf Bundes-, Land- und Kreisstraßen wurde am 1. Oktober 1972 eingeführt, zwischen November 1973 und März 1974 verschärft, und im April 1974 wieder in Kraft gesetzt.

**SFV73: Sonntagsfahrverbot 1973:**

Im November 1973 gab es einen autofreien Sonntag, im Dezember 1973 waren es drei autofreie Sonntage.

**AASL: Anteil der Autobahnen an den Straßenlängen:**

Der Anteil der Autobahnen an den Straßenlängen stellt das Verhältnis zwischen den Autobahnkilometern und der Länge der Bundes-, Kreis- und Landstraßen dar. Es handelt sich um Jahresdaten, die durch lineare Interpolation in Monatsdaten umgerechnet wurden.

**SL: Straßenlängen:**

Die Straßenlängen setzen sich aus den Längen der Bundesautobahnen, Bundesstraßen, Land- und Kreisstraßen am 1. Januar eines Jahres zusammen. Die monatlichen Werte wurden durch lineare Interpolation ermittelt.

**BT: Bedienungstakt im öffentlichen Personennahverkehr:**

Die Variable BT wurde berechnet, indem zunächst die Bedienungshäufigkeit als Quotient der Fahrleistungen und der Streckenlängen im öffentlichen Personennahverkehr, bezogen auf die Betriebsstunde, gebildet wurde. Es handelt sich dabei um Jahreswerte, die unter Berücksichtigung der Tatsache, daß im Sommer die Bedienungshäufigkeit sinkt, weil wegen der Schulferien Fahrten entfallen, in Monatswerte umgerechnet wurden. Der Kehrwert dieser Größe ergibt den Bedienungstakt im öffentlichen Personennahverkehr.

**ZWF: Zu warm in Frankfurt:**

Die Variable ZWF gibt die positive Abweichung der mittleren Tagestemperatur von einem als angenehm empfundenen Wert von 16° Celsius an. Da die Statistik keine Wetterdaten für das gesamte Bundesgebiet bereitstellt, wurden für alle Wettervariablen die Meßwerte von Frankfurt als repräsentativ für die Bundesrepublik Deutschland angenommen.

**ZKF: Zu kalt in Frankfurt:**

Mit ZKF werden die negativen Abweichungen der mittleren Tagestemperatur von einem Wert von 16° Celsius erfaßt.

**RFPT: Anteil der Regentage in Frankfurt:**

Die Variable RFPT gibt den Anteil der Regentage an der Gesamtzahl der Tage eines Monats an.

**RVEPK: Reales verfügbares Einkommen pro Kopf:**

Das verfügbare Einkommen der privaten Haushalte in der Bundesrepublik Deutschland liegt nur in der Form von Halbjahres- und Jahresdaten vor. Die Jahresdaten wurden durch 12 dividiert, linear interpoliert, mit dem Preisindex für die Lebenshaltung aller privaten Haushalte deflationiert und durch die Bevölkerungszahl dividiert, um die Daten für das monatliche reale verfügbare Pro-Kopf-Einkommen zu erhalten.

**E: Erwerbstätige:**

Die Monatsdaten für die Erwerbstätigen wurden aus den vierteljährlich vorliegenden Ergebnissen des Mikrozensus durch lineare Interpolation ermittelt.

**REUNB: Realer Einzelhandelsumsatz mit Nahrungsmitteln und Bekleidung:**

Der Index des Umsatzes im Einzelhandel mit Nahrungs- und Genußmitteln sowie Be-

kleidung wurde mit dem Preisindex für die Lebenshaltung aller privaten Haushalte deflationiert.

*UENG: Gesamte Übernachtungen:*

Die Angaben über die Zahl der gesamten Übernachtungen in der Bundesrepublik Deutschland (In- und Ausländer) basieren auf den Meldungen aller Beherbergungsstätten in 2400 – 2800 Berichtsgemeinden; ab 1981 nur noch in Beherbergungsstätten mit 9 und mehr Betten.

*FVLKW: Fernverkehr mit Lastkraftwagen:*

Mit dieser Variable werden die im Fernverkehr deutscher Fahrzeuge mit Standort im Bundesgebiet sowie die im grenzüberschreitenden Fernverkehr ausländischer Fahrzeuge beförderten Gütermengen (in Tonnen) erfaßt.

*RSEA: Reale Steuerantizipation:*

*RSEAV: Reale Steuerantizipation verzögert:*

RSEA nimmt jeweils im Monat vor dem Inkrafttreten einer Mineralölsteuererhöhung einen Wert an, der sich berechnet aus der Steueränderung (in Pfennigen pro Liter) zusätzlich anteiliger Mehrwertsteuer, deflationiert mit dem Preisindex für die Lebenshaltung aller privaten Haushalte. Dieser Wert wird im folgenden Monat in dem erstmals der erhöhte Steuersatz gilt, für RSEAV eingesetzt.

*AT: Arbeitstage:*

Von der Anzahl der Tage eines Monats werden die Samstage sowie die Sonn- und Feiertage abgezogen.

*SF: Sonn- und Feiertage:*

In die Anzahl der Feiertage eines Monats gehen alle Feiertage ein, die in mindestens drei Bundesländern arbeitsfrei sind und die nicht auf einen Samstag oder Sonntag fallen.

*ST: Samstage:*

Mit ST wird die Zahl der Samstage eines Monats erfaßt.

### Summary

We develop a model of the demand for gasoline in West Germany. Explanatory variables belong to seven principal classes: prices, vehicle availability and characteristics, infrastructure characteristics and regulation, weather, income, final and intermediate economic activities, and other. The mathematical form of the demand function is determined by the data simultaneously with the appropriate autocorrelation and heteroskedasticity structures of the residuals. The usual linear and logarithmic forms of the demand function are rejected in favour of a more general form. The long monthly time series from January 1968 until December 1983 permit the use of two dozen explanatory variables. The results are presented in elasticity format for all variables, including dummy variables, and are compared with other German results.

## Ein Beitrag zur Weiterentwicklung von Verkehrsberechnungsmodellen

VON RÜDIGER KÜCHLER, DARMSTADT

### 1. Einleitung

Für bestimmte Problemstellungen der Verkehrsplanung werden zur Abbildung und Prognose komplexer Zusammenhänge des Verkehrsgeschehens Verkehrsberechnungsmodelle benötigt. Ziel der Modellrechnungen im Personenverkehr ist die Ermittlung der Anzahl der Ortsveränderungen der Personen des betrachteten Planungsraumes, differenziert nach Quellen, Zielen, benutzten Verkehrsmitteln, den Zeitpunkten der Durchführung der Ortsveränderungen und den Verkehrszwecken. Als Ergebnis liefern Verkehrsberechnungsmodelle sogenannte Verkehrsnachfragematrizen. Gefordert wird von den Verkehrsberechnungsmodellen, daß sie maßnahmeempfindlich hinsichtlich der zu untersuchenden Problemstellungen sind und das Verkehrsverhalten sachlogisch richtig wiedergeben.

Die klassische Methode der Verkehrsberechnung besteht in der Zurückführung des Verkehrsgeschehens auf einzelne Komponenten. Dies betrifft sowohl die Gliederung der Verkehrsberechnungsmodelle in die bekannten Teilmodelle „Verkehrserzeugung“, „Verkehrsverteilung“, „Verkehrsmittelwahl“ und „Verkehrswegwahl“ als auch die Zerlegung der täglichen Ortsveränderungen einer Person in voneinander unabhängige Einzelwege. Die Erkenntnisse der Verkehrsursachenforschung der letzten Jahre zeigen, daß die aus dieser reduktionistischen Modelltheorie entstandenen Modellstrukturen durch integrierte „verhaltensorientierte“ Modellansätze ersetzt werden sollten. Dabei sind insbesondere die Wechselwirkungen zwischen der täglichen Ortsveränderungsfolge einer Person, den aufgesuchten Zielen und den benutzten Verkehrsmitteln modellmäßig zu erfassen.

Ein wesentlicher Ansatzpunkt zur Verbesserung der klassischen Modellstruktur ist die Abkehr von Einzelwegbetrachtungen und die Einführung von Wegemustern als Modell-eingangsgröße.

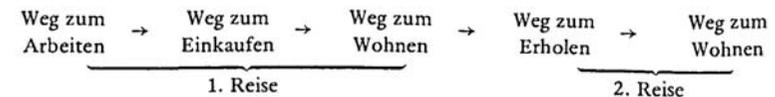


Bild 1: Beispiel für ein Wegemuster

*Anschrift des Verfassers:*

Dr.-Ing. Rüdiger Küchler  
Planungsingenieure Retzko + Topp  
Frankfurter Straße 40  
6100 Darmstadt