

Routenwahl im ÖV

Claude Weis

Diplomarbeit
Studiengang Bauingenieurwissenschaften

Februar 2006

Dank

Für die Unterstützung während der Durchführung meiner Diplomarbeit möchte ich mich besonders bei den folgenden Personen bedanken:

Herrn Professor K.W. Axhausen sowie Konrad Meister für die Betreuung während der gesamten Diplomarbeit.

Den Verantwortlichen von der Stadt Oberhausen und der PTV AG für die Daten aus der Fahrgasterhebung.

Dr. Milenko Vrtic für das zur Verfügung Stellen des Programms aus seiner Dissertation und die wertvolle Unterstützung bei dessen Verwendung.

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Grundlagen der Entscheidungsmodellierung.....	5
2.1	Nutzenfunktion.....	5
2.2	Multinomial Logit (MNL).....	6
2.3	Multinomial Probit (MNP).....	11
2.4	C-Logit	12
2.5	Path-Size-Logit	12
2.6	Nested Logit (NL).....	13
3	Datenlage	15
4	Deskriptive Analyse	16
4.1	Soziodemographische Eigenschaften	16
4.2	Eigenschaften der erhobenen Routen.....	23
5	Aufbereitung der Daten.....	31
5.1	Ermittlung der Routenalternativen	31
5.2	Eigenschaften der alternativen Routen	31
5.3	Berechnung der Ähnlichkeiten.....	33
6	Schätzung der Entscheidungsmodelle	38
6.1	Basis-Modelle	38
6.2	Modellierung der Wechselwirkungen zwischen den Routeneigenschaften	53
6.3	Berücksichtigung der soziodemographischen Eigenschaften	60
6.4	Zusammenfassung	72
7	Interpretation der Ergebnisse	76
8	Anwendung.....	78

8.1	Verwendung verschiedener Nutzenfunktionen zur Berechnung der Nachfrageverteilung auf ein Netz	78
8.2	Simultanes Routen- und Verkehrsmittelwahlmodell.....	88
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	96
10	Literatur.....	98
11	Glossar	101
11.1	Gumbel-Verteilung.....	101
11.2	Box-Cox-Transformation.....	102
11.3	Effect Coding	103
11.4	Boxplot.....	104

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Reisezeiten der erhobenen Routen.....	23
Tabelle 2	Beispiel für die Berechnung von Ähnlichkeiten	33
Tabelle 3	Beispiel für die Berechnung von $x_c(c')$	35
Tabelle 4	Beispiel für die Berechnung von $y_c(c')$	35
Tabelle 5	Beispiel für die Berechnung von $f_c(c')$	36
Tabelle 6	Ergebnisse der Schätzung für Modell (28)	39
Tabelle 7	Ergebnisse der Schätzung für Modell (33)	40
Tabelle 8	Nutzenfunktionen mit nicht-linearem Ansatz für die Routeneigenschaften	41
Tabelle 9	Ergebnisse der Schätzung für Modell (38)	41
Tabelle 10	Nutzenfunktionen mit Box-Cox-Ansatz für die zeitlichen Variablen.....	42
Tabelle 11	Ergebnisse der Schätzung für Modell (40)	43
Tabelle 12	Nutzenfunktionen mit multiplikativem Ansatz	46
Tabelle 13	Reisezeitäquivalent des Umsteigens für Modelle (28) und (33).....	47
Tabelle 14	Reisezeitäquivalent des Umsteigens für Modell (38)	47
Tabelle 15	Elastizitäten Reisezeit	49
Tabelle 16	Elastizitäten Übergangszeit	49
Tabelle 17	Parameter der EVA-Funktion	51
Tabelle 18	Ergebnisse der Schätzung für Modell (49)	53

Tabelle 19	Ergebnisse der Schätzung für Modell (54)	54
Tabelle 20	Nutzenfunktionen mit Berücksichtigung des Geschlechts	62
Tabelle 21	Modellergebnisse für Modelle (69) – (71)	65
Tabelle 22	Ergebnisse der Schätzung für Modell (74)	66
Tabelle 23	Ergebnisse der Schätzung für Modell (75)	68
Tabelle 24	Ergebnisse der Schätzung für Modell (77)	70
Tabelle 25	Basis-Modelle	73
Tabelle 26	Modelle mit Wechselwirkungen zwischen den Routeneigenschaften	73
Tabelle 27	Modelle mit soziodemographischen Eigenschaften	74
Tabelle 28	Knoten im Beispielnetz	78
Tabelle 29	Strecken im Beispielnetz	79
Tabelle 30	Streckenbelastungen für verschiedene Modellansätze	81
Tabelle 31	Differenzen in den Streckenbelastungen für verschiedene Modellansätze	85
Tabelle 32	Ergebnisse der Modellschätzungen	92
Tabelle 33	ÖV-Anteile in den Modellen mit und ohne Berücksichtigung von IND	94
Tabelle 34	Werte der Dummyvariablen für Dummy Coding	104
Tabelle 35	Werte der Dummyvariablen für Effect Coding	104
Tabelle 36	Beschreibung der im Datensatz verwendeten Variablen	A-1
Tabelle 37	Beispiel für die Syntax einer BIOGEME-Modelldatei	A-3

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Generelles Vorgehen	4
Abbildung 2	MNL-Modell für binären Fall mit $V_j = 0$	8
Abbildung 3	MNL-Modell für binären Fall mit $V_j = -V_i$	8
Abbildung 4	Altersstruktur der Befragten	16
Abbildung 5	Fahrten nach Fahrscheinart	17
Abbildung 6	Freifahrer nach Altersklasse.....	18
Abbildung 7	Fahrscheintyp nach Altersklasse.....	19
Abbildung 8	Verteilung der Befragungen über den Tag.....	20
Abbildung 9	Fahrtzweck in Abhängigkeit der Tageszeit.....	21
Abbildung 10	Fahrtzweck in Abhängigkeit der Altersgruppe.....	22
Abbildung 11	Reisezeiten der erhobenen Routen.....	24
Abbildung 12	Reisezeit in Abhängigkeit der Altersgruppe	25
Abbildung 13	Reisezeit in Abhängigkeit des Fahrtzwecks	26
Abbildung 14	Anzahl Alternativrouten	27
Abbildung 15	Umsteigehäufigkeit in Abhängigkeit der Altersgruppe.....	28
Abbildung 16	Eigenständigkeit in Abhängigkeit der Reisezeit	29
Abbildung 17	Eigenständigkeit in Abhängigkeit der Umsteigehäufigkeit.....	30
Abbildung 18	Eigenständigkeit in Abhängigkeit der Übergangszeit.....	30

Abbildung 19	Umsteigehäufigkeit in Abhängigkeit der Reisezeit für gewählte Routen.....	32
Abbildung 20	Umsteigehäufigkeit in Abhängigkeit der Reisezeit für ermittelte Alternativrouten	32
Abbildung 21	Eigenständigkeiten gewählter und nicht gewählter Routenalternativen	37
Abbildung 22	Einfluss von IND auf die Nutzenfunktionen für Modelle (33) und (38) ..	42
Abbildung 23	Nutzenfunktionen in Abhängigkeit der Reisezeit für verschiedene Modellansätze	44
Abbildung 24	Nutzenfunktionen in Abhängigkeit der Umsteigehäufigkeit für verschiedene Modellansätze.....	45
Abbildung 25	Nutzenfunktionen in Abhängigkeit der Übergangszeit für verschiedene Modellansätze.....	45
Abbildung 26	Elastizitäten Reisezeit	50
Abbildung 27	Elastizitäten Übergangszeit.....	50
Abbildung 28	Reisezeitelastizität: EVA-Funktion	52
Abbildung 29	Nutzen in Funktion der Reisegeschwindigkeit und der Distanz	55
Abbildung 30	Nutzen in Funktion der Umsteigehäufigkeit und der Distanz	55
Abbildung 31	Nutzen in Funktion der Übergangszeit und der Distanz.....	56
Abbildung 32	Nutzen in Funktion der Umsteigehäufigkeit und der Reisezeit.....	58
Abbildung 33	Nutzen in Funktion der Reisezeit und der Umsteigehäufigkeit.....	58
Abbildung 34	Nutzen in Funktion der Reisezeit und der Eigenständigkeit.....	60

Abbildung 35	Nutzen in Funktion der Übergangszeit und des Alters	62
Abbildung 36	Nutzen in Funktion der Umsteigehäufigkeit und des Geschlechts	63
Abbildung 37	Nutzen in Funktion der Umsteigehäufigkeit und des Fahrtzwecks....	64
Abbildung 38	Nutzen in Funktion des Alters und der Reisezeit für 1 mal umsteigen..	67
Abbildung 39	Nutzen in Funktion des Alters und der Reisezeit für 2 mal umsteigen..	67
Abbildung 40	Nutzen in Funktion des Geschlechts und der Reisezeit in Abhängigkeit der Anzahl Umsteigevorgänge	69
Abbildung 41	Nutzen in Funktion des Fahrtzwecks und der Reisezeit für 1 mal umsteigen.....	71
Abbildung 42	Nutzen in Funktion des Fahrtzwecks und der Reisezeit für 2 mal umsteigen.....	71
Abbildung 43	Belastung des Beispielnetzes ohne Berücksichtigung der Ähnlichkeiten (linearer Ansatz).....	82
Abbildung 44	Belastung des Beispielnetzes mit Berücksichtigung der Ähnlichkeiten (logarithmischer Ansatz).....	83
Abbildung 45	Belastung des Beispielnetzes mit Berücksichtigung der Ähnlichkeiten (Box-Cox-Ansatz)	84
Abbildung 46	Differenznetz der Belastungen Linear – logarithmisch.....	86
Abbildung 47	Differenznetz der Belastungen Logarithmisch – Box-Cox.....	87
Abbildung 48	Ablauf des Optimierungsprozesses.....	88
Abbildung 49	Ablauf des SUE-Verfahrens	89
Abbildung 50	Ablauf des Programms.....	90

Abbildung 51	Vergleich der Nutzenfunktionen in Abhängigkeit von IND.....	93
Abbildung 52	Vergleich der Nutzenfunktionen in Abhängigkeit von IND.....	93
Abbildung 53	Verteilungs- und Dichtefunktionen für Gumbel- und Standard-Normalverteilung	102
Abbildung 54	Box-Cox-Transformation für verschiedene Werte von λ	103

Abkürzungen

BIOGEME	Bierlaire's Optimization Toolbox for GEV Model Estimation
EVA	Erzeugung, Verteilung und Aufteilung
GEV	Generalized Extreme Value
MNL	Multinomial Logit
MNP	Multinomial Probit
NL	Nested Logit
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
ÖV	öffentlicher Verkehr
PJT	empfundene Reisezeit (perceived journey time)
RP	Revealed Preference
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
VBA	Visual Basic for Applications

Diplomarbeit Studiengang Bauingenieurwissenschaften

Routenwahl im ÖV

Claude Weis
Kronenstrasse 37
8006 Zürich

Telefon: +41 43 233 83 71
cweis@student.ethz.ch

Februar 2006

Kurzfassung

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Entwicklung von Routenwahlmodellen für den öffentlichen Verkehr. Es werden verschiedene Entscheidungsmodelle geschätzt, welche die Einflüsse von Routen- und soziodemographischen Eigenschaften auf die Routenwahl aufzeigen.

Insbesondere wird der Einfluss einer Variable untersucht, welche die gegenseitige Beeinflussung der Routenalternativen mit ähnlichen Eigenschaften modelliert. Es werden Modellschätzungen mit verschiedenen Ansätzen zur formellen Einbindung dieser Variable in die Nutzenfunktionen durchgeführt.

Diese Optimierungsaufgabe führt zu einem funktionalen Ansatz für die Nutzenfunktion, welcher zur Visualisierung des Unterschiedes zwischen dem neuen Modellansatz und dem bisher verwendeten auf ein praktisches Beispiel angewendet wird. In die verbesserte Nutzenfunktion fliesst die Eigenständigkeit einer Route als Box-Cox-transformierte Grösse anstatt wie bisher angesetzt als Logarithmus ein.

Schlagworte

Routenwahl, Modellschätzung, Logit-Modell, Ähnlichkeiten, Nutzenfunktionen

Zitierungsvorschlag

Weis, C. (2006) Routenwahl im ÖV, *Diplomarbeit*, IVT, ETH Zürich, Zürich

1 Zielsetzung

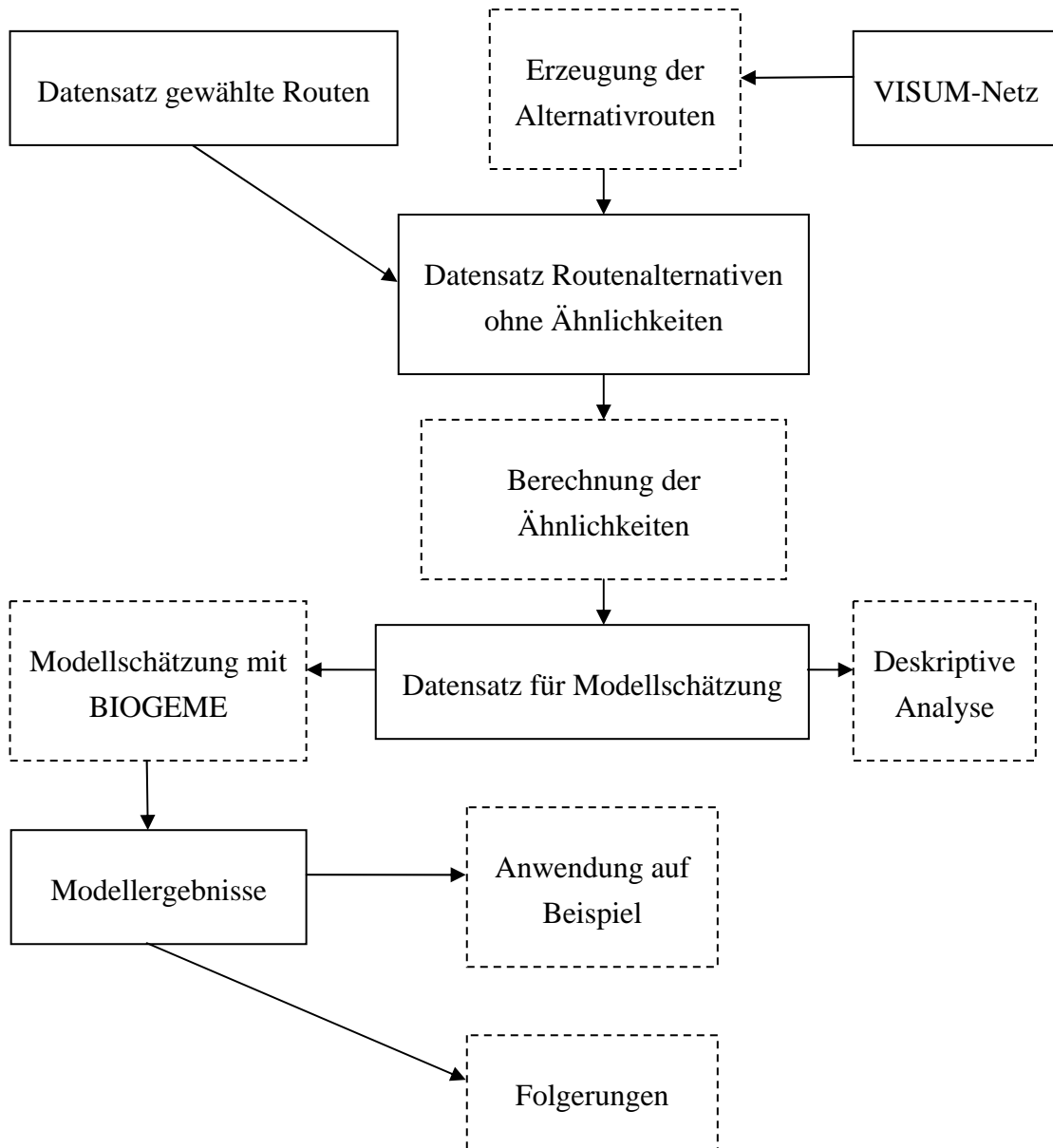
In der Literatur existieren verschiedene Ansätze zur Analyse der Routenwahl im öffentlichen Verkehr. Die Unterschiede liegen hierbei in den mathematischen Ansätzen zur Modellierung des Einflusses der wesentlichen Einflussgrößen (Eigenschaften der verschiedenen Routen und soziodemographische Variablen) auf die Entscheidung, welche Route gewählt wird. In dieser Diplomarbeit sollen einige dieser Modelle vorgestellt werden.

Dabei soll ein besonderes Augenmerk auf die Modellierung des Einflusses einer zusätzlichen, bisher ungenügend untersuchten Größe gelegt werden: die Ähnlichkeit zwischen alternativen Routen. Bisherige Untersuchungen haben diese meist vernachlässigt und die Routenalternativen als völlig unabhängig voneinander betrachtet. Es liegt jedoch nahe, dass zwei Routen, welche ähnliche Eigenschaften (wie z.B. Abfahrts- und Ankunftszeit) aufweisen, nicht nur in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Eigenschaften gewählt werden, sondern sich auch gegenseitig beeinflussen. Erste Ansätze, diese Ähnlichkeiten zu modellieren, existieren bereits.

Ein Teil dieser Arbeit befasst sich mit der Untersuchung dieser Ansätze sowie der Schätzung verschiedener Routenwahlmodelle. Die verschiedenen Ansätze sollen miteinander verglichen werden und das als bestes bewertete Modell auf ein konkretes Beispiel angewendet werden. Dessen Ergebnisse werden dann mit den Umlegungsergebnissen konventioneller Routenwahlmodelle verglichen. So soll die theoretische, auf mathematischen Ansätzen basierende Erforschung von Entscheidungsmodellen einen Bezug zur Praxis erhalten und die Unterschiede zwischen den verschiedenen Ansätzen in einer grafischen Darstellung visualisiert werden.

Die verschiedenen durchzuführenden Arbeitsschritte sind in Abbildung 1 dargestellt.

Abbildung 1 Generelles Vorgehen



2 Grundlagen der Entscheidungsmodellierung

Zur Bestimmung der Verteilung einer Verkehrsnachfrage auf die verschiedenen in einem Netz vorhandenen Routen werden Entscheidungsmodelle verwendet. Ziel ist die Ermittlung eines funktionalen Zusammenhanges zwischen der Wahrscheinlichkeit einer Entscheidung und den vorhersagbaren Einflussgrößen.

Modelle sind immer Abbildungen realer Systeme. Idealerweise sollte ein Modell alle auf das reale System einwirkenden Faktoren berücksichtigen. Da dynamische Systeme jedoch sehr komplex sind, müssen die ins Modell einflussenden Faktoren auf eine für die Aufgabenstellung sinnvolle Anzahl reduziert werden, und nicht mathematisch beschreibbare Einflüsse wie z.B. persönliche Präferenzen können nur indirekt erfasst werden.

Die theoretischen Grundlagen der Entscheidungsmodellierung sollen in diesem Kapitel kurz erläutert werden.

2.1 Nutzenfunktion

Der Nutzen U einer Alternative j für eine bestimmte Person q lässt sich allgemein ausdrücken als:

$$U_{jq} = V_{jq} + \varepsilon_{jq} \quad (1)$$

V_{jq} systematischer, messbarer Anteil

ε_{jq} nicht systematischer, nicht messbarer Anteil; spiegelt die Präferenzen der Person sowie den Messfehler des Modells wieder

V_{jq} ist eine Linearkombination verschiedener Einflussgrößen:

$$V_{jq} = \sum_k \alpha_{kj} x_{kjq} + \sum_n \beta_{nj} s_{nq} + \sum_m \gamma_{mj} e_{mq} \quad (2)$$

$\alpha_{kj}, \beta_{nj}, \gamma_{mj}$ Konstanten für alle Personen des untersuchten Marktsegments

x_{kjq}	Eigenschaften k der Alternative j für Person q
s_{nq}	Eigenschaften n der Person q
e_{mq}	Eigenschaften m der Entscheidungssituation für Person q

Diese lineare Nutzenfunktion kann auf verschiedene Weisen modifiziert werden. Teil dieser Arbeit ist die Erprobung neuer Ansätze für die Modellierung des Nutzens und deren Gegenüberstellung mit dem allgemein verwendeten. Zur näheren Beschreibung der verschiedenen Modellansätze wird auf Kapitel 6 verwiesen.

2.2 Multinomial Logit (MNL)

2.2.1 Definition

Es wird diejenige Alternative j gewählt, welche für Person q den maximalen Nutzen aufweist, also:

$$U_{jq} \geq U_{iq}, \forall i \neq j \quad (3)$$

$$V_{jq} - V_{iq} \geq \varepsilon_{iq} - \varepsilon_{jq}, \forall i \neq j \quad (4)$$

Da der Wert von $\varepsilon_{iq} - \varepsilon_{jq}$ nicht bekannt ist, kann nur eine Annahme über die Wahrscheinlichkeit der Wahl einer Alternative getroffen werden. Es folgt:

$$P_{jq} = P(\varepsilon_{iq} \leq \varepsilon_{jq} + V_{jq} - V_{iq}), \forall i \neq j \quad (5)$$

$$P_{jq} = \int f(\varepsilon) d\varepsilon,$$

wobei $f(\varepsilon)$ die Dichtefunktion der gemeinsamen Verteilung der Störterme ist. Beim MNL wird angenommen, dass die Residuen voneinander unabhängig und Gumbel-verteilt mit Mittelwert 0 und gleicher Standardabweichung sind, die Varianz-Kovarianz-Matrix also folgende diagonale Struktur besitzt:

$$\Omega = \sigma^2 \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Lambda & 0 \\ 0 & 1 & \Lambda & 0 \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ 0 & 0 & \Lambda & 1 \end{pmatrix}$$

Die Definition der Gumbel-Verteilung befindet sich im Glossar (Kapitel 11). Unter dieser Annahme hat das Integral:

$$P_j = \int_{-\infty}^{\infty} g(\varepsilon_j) d\varepsilon_j \prod_{i \neq j} \int_{-\infty}^{\varepsilon_j + V_j - V_i} g(\varepsilon_i) d\varepsilon_i \quad (6)$$

eine geschlossene Lösung.

Die Wahrscheinlichkeit, dass aus n Alternativen die Alternative i gewählt wird, errechnet sich schliesslich zu:

$$P_i = \int_0^{\infty} e^{-t} \sum_{j=1}^n e^{-(V_i - V_j)} dt \quad (7)$$

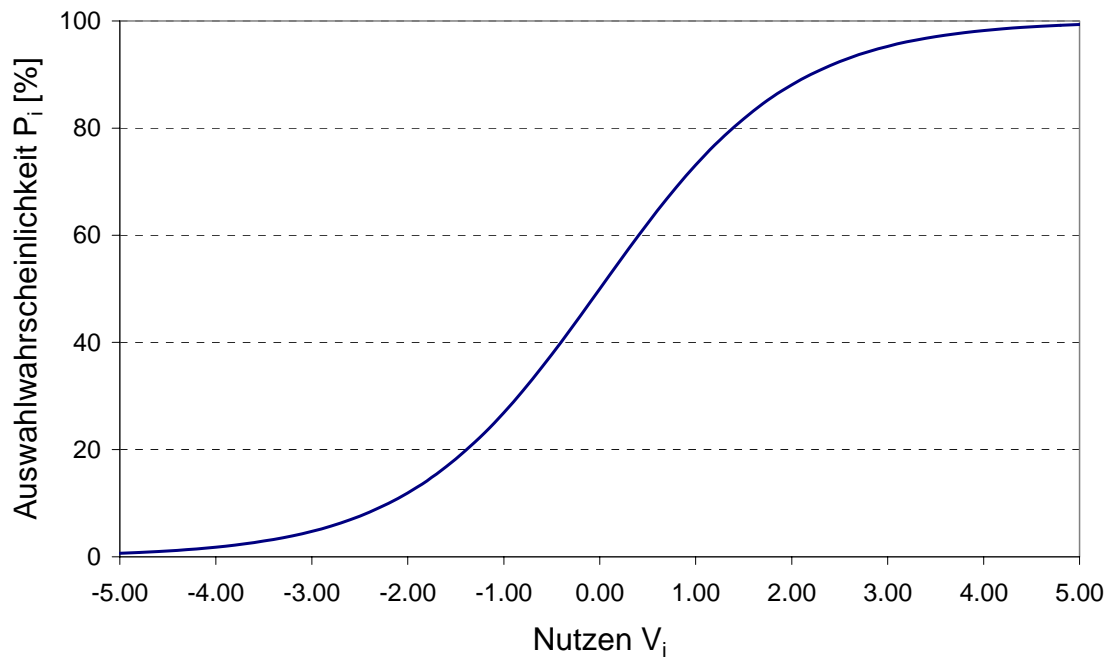
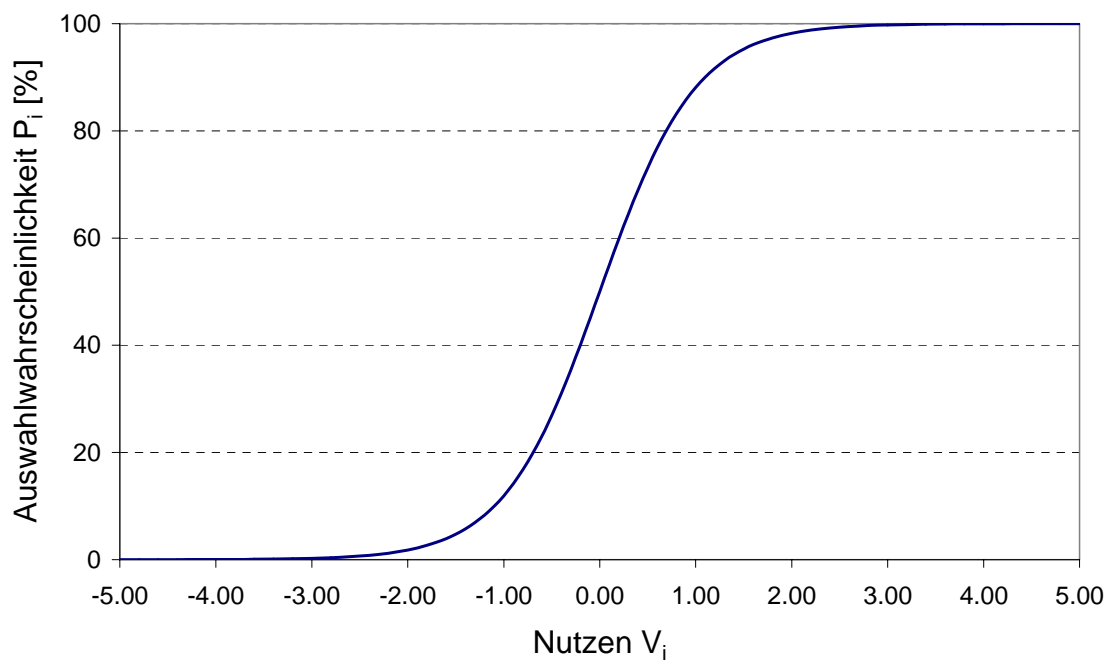
Die Lösung dieses Integrals ist:

$$P_i = \frac{e^{-t} \sum_{j=1}^n e^{-(V_i - V_j)} \Big|_0^{\infty}}{- \sum_{j=1}^n e^{-(V_i - V_j)} \Big|_0^{\infty}} \quad (8)$$

Nach der Auswertung ergibt sich:

$$P_i = \frac{e^{V_i}}{\sum_{j=1}^n e^{V_j}} \quad (9)$$

Die Form des MNL-Modells ist für die binären Fälle mit $V_j = 0$ resp. $V_j = -V_i$ in den Abbildungen 2 und 3 dargestellt.

Abbildung 2 MNL-Modell für binären Fall mit $V_j = 0$ Abbildung 3 MNL-Modell für binären Fall mit $V_j = -V_i$ 

2.2.2 Eigenschaften

Für die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative ist nur die Differenz ihres Nutzens zu den anderen Alternativen entscheidend. Als Beispiel diene der Fall mit zwei Alternativen und $V_i = \alpha_i + \beta \cdot x_i$:

$$P_1 = \frac{e^{V_1}}{e^{V_1} + e^{V_2}} = \frac{1}{1 + e^{V_2 - V_1}} = \frac{1}{1 + e^{(\alpha_2 - \alpha_1) + \beta(x_2 - x_1)}} \quad (10)$$

Independence of irrelevant alternatives (IIA); das Verhältnis der Auswahlwahrscheinlichkeiten zweier Alternativen hängt nur von ihrem Nutzen ab, andere Alternativen haben keinen Einfluss.

$$\frac{P_i}{P_j} = \frac{e^{V_i}}{\sum_{k=1}^n e^{V_k}} \cdot \frac{\sum_{k=1}^n e^{V_k}}{e^{V_j}} = e^{V_i - V_j} = \text{Const.} \quad (11)$$

Diese Eigenschaft kann als Vorteil des MNL-Modells angesehen werden, da sie erlaubt, den Anteil einer neuen Alternative, welche zum Zeitpunkt der Modellschätzung nicht vorhanden war, alleine anhand ihrer Attribute vorherzusagen. Im Fall von korrelierenden Alternativen versagt das Modell jedoch. Die IIA-Eigenschaft soll deshalb wie bereits in der Einleitung erwähnt in dieser Arbeit hinterfragt werden und das Modell so erweitert werden, dass Ähnlichkeiten zwischen Routenalternativen deren Nutzenfunktionen verändern. Die verschiedenen Ansätze zur Bewerkstelligung dieser Aufgabe sind im folgenden Abschnitt aufgeführt.

2.2.3 Beseitigung der IIA-Eigenschaft

Die IIA-Eigenschaft kann auf verschiedene Weisen beseitigt werden:

- Direkte Korrektur der Nutzen in der systematischen Nutzenkomponente
 - Verwendung des C-Logit-Modells (siehe Kapitel 2.4)
 - Verwendung des Path-Size-Logit-Modells (siehe Kapitel 2.5)

- Berücksichtigung der Eigenständigkeit von Routen gemäss Friedrich, Hofsäss und Weckeck (2002) (siehe Kapitel 5.3)
- Ansatz von Fotheringham (siehe z.B. Vrtic (2003))
- Freigabe der Varianz-Kovarianz-Matrix, z.B. Nested-Logit-Modell
- Kombination dieser zwei Methoden

Im ÖV wird zur Berücksichtigung der Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Alternativrouten im Allgemeinen der Ansatz nach Friedrich, Hofsäss und Weckeck verwendet, welcher auf einer Modifikation der Nutzenfunktionen beruht. Damit ist das Verhältnis der Auswahlwahrscheinlichkeiten nicht mehr wie in der IIA-Eigenschaft definiert nur von den jeweiligen Eigenschaften der Routen abhängig, sondern zusätzlich von einem Term, welcher die Ähnlichkeiten zwischen den Alternativen modelliert. Der verwendete Algorithmus zur Berechnung der Ähnlichkeiten ist in Kapitel 5.3 erläutert, die modifizierten Nutzenfunktionen in Kapitel 6 beschrieben.

2.2.4 Schätzung

Die Parameter des Logit-Modells werden mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode geschätzt. Diese ist eine Optimierungsaufgabe, bei der

$$L(\alpha) = P_{1q} \cdot P_{2i} \cdot P_{3k} \dots = \prod_{q,j} P_{jq}^{g_{jq}} \quad (12)$$

maximiert werden soll. q, i, \dots sind hierbei die jeweils gewählten Alternativen der Person j und $g_{jq} = 1$ falls j gewählt, sonst 0. α ist der Vektor der zu schätzenden Modellparameter.

Anstelle der Funktion L wird deren natürlicher Logarithmus, die sogenannte Log-Likelihood, als zu maximierende Grösse verwendet:

$$\ln L(\alpha) = \sum_{q,j} g_{jq} \ln P_{jq} \quad (13)$$

Die beschriebenen Verfahren zur Modellschätzung werden von der für die Berechnungen in dieser Arbeit benutzten Software BIOGEME v1.3 verwendet. Das Programm berechnet verschiedene Grössen zur Beurteilung der Güte des geschätzten Modells:

- $L(\beta)$ = Log-Likelihood mit den geschätzten Modellparametern β ; soll maximal sein
- $\rho^2 = 1 - \frac{L(\beta)}{L(0)}$, wobei $L(0)$ die Log-Likelihood mit allen Parametern = 0 ist; ρ^2 soll möglichst nahe an 1 sein. Ist $\rho^2 = 0$, so weist das Modell durch Einführung der Variablen gegenüber dem Nullmodell keine verbesserte Güte auf. Ein Wert von $\rho^2 > 0.3$ bedeutet im Allgemeinen eine genügend hohe Erklärungskraft des Modells.

Als weitere Indikatoren für die Plausibilität eines Modells dienen die Vorzeichen, die relativen Werte sowie die Signifikanzen der geschätzten Parameter.

2.3 Multinomial Probit (MNP)

Das MNP berücksichtigt Korrelationen zwischen den Attributen der einzelnen Verbindungen, indem es Kovarianzen zwischen den Fehlertermen von Alternativen zulässt. Bei einer Entscheidungssituation mit zwei Alternativen ist die Wahrscheinlichkeit, dass Alternative 1 gewählt wird:

$$P_1(V_1, V_2) = P(V_1 + \varepsilon_1 \geq V_2 + \varepsilon_2), \quad (14)$$

wobei $(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \sim MVN(0, \underline{\Sigma})$ ein Fehlervektor ist. Eine mögliche Parametrisierung von $\underline{\Sigma}$ ist es, $\text{var}(\varepsilon_i) = \beta \cdot V_i$ zu setzen (mit $i = 1, 2$ und $\beta > 0$). Sei ρ ($-1 \leq \rho \leq 1$) die Korrelation zwischen ε_1 und ε_2 . Dann ist die Differenz zwischen ε_1 und ε_2 normalverteilt mit Mittelwert 0 und Standardabweichung $\beta \cdot V_1 + \beta \cdot V_2 - 2 \cdot \rho \cdot \sqrt{\beta \cdot V_1} \cdot \sqrt{\beta \cdot V_2}$ und die Auswahlwahrscheinlichkeit für Alternative 1 gegeben durch:

$$P_1 = \Phi \left(\frac{V_1 - V_2}{\sqrt{\beta \cdot (V_1 + V_2 - 2 \cdot \rho \cdot \sqrt{V_1 \cdot V_2})}} \right) \quad (15)$$

Φ ist hierbei die Verteilungsfunktion der Standard-Normalverteilung.

2.4 C-Logit

C-Logit modifiziert die Nutzenfunktion, welche Ähnlichkeiten zwischen sich überlappenden Routen durch einen zusätzlichen Faktor berücksichtigt. Dieser Ähnlichkeitsfaktor verringert den Nutzen sich überlappender Routen und erhöht implizit jenen von unabhängigen Routen. Allgemein wird die Wahrscheinlichkeit, Route i zu wählen, dann zu:

$$P_i = \frac{e^{V_i - cf_i}}{\sum_{j=1}^n e^{V_j - cf_j}} \quad (16)$$

Die Ähnlichkeit cf_i („commonality factor“) ist wie folgt definiert:

$$cf_i = \alpha \cdot \ln \left(1 + \sum_{j=1}^n \left(\frac{L_{ij}}{\sqrt{L_i} \cdot \sqrt{L_j}} \right)^\gamma \right) \quad (17)$$

wobei L_{ij} die Länge der gemeinsamen Strecken von i und j , L_i und L_j die Gesamtlängen von i und j sind. γ ist ein positiver Modellparameter (in Vrtic (2003) wird $\gamma = 1$ gesetzt). Der C-Logit-Ansatz findet hauptsächlich bei der Modellierung der Routenwahl im Strassenverkehr Verwendung.

2.5 Path-Size-Logit

Das Path-Size-Logit-Modell ist eine Alternative zur C-Logit-Korrektur. Der Unterschied besteht in der Berechnung des Ähnlichkeitsfaktors. Die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route i ist gemäss Ben-Akiva und Bierlaire (1999) wie folgt gegeben:

$$P_i = \frac{e^{V_i + \ln S_i}}{\sum_{j=1}^n e^{V_j + \ln S_j}} \quad (18)$$

$$S_i = \sum_{a \in \Gamma_i} \frac{l_a}{L_i} \cdot \frac{1}{\sum_{j \in K_{rs}} \delta_{aj}}$$

l_a Länge der Strecke a

L_i Länge der Route i

Γ_i Gesamtheit der Strecken auf Route i

$$\delta_{aj} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } j \subset a \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

K_{rs} Gesamtheit der Routen zwischen dem Quelle-Ziel-Paar rs

2.6 Nested Logit (NL)

Das Nested- oder Tree-Logit-Modell, welches wie das C-Logit hauptsächlich im Strassenverkehr verwendet wird und sich auch für die Beschreibung von Verkehrsmittelwahlmodellen anbietet, berücksichtigt die Ähnlichkeiten zwischen Alternativen durch die Gruppierung ähnlicher Auswahlmöglichkeiten. Eine Alternative kann hierbei immer nur einer Gruppe (oder Nest) angehören. Die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative i , welche zu einer Gruppe m gehört, ist:

$$P_i = P_m \cdot P_{i|m} \quad (19)$$

wobei die Auswahlwahrscheinlichkeit von Gruppe m definiert ist als:

$$P_m = \frac{\left(\sum_{j \in N_m} e^{V_j / \mu_m} \right)^{\mu_m}}{\sum_m \left(\sum_{j \in N_m} e^{V_j / \mu_m} \right)^{\mu_m}} \quad (20)$$

und die bedingte Wahrscheinlichkeit der Wahl der Alternative i aus der Gruppe m als:

$$P_{i|m} = \frac{e^{v_i/\mu_m}}{\sum_{j \in N_m} e^{v_j/\mu_m}} \quad (21)$$

N_m ist die Gesamtheit der zu Gruppe m gehörenden Alternativen, μ_m ein auf Gruppe m bezogener Ähnlichkeitsparameter. NL ist äquivalent zu MNL falls $\mu_m = 1 \forall m$.

3 Datenlage

Die Daten, welche den Untersuchungen in dieser Arbeit zugrunde liegen, stammen aus einer RP-Befragung von ÖV-Nutzern im Netz der deutschen Stadt Oberhausen aus dem Jahr 2003. Die Teilnehmer wurden zu den im Netz zurückgelegten Wegen sowie zu ihren soziodemographischen Eigenschaften befragt.

Die Grunddaten lagen in Form einer Access-Datenbank vor. Diese enthielt folgende für die hier durchgeführten Auswertungen relevante Informationen:

- Daten zu den gewählten Wegen: Start- und Zielhaltestelle, Abfahrts- und Ankunftszeit, Nummer des gewählten Linienkurses sowie Reisedistanz aller Teilwege der gewählten Route
- Soziodemographische Eigenschaften: Geschlecht, Altersklasse, Art des Fahrscheins und Fahrtzweck für die befragte Person

Eine detaillierte Beschreibung aller verwendeten Variablen und derer Grössen findet sich im Anhang und in Hokamp (2004).

Aus den Routendaten wurden die Eigenschaften Reisezeit, Umsteigehäufigkeit und Übergangszeit der gewählten Routen ermittelt, welche im späteren Verlauf zur Berechnung der Ähnlichkeiten und zur Modellschätzung verwendet wurden.

Zu den soziodemographischen Eigenschaften der Befragten wurden verschiedene deskriptive Analysen durchgeführt, deren Ergebnisse im folgenden Kapitel beschrieben werden.

Des Weiteren stand das Verkehrsnetz von Oberhausen und seiner Umgebung (S-Bahn-Netz des Gesamten Ruhrgebiets) als VISUM 9.30-Datei zur Verfügung. Dieses diente zur Ermittlung der Routenalternativen und zur Verknüpfung der so erhaltenen Daten mit dem Fahrplan.

4 Deskriptive Analyse

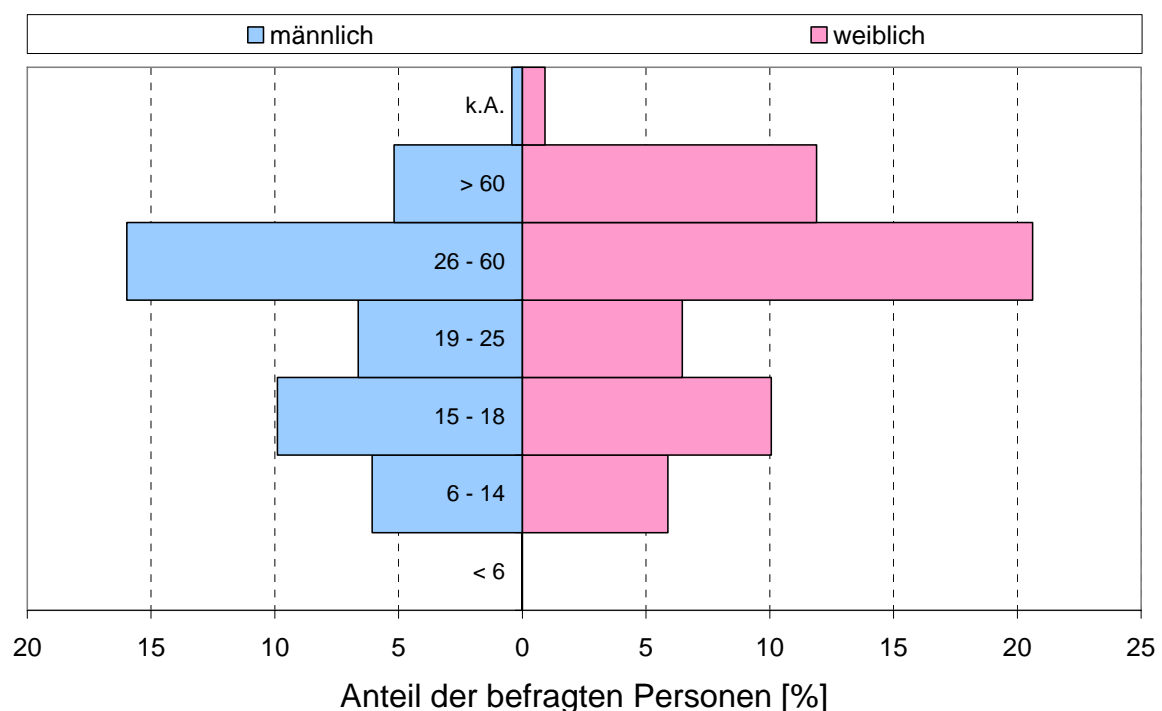
In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der beschreibenden Statistik des Datensatzes vorgestellt. Es sind dies zum einen Untersuchungen zu den soziodemographischen Eigenschaften der Befragten, zum anderen Beschreibungen der erhobenen Routen.

4.1 Soziodemographische Eigenschaften

4.1.1 Altersstruktur

Die meisten Befragten gehören der (sehr breit gefächerten) Altersgruppe von 26 bis 60 Jahren an. In praktisch allen Altersgruppen ist das Verhältnis Männer/Frauen etwa ausgeglichen. Bei den Personen über 60 Jahren sowie jenen, welche keine Angaben zu ihrem Alter machen wollen, überwiegt jeweils der Frauenanteil mit etwa 70%. Die Verteilung des Alters und des Geschlechts der Befragten ist in Abbildung 4 dargestellt.

Abbildung 4 Altersstruktur der Befragten

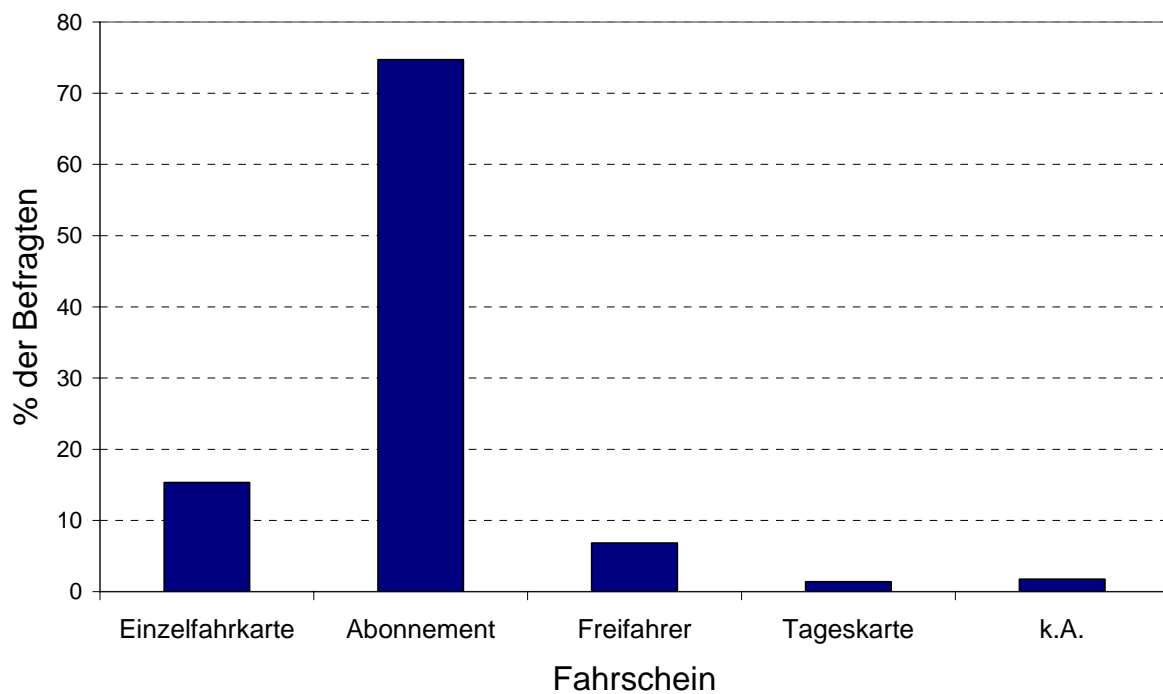


4.1.2 Fahrscheinbesitz

Allgemein

Die Befragten werden nach der verwendeten Fahrscheinart in 4 Gruppen eingeteilt: Einzelfahrkarte, Tageskarte, Abonnement und Freifahrer. Über 70% der Befragten besitzen ein Monats- oder Jahresabonnement, sind also ÖV-Vielfahrer. Die Aufteilung der Fahrten nach Fahrscheinart ist in Abbildung 5 dargestellt.

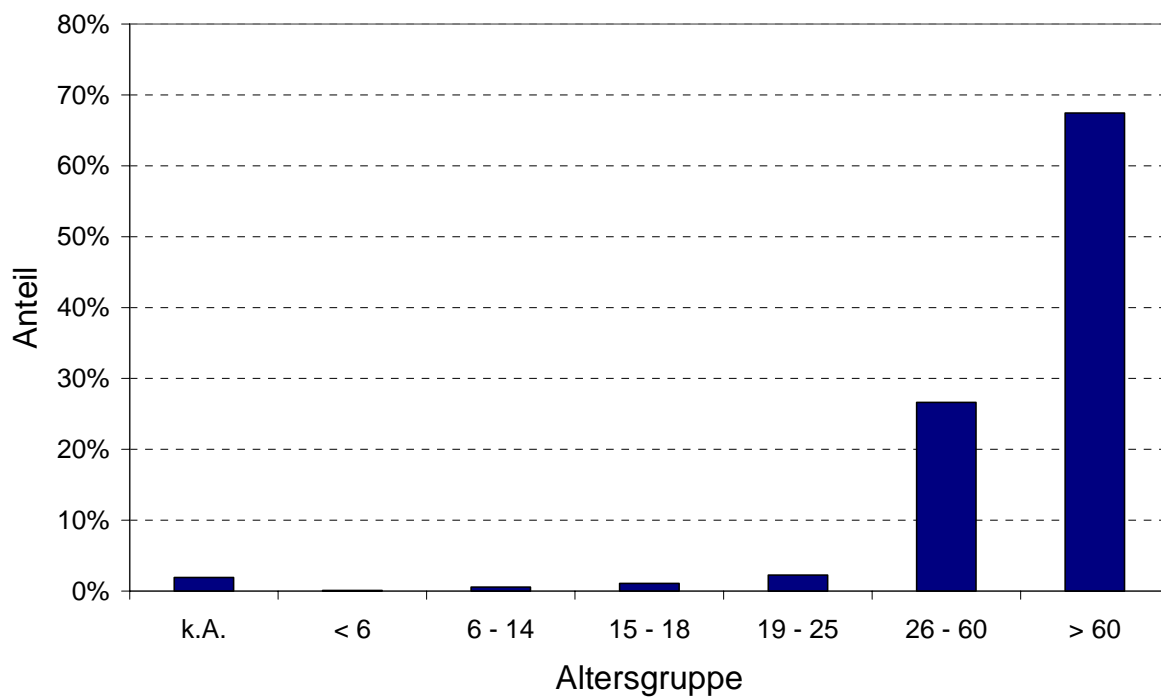
Abbildung 5 Fahrten nach Fahrscheinart



Freifahrer

Von den Freifahrern besitzen über 90 % einen Schwerbehindertenausweis, nur ein verschwindend geringer Anteil sind Bundeswehrsoldaten, Zivildienstleistende, Polizisten, BGS-Beamte oder Angestellte der Transportunternehmen; dies verdeutlicht auch Abbildung 6, welche die Freifahrer in Alterskategorien einteilt. Alle über 60jährigen, welche zur kostenlosen Benutzung des ÖV berechtigt sind, fallen in besagte Kategorie.

Abbildung 6 Freifahrer nach Altersklasse

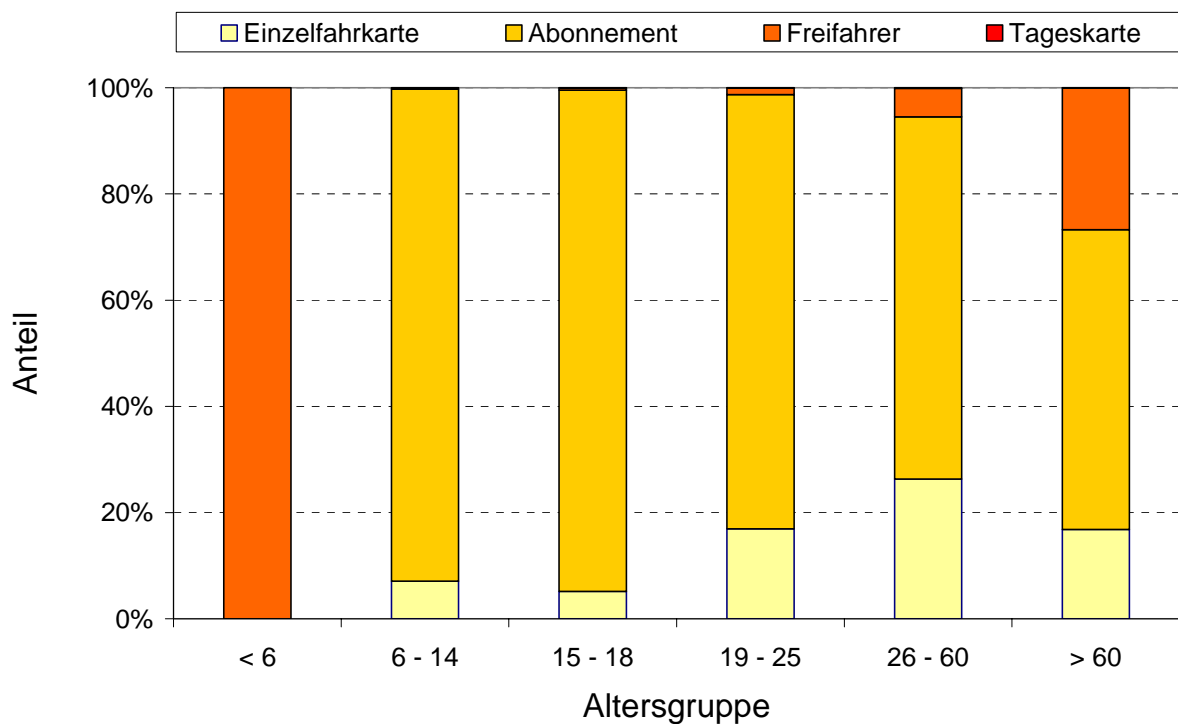


Einteilung nach Alter

Die Unterteilung der Fahrausweisarten in verschiedene Altersgruppen (Abbildung 7) ergibt folgende Ergebnisse:

- Alle Kleinkinder (unter 6 Jahren) sind Freifahrer. Im ursprünglichen Datensatz waren diese nicht alle als Freifahrer aufgeführt. Dies erklärt sich damit, dass sie eine gemeinsame Fahrkarte mit ihren Begleitpersonen besitzen und daher zu den „Erwachsenenfahrausweisen“ gezählt wurden. Dieser Fehler wurde korrigiert.
- Die grösste Dichte an Abonnementen findet sich bei den Jugendlichen. Mit aufsteigendem Alter wird vermehrt mit einer Einzelfahrkarte gefahren. Personen dieser Altersgruppen sind also eher Gelegenheitsfahrer, da sie oft andere Fortbewegungsmöglichkeiten (PW) haben, während vor allem die 15-18jährigen ausschliesslich auf den ÖV angewiesen sind.

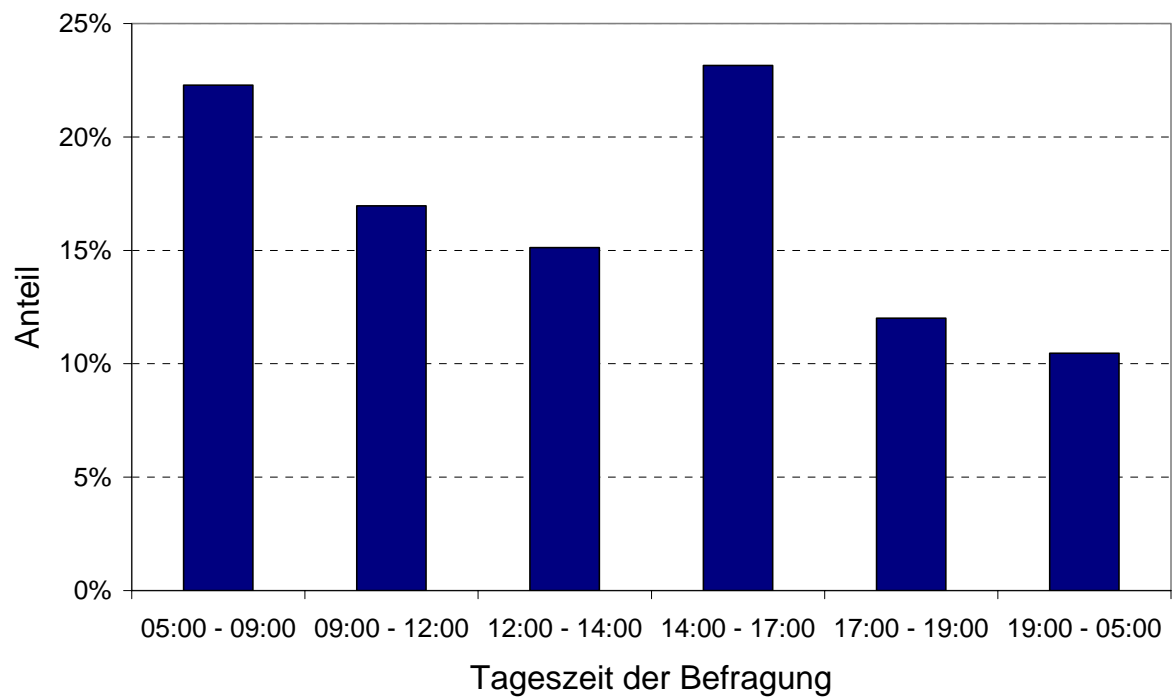
Abbildung 7 Fahrscheintyp nach Altersklasse



4.1.3 Tageszeit der Befragung

Die Befragungen wurden etwa gleichmässig über den Tag verteilt durchgeführt, wie Abbildung 8 zeigt.

Abbildung 8 Verteilung der Befragungen über den Tag

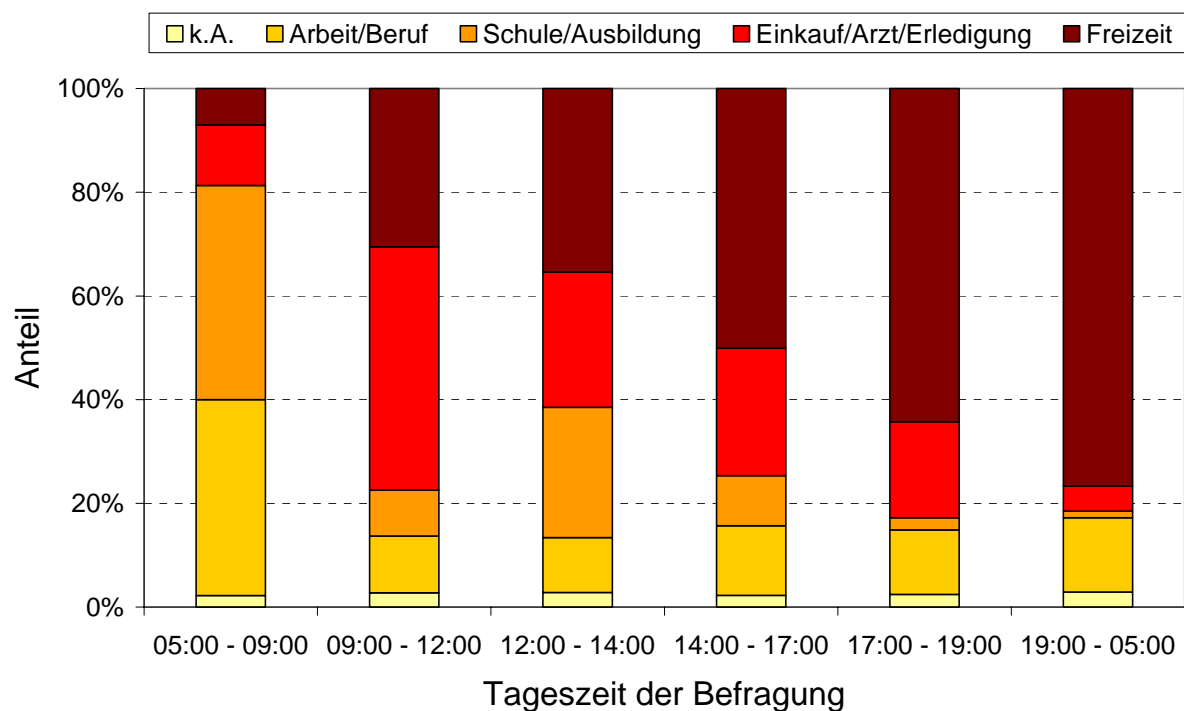


4.1.4 Fahrtzweck

Einteilung nach Tageszeit

In der Morgenspitze sind ein Grossteil der Befragten im Pendlerverkehr unterwegs (Fahrtzweck Arbeit/Beruf resp. Schule/Ausbildung). Im Laufe des Tages steigt der Anteil des Freizeitverkehrs, abends und nachts erreicht dieser fast 80%. Zudem fällt auf, dass Einkäufe und Erledigungen zum grössten Teil am Vormittag durchgeführt werden.

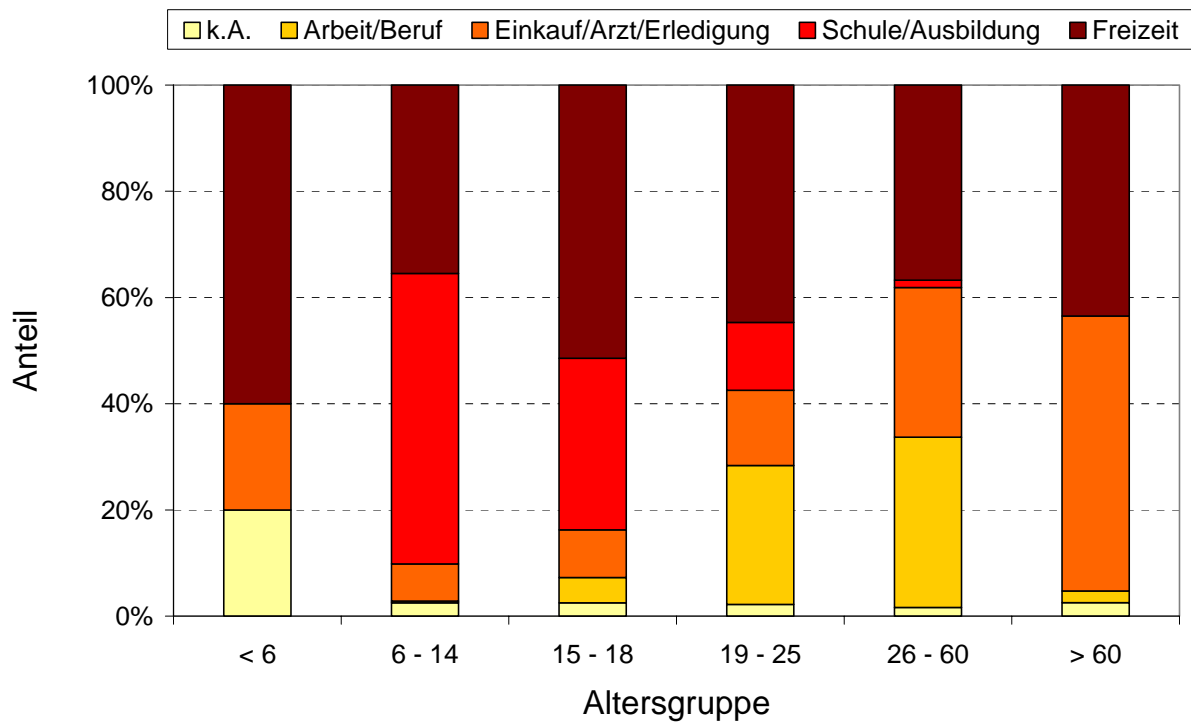
Abbildung 9 Fahrtzweck in Abhängigkeit der Tageszeit



Einteilung nach Altersgruppe

Der Anteil der Schüler/Studenten/Auszubildenden ist erwartungsgemäss bei den Jugendlichen am grössten. Genau so erwartungsgemäss sind im Arbeits-/Berufsverkehr hauptsächlich Erwachsene unter 60 Jahren anzutreffen. Der Anteil der „Freizeitfahrer“ ist über alle Altersgruppen verteilt etwa konstant. Zudem ist bei den über 60jährigen der Anteil des Einkaufsverkehrs sehr gross. Es ist anzumerken, dass teilweise die Bereiche „Freizeit“ und „Einkauf/Erledigung“ wahrscheinlich nicht strikt voneinander zu trennen sind, sondern Überschneidungen aufweisen.

Abbildung 10 Fahrtzweck in Abhängigkeit der Altersgruppe



4.2 Eigenschaften der erhobenen Routen

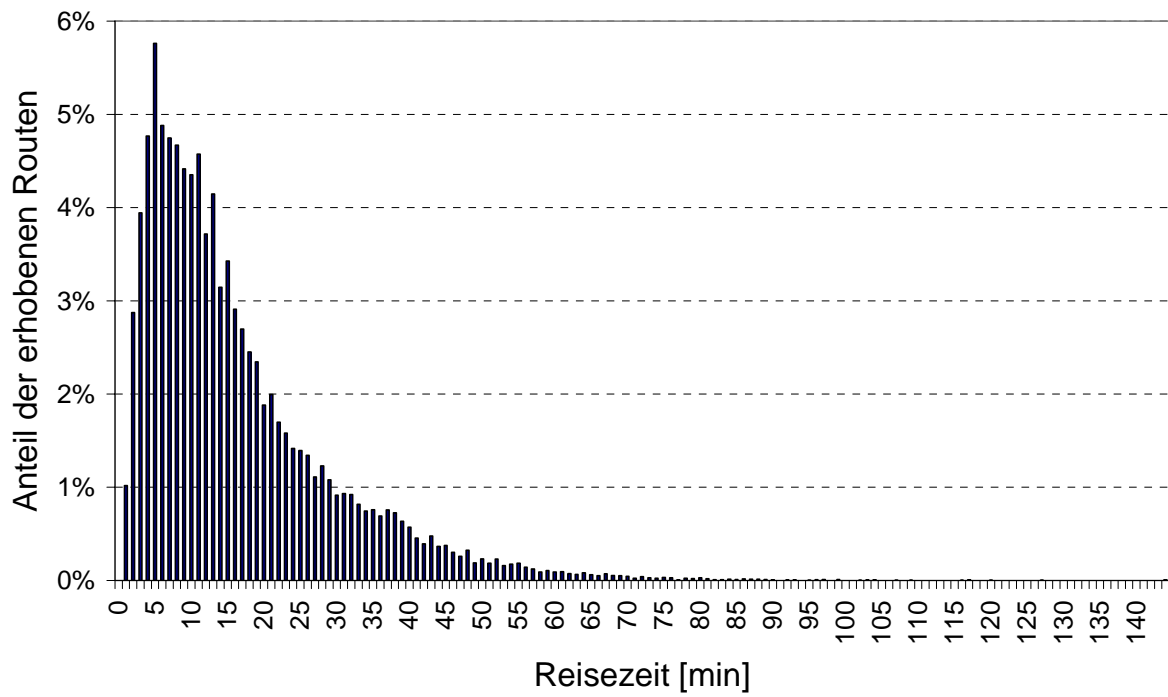
4.2.1 Reisezeit

Der Durchschnitt der erhobenen Routen hat eine mittellange Reisezeit, welche jedoch sehr stark streut. 50 % der Wege haben eine Reisezeit zwischen 7 und 22 Minuten. Dies sind für den ÖPNV recht plausible Werte. Kürzere Wege werden oft zu Fuss bewältigt, längere nicht mit städtischen Verkehrsmitteln. Die Verteilung der Reisezeiten ist aus Tabelle 1 und Abbildung 11 ersichtlich.

Tabelle 1 Reisezeiten der erhobenen Routen

Grösse	Wert
Mittelwert	16.3
Median	13.0
Standardabweichung	13.2
Varianz	174.5
Minimum	1.0
Maximum	144.0
Quantile	
5 %	3.0
25%	7.0
75 %	22.0
95 %	43.0

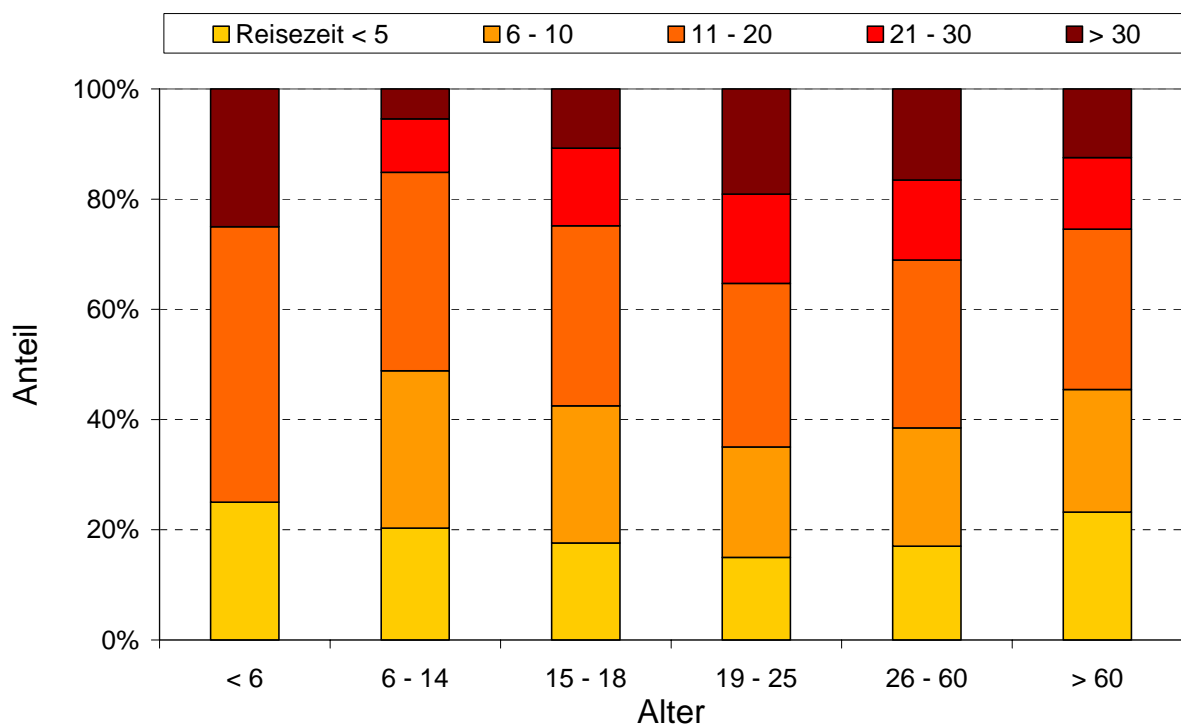
Abbildung 11 Reisezeiten der erhobenen Routen



Einteilung nach Altersklasse

Es wäre anzunehmen, dass auf sehr kurzen Wegen der Anteil älterer (mobilitätsbehinderter) Menschen überwiegt. Die obere Grenze von Wegen, welche noch zu Fuss zurückgelegt werden, dürfte in den jüngeren Altersklassen etwas höher liegen. Diese Hypothese wird bestätigt, wie Abbildung 12 zeigt. Der Anteil der sehr kurzen Wege ist bei den über 60jährigen tatsächlich leicht grösser als in den übrigen Altersgruppen. Zudem ist der Anteil dieser Wege bei den Kleinkindern recht gross. Auch dies erscheint logisch, da für Kinderwagen resp. Kleinkinder ein einer Fahrzeit von 5 Minuten entsprechender Fussweg von ca. 1 km bereits eine recht lange Distanz darstellt.

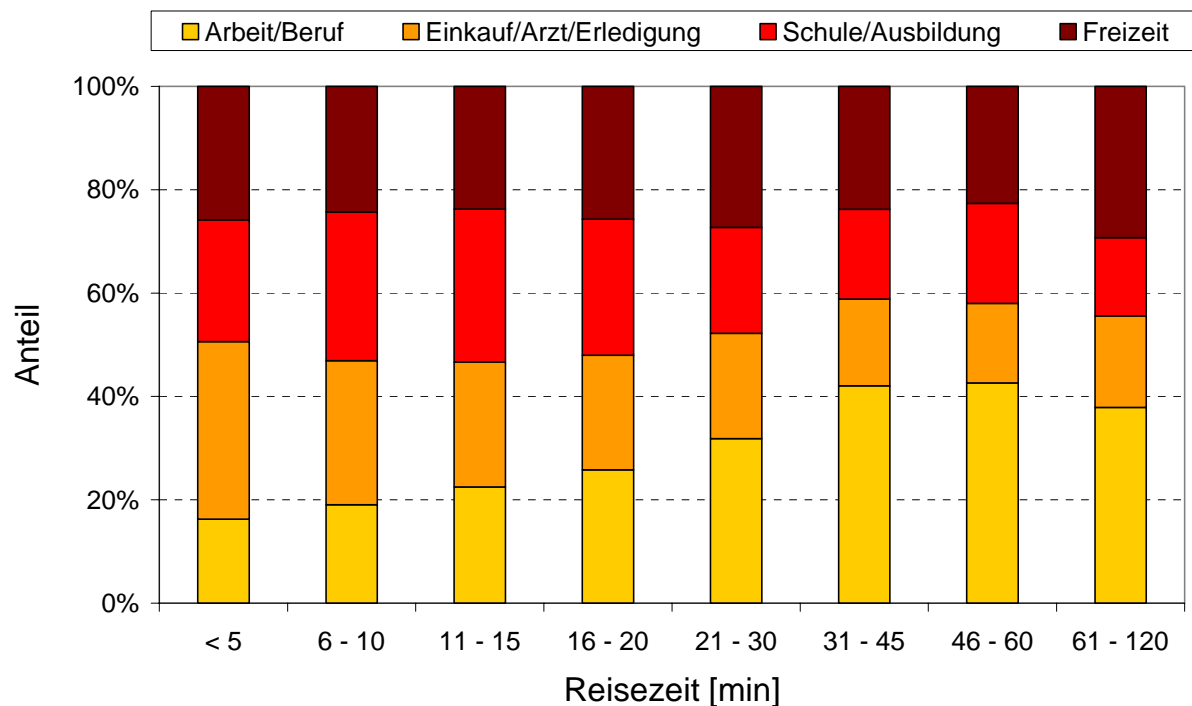
Abbildung 12 Reisezeit in Abhängigkeit der Altersgruppe



Einteilung nach Fahrtzweck

Hier wird erwartet, dass der grösste Anteil auf den kurzen Strecken dem Einkaufsverkehr zukommt, da eine kurze Strecke eher mit einem öffentlichen Verkehrsmittel gefahren wird, wenn schwere Einkaufstüten zu schleppen sind. Auch diese Hypothese wird bestätigt, wie Abbildung 13 zeigt. Bei den kurzen Wegen überwiegt der Einkaufs-, bei den langen der Pendlerverkehr. Der Anteil der Freizeitwege ist über sämtliche Kategorien etwa konstant.

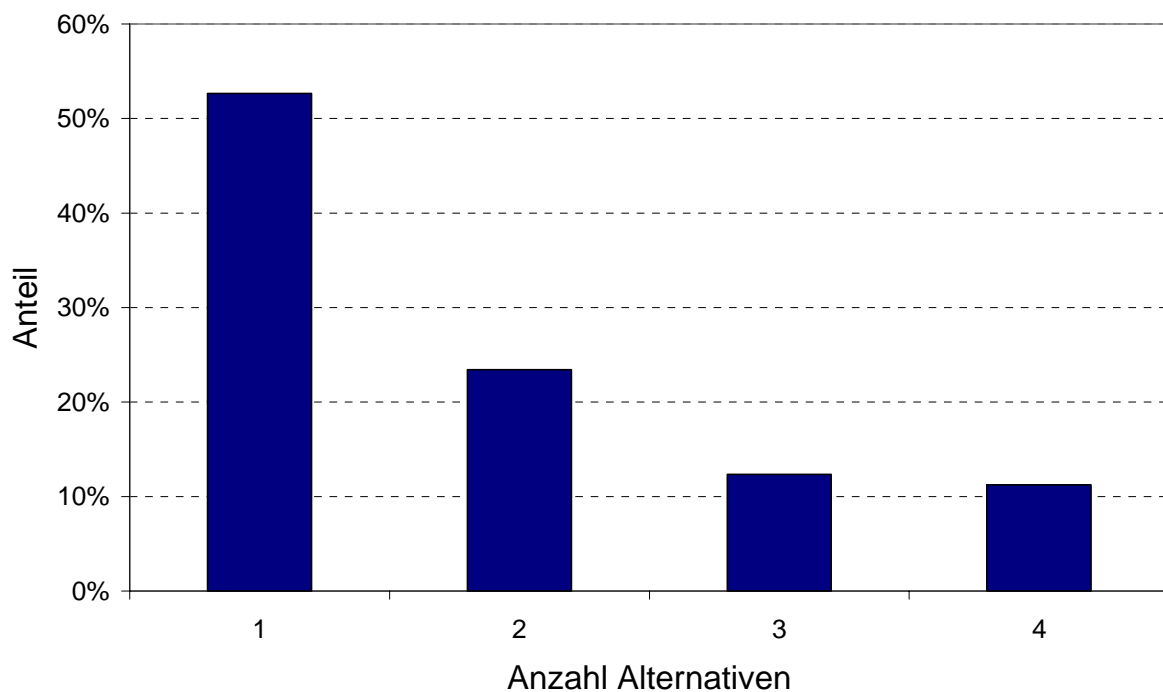
Abbildung 13 Reisezeit in Abhängigkeit des Fahrtzwecks



4.2.2 Anzahl Alternativrouten

In mehr als der Hälfte der Fälle gibt VISUM nur eine Alternative zur erhobenen Route aus. Die Häufigkeitsverteilung der Anzahl gefundener Routen ist aus ersichtlich. Die Fälle mit weniger als zwei Alternativen, in denen die gewählte die einzig mögliche Route ist, wurden ausgeschlossen.

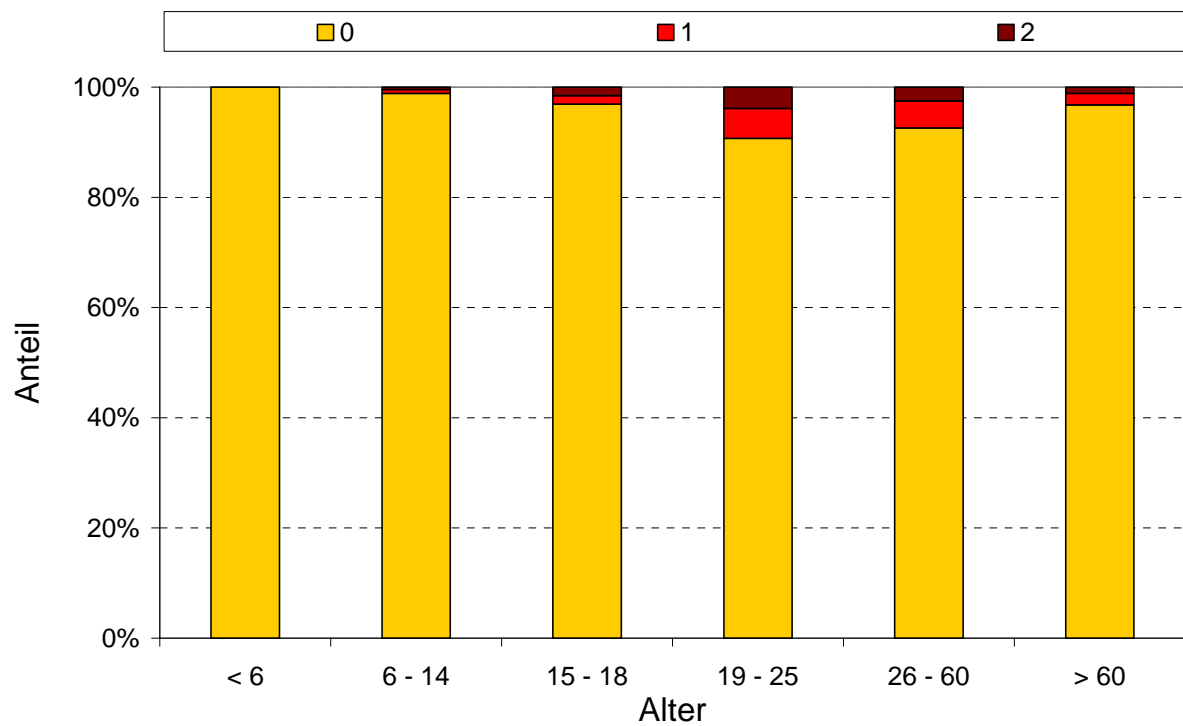
Abbildung 14 Anzahl Alternativrouten



4.2.3 Anzahl Umsteigevorgänge

Eine sehr grosse Mehrheit der erhobenen Routen sind direkt. Der Anteil der Umsteiger sinkt leicht mit zunehmendem Alter (Abbildung 15).

Abbildung 15 Umsteighäufigkeit in Abhängigkeit der Altersgruppe



4.2.4 Eigenständigkeit

In diesem Abschnitt wird versucht, den Eigenständigkeitsfaktor, welcher in Kapitel 5.3 definiert wird, mit den übrigen Routeneigenschaften in Verbindung zu bringen. Hierzu werden Boxplots verwendet. Es zeigt sich, dass die Eigenständigkeit einer Route mit zunehmender Länge grösser wird, für kürzere Routen also eher Alternativen mit ähnlichen Eigenschaften existieren als für längere (Abbildung 16). Ein Wert von $IND = 1$ bedeutet völlige Unabhängigkeit der Route von ihren Alternativen, kleinere Werte deuten auf grössere Ähnlichkeiten zwischen den Alternativen hin.

Auch bei den Eigenschaften Umsteigehäufigkeit und Übergangszeit zeigt sich dieser Trend: je häufiger umgestiegen wird resp. je länger die Übergangszeiten sind, desto weniger ähnlich sind die Routen ihren Alternativen. Diese Tendenzen werden durch die Boxplots in den Abbildungen 17 und 18 veranschaulicht.

Abbildung 16 Eigenständigkeit in Abhängigkeit der Reisezeit

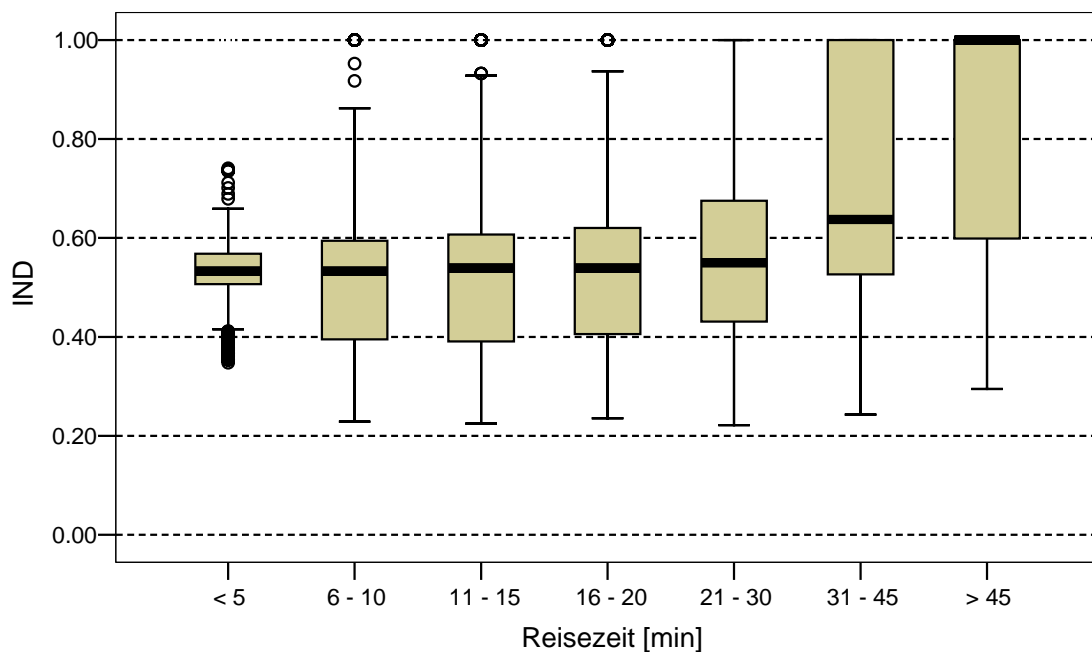


Abbildung 17 Eigenständigkeit in Abhängigkeit der Umsteigehäufigkeit

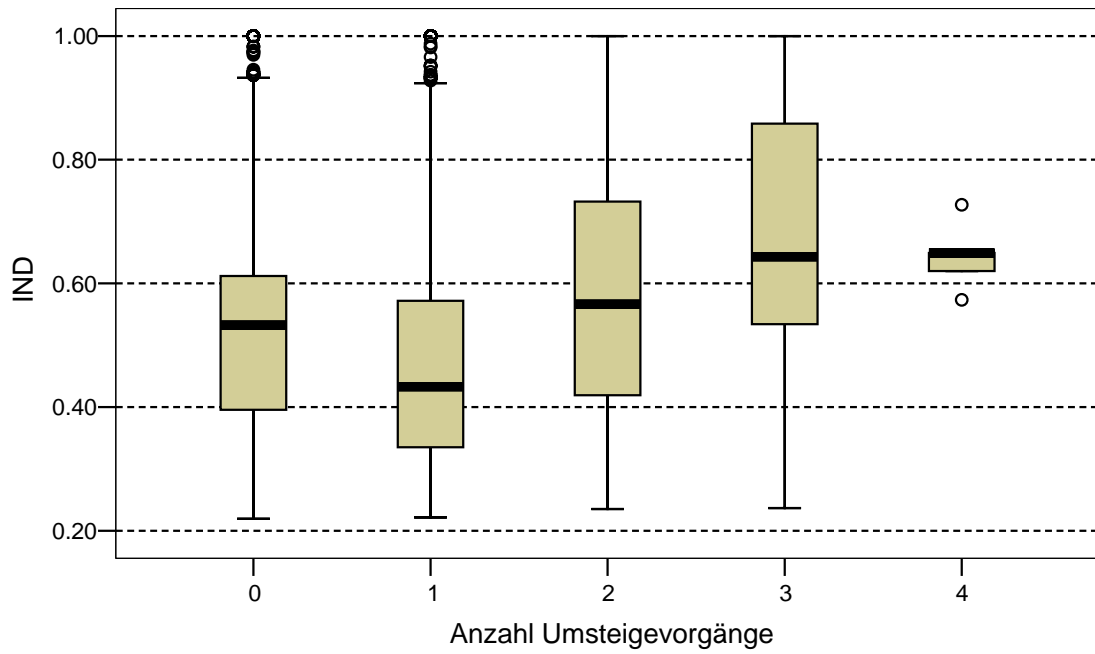
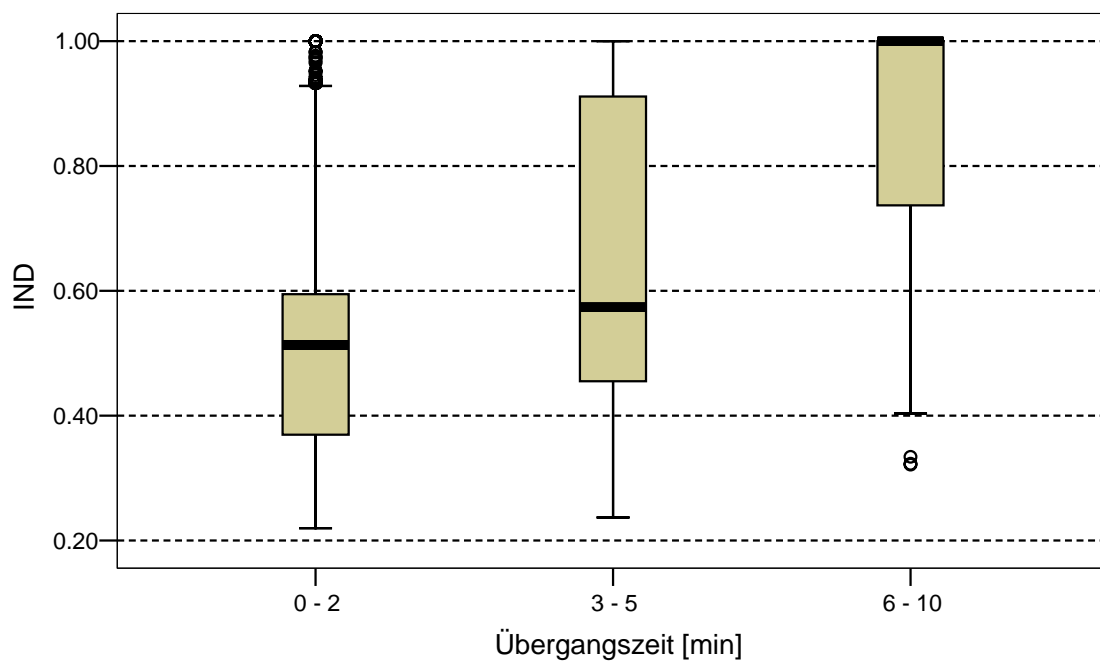


Abbildung 18 Eigenständigkeit in Abhängigkeit der Übergangszeit



5 Aufbereitung der Daten

5.1 Ermittlung der Routenalternativen

Nachdem die Rohdaten soweit bearbeitet wurden, dass die gewählten Routen mit all ihren wichtigen Eigenschaften in bereinigter Form vorhanden waren, sollten nun die jeweils anderen möglichen, jedoch nicht gewählten, Routen ermittelt werden.

Zu diesem Zweck wurde zuerst eine Umlegung der Quelle-Ziel-Matrix auf das VISUM-Netz durchgeführt, um dann das Programm eine Liste aller gefundenen Routen zwischen zwei Punkten ausgeben zu lassen. Diese Daten wurden mit den Programmen EXCEL und SPSS eingelesen und bearbeitet, um sie in dieselbe Form wie die vorliegende Datei mit den gewählten Routen zu bringen.

Diese zwei Datensätze wurden nun zusammengespielt, so dass schliesslich ein grosser Datensatz mit den Eigenschaften aller gewählten und nicht-gewählten Routen vorlag. Dieser wurde nun noch mit den Fahrplandaten aus VISUM ergänzt. Für jede gewählte Route wurde der bezüglich der Abfahrtszeit jeweils nächstgelegene alternative Kurs ermittelt. Der nun vorliegende Datensatz konnte dann zur deskriptiven Analyse und zur Berechnung der Ähnlichkeiten verwendet werden.

5.2 Eigenschaften der alternativen Routen

Der Vergleich der ermittelten Alternativen mit den gewählten Routen zeigt, dass die neu erzeugten Auswahlmöglichkeiten bei den kürzeren Routen grösstenteils noch direkt sind. Mit zunehmender Reisezeit nimmt hier jedoch die Umsteigehäufigkeit deutlich zu, während bei den gewählten Routen konstant wenige Umsteigevorgänge getätigt werden. Den Vergleich der Verläufe der Umsteigehäufigkeit in Funktion der Reisezeit zeigen die Boxplots in den Abbildungen 19 (für die gewählten Routen) und 20 (für die Alternativrouten).

Abbildung 19 Umsteigehäufigkeit in Abhängigkeit der Reisezeit für gewählte Routen

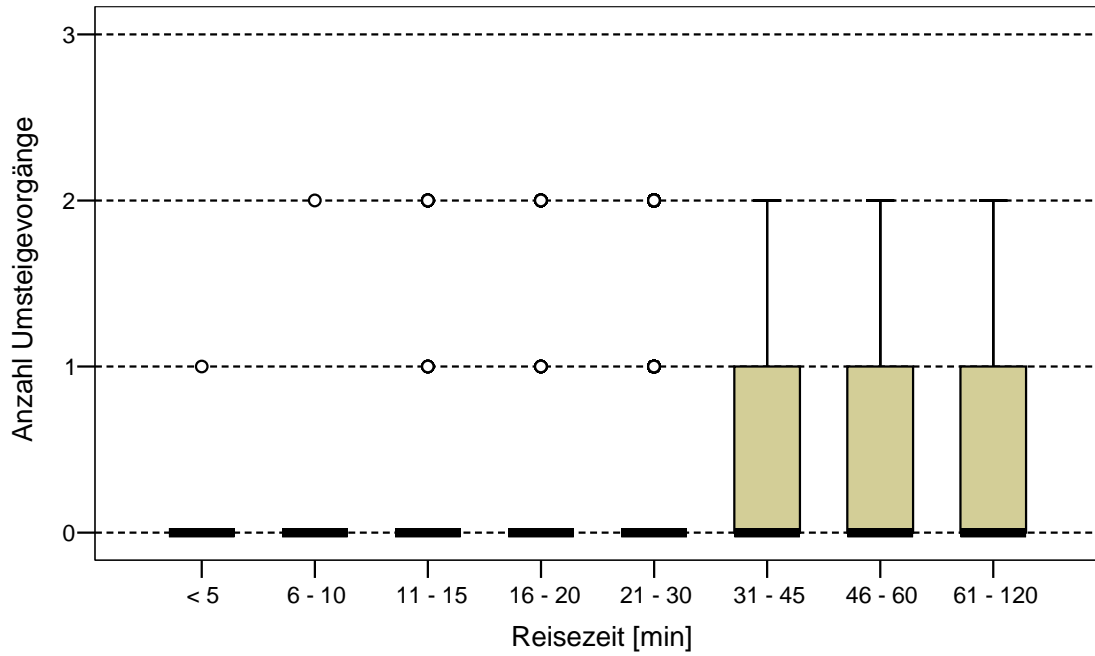
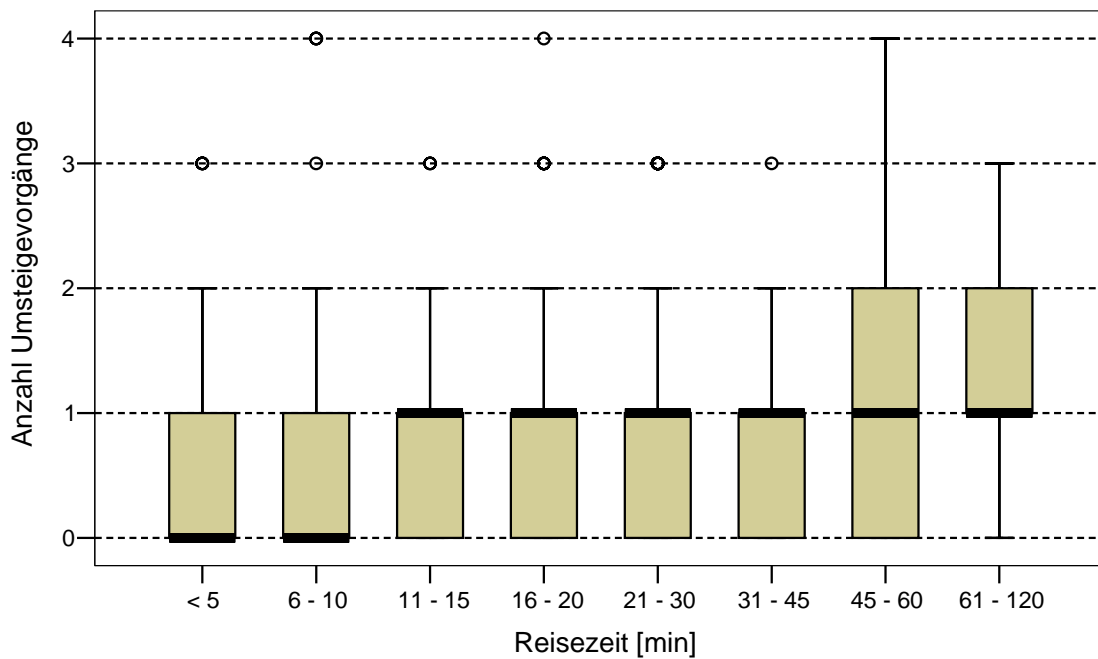


Abbildung 20 Umsteigehäufigkeit in Abhängigkeit der Reisezeit für ermittelte Alternativrouten



5.3 Berechnung der Ähnlichkeiten

Wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, wird in dieser Arbeit zur Berücksichtigung der Ähnlichkeiten zwischen Routen der Ansatz nach Friedrich, Hofsäss und Weckeck verwendet. Die besagten Ähnlichkeiten sind in Form der dimensionslosen Grösse IND (Unabhängigkeit/Eigenständigkeit), mit $0 < \text{IND} < 1$, gegeben; für jede Route wird kreuzweise ermittelt, wie gross ihre Unabhängigkeit von den anderen möglichen Routen ist.

Tabelle 2 enthält ein Beispiel der Berechnung der Eigenständigkeiten für einen Weg mit 5 Alternativen. Hierbei ist die empfundene Reisezeit PJT (perceived journey time) definiert als:

$$PJT = JT + 2 \cdot TT + 2 \cdot NT \quad (22)$$

JT Reisezeit (journey time)

TT Übergangszeit (transfer time)

NT Anzahl Umsteigevorgänge (number of transfers)

Tabelle 2 Beispiel für die Berechnung von Ähnlichkeiten

Route Nr. (Index <i>c</i>)	Startzeit	Ankunftszeit	JT	TT	NT	PJT	IND
1	16:49	16:57	8	0	0	8	0.37
2	17:11	17:18	7	2	1	13	0.98
3	16:47	16:54	7	1	1	11	0.34
4	16:47	16:55	8	3	1	16	0.34
5	16:49	17:02	13	5	2	27	0.40

Die Eigenständigkeit einer Route *c* gegenüber ihren Alternativen *c'* ist definiert als:

$$\text{IND}(c) = \frac{1}{\sum_{c' \in C} f_c(c')} = \frac{1}{1 + \sum_{c' \in C; c' \neq c} f_c(c')} \quad (23)$$

f_c ist eine positive Funktion mit Wertebereich $[0,1]$, welche den Einfluss aller *c'* auf *c* modelliert. Je grösser die Ähnlichkeit zwischen zwei Routen, desto grösser wird deren Einfluss aufeinander. Gibt es Unterschiede in der empfundenen Reisezeit (und dem Preis), so

übt die bessere Route einen grösseren Einfluss auf die schwächere aus als umgekehrt. Die Modellierung dieser Asymmetrie wird weiter unten erläutert.

Die zeitliche Übereinstimmung der Routen c und c' ist gegeben als:

$$x_c(c') = \frac{|DEP(c) - DEP(c')| + |ARR(c) - ARR(c')|}{2} \quad (24)$$

$DEP(c)$ Abfahrtszeit der Route c

$ARR(c)$ Ankunftszeit der Route c

Der Vorteil von c gegenüber c' in Bezug auf die empfundene Reisezeit ist:

$$y_c(c') = PJT(c') - PJT(c) \quad (25)$$

z_c , Der preisliche Vorteil von c gegenüber c' , wird hier nicht berücksichtigt (i.e., gleich 0 gesetzt), da die Fahrpreise im vorliegenden Datensatz nicht vorhanden sind und daher davon ausgegangen wird, dass alle Routen zwischen demselben Quelle-Ziel-Paar denselben Fahrpreis aufweisen.

f_c ist nun wie folgt gegeben:

$$f_c(c') = \left(1 - \frac{x_c(c')}{s_x}\right) \cdot \left(1 - \gamma \cdot \min\left(1, \frac{s_z \cdot |y_c(c')| + s_y \cdot |z_c(c')|}{s_y \cdot s_z}\right)\right) \quad (26)$$

s_x maximaler zeitlicher Abstand, bei dem eine Wirkung von c auf c' möglich ist

s_y maximaler zeitlicher Vor- bzw. Nachteil, bei welchem eine Wirkung von c auf c' möglich ist; die vorher erwähnte Asymmetrie wird dadurch berücksichtigt, dass $s_y^+ = 2s_y^-$ gesetzt wird

γ globale Konstante, welche die absolute Wirkung des zweiten Faktors kontrolliert

Für die Berechnungen in dieser Arbeit wurden folgende Werte (s_i in Minuten) angenommen:

$$s_x = 20$$

$$s_y^+ = 20$$

$$s_y^- = 10$$

$$\gamma = 0.5$$

Folgende Tabellen zeigen die einzelnen Berechnungsschritte für das Beispiel aus Tabelle 2.

Tabelle 3 Beispiel für die Berechnung von $x_c(c')$

DEP(c)	ARR(c)	$x_c(c') = \frac{ DEP(c) - DEP(c') + ARR(c) - ARR(c') }{2}$					
		c'	1	2	3	4	5
		c					
16:49	16:57	1	0	22	3	2	3
17:11	17:18	2	22	0	24	24	19
16:47	16:54	3	3	24	0	1	5
16:47	16:55	4	2	24	1	0	5
16:49	17:02	5	3	19	5	5	0

Tabelle 4 Beispiel für die Berechnung von $y_c(c')$

PJT(c)	$y_c(c') = PJT(c') - PJT(c)$					
	c'	1	2	3	4	5
	c					
8	1	0	-5	-3	-8	-19
13	2	5	0	2	-3	-14
11	3	3	-2	0	-5	-16
16	4	8	3	5	0	-11
27	5	19	14	16	11	0

Tabelle 5 Beispiel für die Berechnung von $f_c(c')$

$$f_c(c') = \left(1 - \frac{x_c(c')}{s_x} \right) \cdot \left(1 - \gamma \cdot \min \left(1, \frac{s_z \cdot |y_c(c')| + s_y \cdot |z_c(c')|}{s_y \cdot s_z} \right) \right)$$

						IND(c)	
	c'	1	2	3	4	5	
c							
1		1.00	0.00	0.74	0.54	0.44	0.37
2		0.00	1.00	0.00	0.00	0.03	0.98
3		0.81	0.00	1.00	0.73	0.38	0.34
4		0.72	0.00	0.85	1.00	0.39	0.34
5		0.46	0.03	0.45	0.56	1.00	0.40

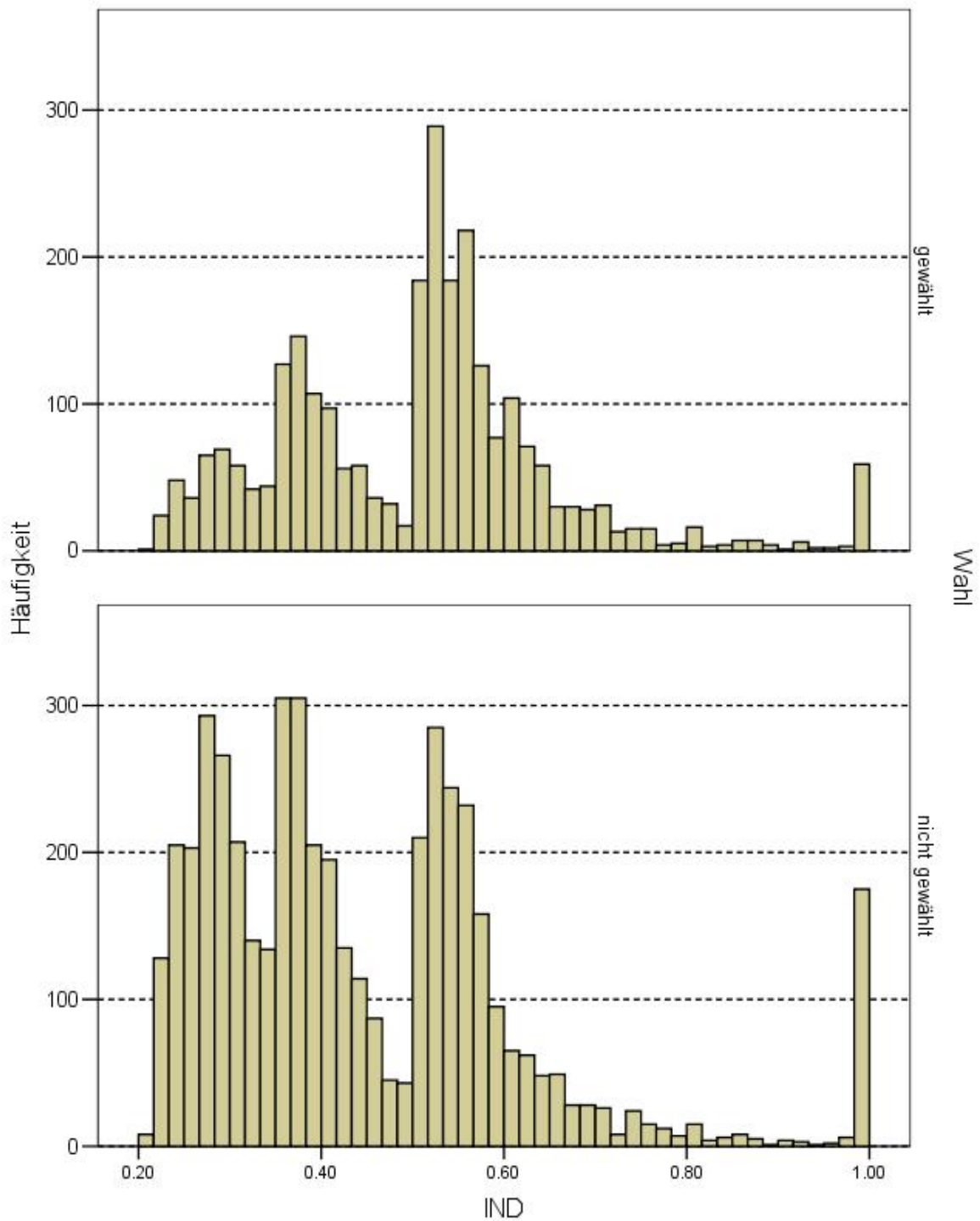
Zur Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeiten der verschiedenen Routenalternativen wird in der Literatur die folgende Abänderung des MNL-Modells vorgenommen:

$$P_i = \frac{e^{V_i} \cdot IND_i}{\sum_{j=1}^n e^{V_j} \cdot IND_j} = \frac{e^{V_i + \ln(IND_i)}}{\sum_{j=1}^n e^{V_j + \ln(IND_j)}} \quad (27)$$

Die Modellform ist also dieselbe wie beim C- bzw. Path-Size-Logit-Modell. Dieser Ansatz zur Ergänzung der Nutzenfunktionen wird im folgenden Kapitel untersucht und weiterentwickelt.

Abbildung 21 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Werte der Eigenständigkeit für die gewählten und nicht gewählten Alternativen.

Abbildung 21 Eigenständigkeiten gewählter und nicht gewählter Routenalternativen



6 Schätzung der Entscheidungsmodelle

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Modelle, deren Schätzungen im Rahmen dieser Arbeit berechnet wurden, vorgestellt und die interessantesten darunter näher untersucht.

Es werden zum einen Modelle geschätzt, die nur von den Eigenschaften der Routen abhängig sind, dies mit dem Ziel, den Einfluss des Eigenständigkeitsfaktors auf die Routenwahl zu ermitteln. Das Beste dieser Modelle soll im Anschluss für die Anwendung auf ein praktisches Beispiel verwendet werden.

Andererseits werden verschiedene Modellansätze erprobt, bei denen Interaktionen zwischen Routeneigenschaften und soziodemographischen Variablen untersucht wird.

Die Beschreibung der verschiedenen verwendeten Variablen und derer Einheiten befindet sich im Anhang (Tabelle 36).

Für die verschiedenen Modelle werden die Werte der geschätzten Parameter und deren Wirkung sowie zur Bestimmung der Signifikanz der Parameter deren Standardabweichungen und die Ergebnisse des t-Tests untersucht. Die Testgrösse t wird von BIOGEME berechnet als:

$$t = \frac{\beta}{\sigma}$$

σ Standardfehler von β

Ein Parameter ist signifikant (verschieden von 0), wenn der Absolutwert von t grösser ist als 1.96 (der 95%-Fraktilewert der t-Verteilung).

6.1 Basis-Modelle

Der Eigenständigkeitsfaktor IND, dessen Berechnung im vorherigen Kapitel hergeleitet wurde, soll nun mit verschiedenen Ansätzen in die Nutzenfunktion eingebracht werden. Die

Schätzung der daraus resultierenden MNL-Modelle soll zu einer Optimierung dieser funktionalen Ansätze führen.

6.1.1 Lineare Ansätze

Zunächst wird ein sehr einfacher Modellansatz verwendet, welcher als Nutzenfunktion eine reine Linearkombination der Routeneigenschaften annimmt:

$$U = \beta_{RZeit} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot UebZ \quad (28)$$

Die Bedeutung der einzelnen Variablen ist in Anhang 1 beschrieben. Die Ergebnisse der Schätzung von Modell (28) sind aus Tabelle 6 ersichtlich.

Tabelle 6 Ergebnisse der Schätzung für Modell (28)

Parameter	Wert	Standardabweichung	t-Test
β_{RZeit}	-0.679	0.024	-28.336
β_{Umst}	-1.159	0.067	-17.254
β_{UebZ}	-1.208	0.071	-17.142
Log-Likelihood:	$\ln(L) = -1473.8, \rho^2 = 0.43$		

Wie erwartet fließen Reisezeit, Umsteigehäufigkeit und Übergangszeit jeweils negativ in die Nutzenfunktion ein. Die Güte der Modellschätzung ist für diesen Grundansatz bereits recht gut, er kann also als Basis für weitere Ansätze verwendet werden.

Als nächstes wird der Eigenständigkeitsfaktor IND in die Nutzenfunktion eingeführt, dies zunächst auch als linearer Term:

$$U = \beta_{RZeit} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot UebZ + \beta_{IND} \cdot IND, \quad (29)$$

dann mit zwei leicht verschiedenen logarithmischen Ansätzen:

$$U = \beta_{RZeit} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot UebZ + \ln(IND) \quad (30)$$

(dies ist die allgemein in der Literatur verwendete Modellform, siehe Formel (27))

und

$$U = \beta_{RZeit} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot UebZ + \beta_{IND} \cdot \ln(IND), \quad (31)$$

sowie als Box-Cox-transformierte Variable:

$$U = \beta_{RZeit} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot UebZ + T(IND) \quad (32)$$

resp.

$$U = \beta_{RZeit} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot UebZ + \beta_{IND} \cdot T(IND) \quad (33)$$

Die Definition der Box-Cox-Transformation befindet sich im Glossar. Von diesen „linearen“ Modellen liefert Modell (33) die besten Ergebnisse. Diese sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7 Ergebnisse der Schätzung für Modell (33)

Parameter	Wert	Standardabweichung	t-Test
β_{RZeit}	-0.705	0.025	-28.604
β_{Umst}	-1.194	0.068	-17.425
β_{UebZ}	-1.302	0.072	-17.988
β_{IND}	0.051	0.033	1.533
λ	-3.999	0.532	-7.516
Log-Likelihood:	$\ln(L) = -1444.8, \rho^2 = 0.44$		

Die Einführung der Box-Cox-transformierten Variable IND hat zu einer Verbesserung der Log-Likelihood-Schätzung des Modells geführt. Dieser Ansatz sollte also dem logarithmischen vorgezogen werden. Die Unterschiede zwischen den beiden Ansätzen liegen vor allem im Wertebereich von IND unter 0.3, wo die Box-Cox-Funktion aufgrund des recht grossen Absolutwerts von λ sehr steil verläuft (siehe auch Abbildung 22).

6.1.2 Nichtlineare Ansätze

Die bisher untersuchten Modelle werden nun erweitert, indem die Routeneigenschaften nicht mehr als lineare Terme in die Nutzenfunktionen einfließen, sondern zusätzlich einen

Exponenten erhalten. Die Nutzenfunktionen mit den verschiedenen Ansätzen für die Eigenständigkeit befinden sich in Tabelle 8.

Tabelle 8 Nutzenfunktionen mit nicht-linearem Ansatz für die Routeneigenschaften

U =

$$\beta_{RZeit} \cdot RZeit^{e_{RZeit}} + \beta_{Umst} \cdot Umst^{e_{Umst}} + \beta_{UebZ} \cdot UebZ^{e_{UebZ}} + \beta_{IND} \cdot IND^{e_{IND}} \quad (34)$$

$$\beta_{RZeit} \cdot RZeit^{e_{RZeit}} + \beta_{Umst} \cdot Umst^{e_{Umst}} + \beta_{UebZ} \cdot UebZ^{e_{UebZ}} + \ln(IND) \quad (35)$$

$$\beta_{RZeit} \cdot RZeit^{e_{RZeit}} + \beta_{Umst} \cdot Umst^{e_{Umst}} + \beta_{UebZ} \cdot UebZ^{e_{UebZ}} + \beta_{IND} \cdot \ln(IND) \quad (36)$$

$$\beta_{RZeit} \cdot RZeit^{e_{RZeit}} + \beta_{Umst} \cdot Umst^{e_{Umst}} + \beta_{UebZ} \cdot UebZ^{e_{UebZ}} + T(IND) \quad (37)$$

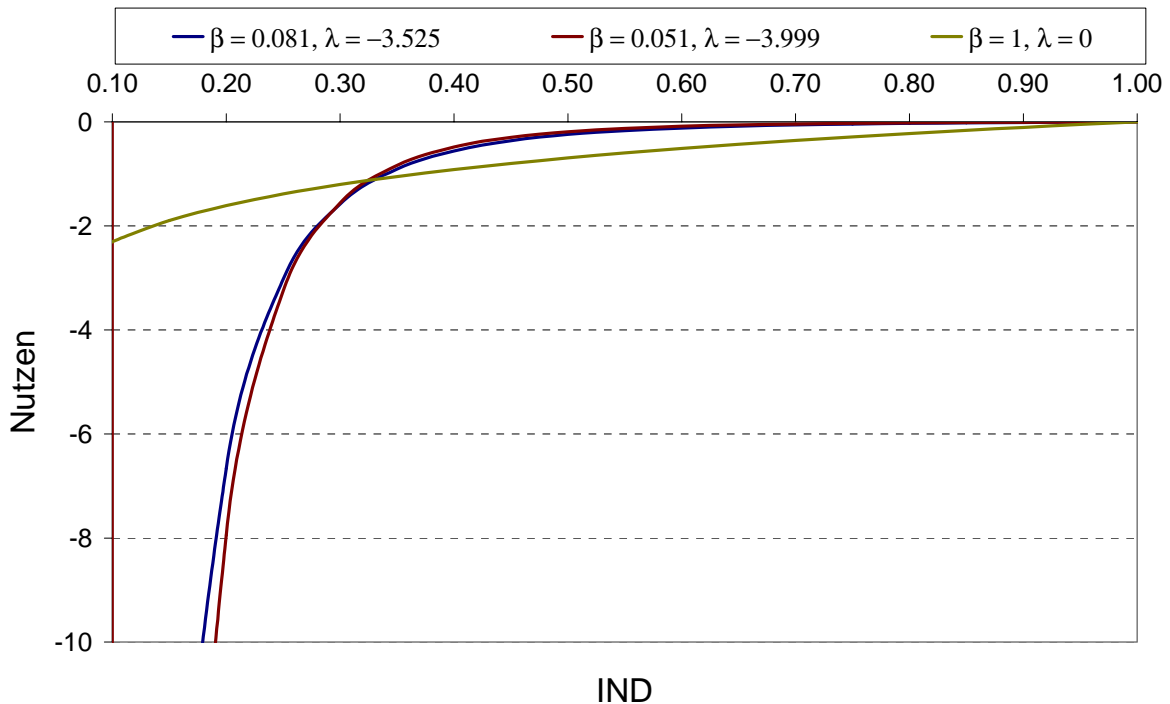
$$\beta_{RZeit} \cdot RZeit^{e_{RZeit}} + \beta_{Umst} \cdot Umst^{e_{Umst}} + \beta_{UebZ} \cdot UebZ^{e_{UebZ}} + \beta_{IND} \cdot T(IND) \quad (38)$$

Auch hier ist die Modellgüte beim letzten Ansatz wieder am besten. Die detaillierten Ergebnisse für dieses Modell (38) sind in Tabelle 9 aufgeführt, Abbildung 22 zeigt die Nutzenfunktion in Abhängigkeit von IND für den linearen sowie für den nichtlinearen Ansatz. Der Einfluss der Eigenständigkeit ist für beide Modelle praktisch identisch. Der Nutzen und somit die Auswahlwahrscheinlichkeit steigt mit zunehmender Eigenständigkeit einer Route. Zum Vergleich enthält Abbildung 22 auch den Verlauf der logarithmischen Funktion.

Tabelle 9 Ergebnisse der Schätzung für Modell (38)

Parameter	Wert	Standardabweichung	t-Test
β_{RZeit}	-50.116	17.339	-2.890
e_{RZeit}	0.156	0.039	4.021
β_{Umst}	-1.262	0.082	-15.414
e_{Umst}	0.811	0.122	6.621
β_{UebZ}	-2.043	0.136	-14.995
e_{UebZ}	0.385	0.057	6.736
β_{IND}	0.081	0.054	1.501
λ	-3.525	0.054	-6.340
Log-Likelihood:	$\ln(L) = -1165.5, \rho^2 = 0.55$		

Abbildung 22 Einfluss von IND auf die Nutzenfunktionen für Modelle (33) und (38)



In einem nächsten Ansatz werden die zeitlichen Variablen (Reise- und Übergangszeit) auch mit einer Box-Cox-Transformation in die Nutzenfunktion eingeführt, die Umsteigehäufigkeit verbleibt als additiver linearer resp. nichtlinearer Term. Die Nutzenfunktionen sind aus Tabelle 10 ersichtlich.

Tabelle 10 Nutzenfunktionen mit Box-Cox-Ansatz für die zeitlichen Variablen

U =

$$\beta_{RZeit} \cdot T(RZeit) + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot T(UebZ) + \beta_{IND} \cdot T(IND) \quad (39)$$

$$\beta_{RZeit} \cdot T(RZeit) + \beta_{Umst} \cdot Umst^{e_{Umst}} + \beta_{UebZ} \cdot T(UebZ) + \beta_{IND} \cdot T(IND) \quad (40)$$

Diese beiden Modelle führen zu einer guten Log-Likelihood, wobei der zweite Ansatz noch etwas besser abschneidet. Die Ergebnisse der Schätzung von Modell (40) sind aus Tabelle 11 ersichtlich.

Tabelle 11 Ergebnisse der Schätzung für Modell (40)

Parameter	Wert	Standardabweichung	t-Test
β_{RZeit}	-7.810	0.793	-9.849
λ_{RZeit}	0.156	0.039	4.018
β_{Umst}	-1.262	0.082	-15.414
e_{Umst}	0.811	0.122	6.621
β_{UebZ}	-0.786	0.095	-8.293
λ_{UebZ}	0.385	0.057	6.736
β_{IND}	0.081	0.054	1.501
λ	-3.525	0.054	-6.340
Log-Likelihood:	$\ln(L) = -1165.5, \rho^2 = 0.55$		

Die Ergebnisse der Modelle (38) und (40) ähneln sich in ihrer Form sehr und unterscheiden sich nur durch eine additive Konstante (siehe Abbildung 23). Dies soll nun bewiesen werden. Es sei:

$$\beta_1 \cdot x^\lambda = \beta_2 \cdot \frac{x^\lambda - 1}{\lambda} + c \quad \Leftrightarrow \quad c = \frac{x^\lambda (\lambda \cdot \beta_1 - \beta_2) + \beta_2}{\lambda}$$

Damit c eine Konstante ist, muss es unabhängig von x sein, der Faktor $\lambda \cdot \beta_1 - \beta_2$ muss also gleich 0 sein. Diese Beziehung stimmt beim Vergleich der beiden betrachteten Modelle für beide Parameter (Reisezeit und Übergangszeit), womit also bewiesen ist, dass der Unterschied in der Nutzenfunktion sich tatsächlich auf eine additive Konstante beschränkt und für diese $c = \frac{\beta_2}{\lambda} = \beta_1$ gilt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Box-Cox-Funktion im Gegensatz zur Nutzenfunktion beim nichtlinearen Ansatz nicht durch den Nullpunkt verläuft.

Dieser konstante Unterschied hat jedoch keinen Einfluss auf die spätere Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeiten. Der einfache mathematische Beweis dieser Eigenschaft folgt:

$$P_{i,Modell1} = \frac{e^{U_i}}{\sum_j e^{U_j}}, \quad P_{i,Modell2} = \frac{e^{U_i+c}}{\sum_j e^{U_j+c}}$$

$$\begin{aligned} \text{Es gilt nun: } P_{i, \text{Modell1}} = P_{i, \text{Modell2}} &\Leftrightarrow \frac{e^{U_i}}{\sum_j e^{U_j}} = \frac{e^{U_i+c}}{\sum_j e^{U_j+c}} \\ &\Leftrightarrow \frac{e^{U_i}}{\sum_j e^{U_j}} = \frac{e^c \cdot e^{U_i}}{e^c \cdot \sum_j e^{U_j}} \end{aligned}$$

Durch Wegkürzen von e^c im rechten Glied wird die Gleichheit hergestellt, und der Beweis ist erbracht. Die beiden Modelle sind also völlig äquivalent, und einer der beiden Ansätze kann später für die Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeiten und die Durchführung der Simulation verwendet werden.

Die Eigenschaft des konstanten Unterschieds im Nutzen zwischen den beiden Modellen verdeutlicht die Visualisierung der Modellergebnisse in folgenden Abbildungen. Es sind die Nutzenfunktionen für die jeweilige Routeneigenschaft für die Modellansätze (33), (38) und (40) und für verschiedene Werte von IND dargestellt.

Abbildung 23 Nutzenfunktionen in Abhängigkeit der Reisezeit für verschiedene Modellansätze

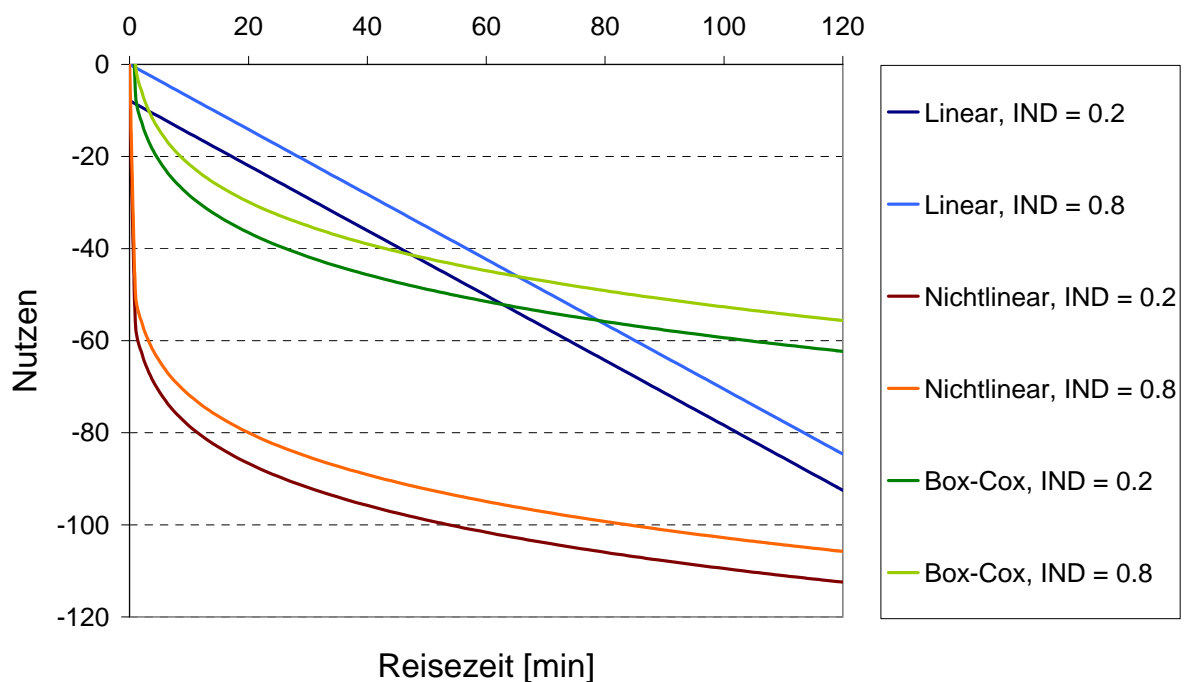


Abbildung 24 Nutzenfunktionen in Abhängigkeit der Umsteigehäufigkeit für verschiedene Modellansätze

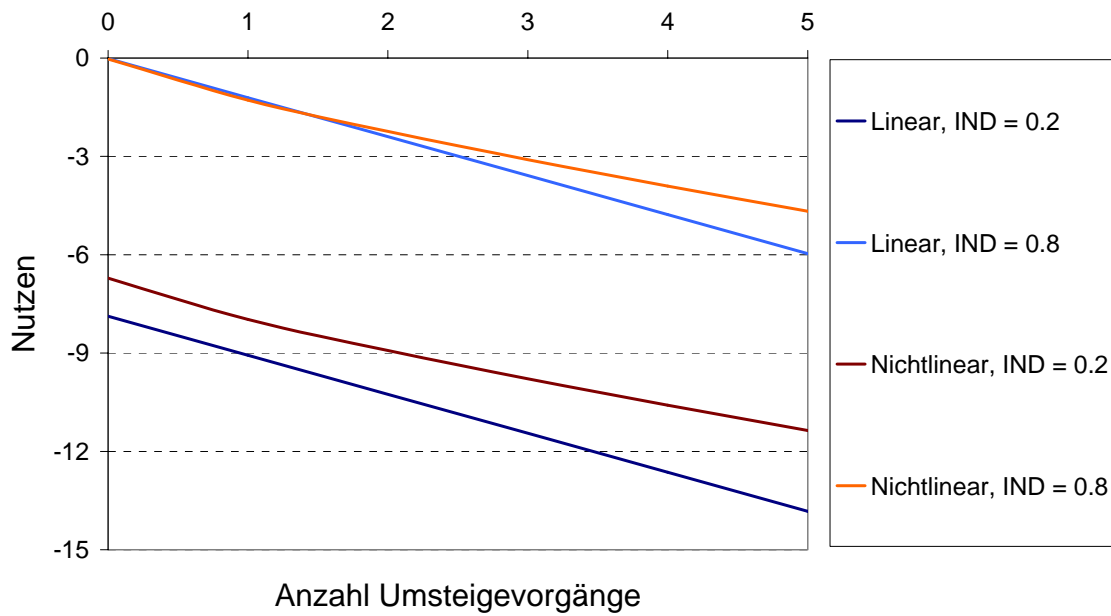
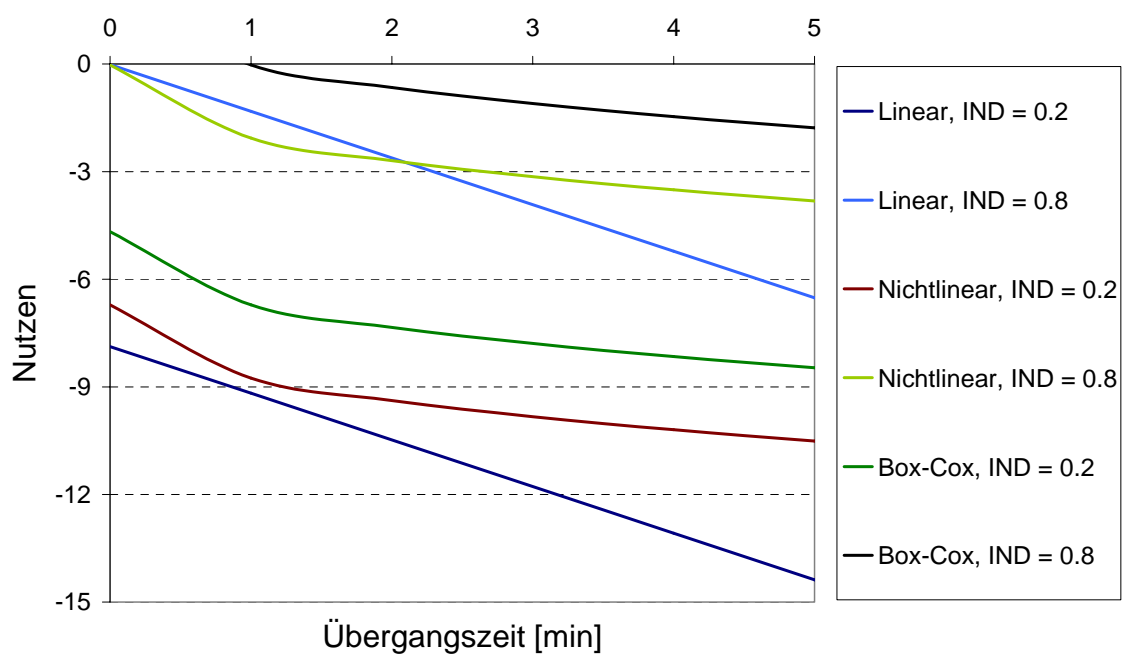


Abbildung 25 Nutzenfunktionen in Abhängigkeit der Übergangszeit für verschiedene Modellansätze



6.1.3 Multiplikative Ansätze

Ein weiterer Versuch, die Eigenständigkeit in die Nutzenfunktionen einzubinden, war die Multiplikation der Nutzenfunktionen mit dem Logarithmus, resp. der Box-Cox-Transformation von IND, also:

Tabelle 12 Nutzenfunktionen mit multiplikativem Ansatz

U =

$$\left(\beta_{RZeit} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot UebZ \right) \cdot \ln(IND) \quad (41)$$

$$\left(\beta_{RZeit} \cdot RZeit^{e_{RZeit}} + \beta_{Umst} \cdot Umst^{e_{Umst}} + \beta_{UebZ} \cdot UebZ^{e_{UebZ}} \right) \cdot \ln(IND) \quad (42)$$

$$\left(\beta_{RZeit} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot UebZ \right) \cdot T(IND) \quad (43)$$

$$\left(\beta_{RZeit} \cdot RZeit^{e_{RZeit}} + \beta_{Umst} \cdot Umst^{e_{Umst}} + \beta_{UebZ} \cdot UebZ^{e_{UebZ}} \right) \cdot T(IND) \quad (44)$$

Die Schätzung dieser Modelle ergab jedoch im Vergleich mit den vorherigen Ansätzen keine befriedigenden Ergebnisse (Modell (44) führte zu einer Log-Likelihood von -2299.6 bei $\rho^2 = 0.11$), so dass diese Modellgruppe nicht weiter untersucht wird.

6.1.4 Value of transfer

Hier soll untersucht und für verschiedene Modellansätze verglichen werden, wie das Umsteigen gegenüber der Reisezeit bewertet wird, d.h.: dem negativen Nutzen welches Zeitverlusts entspricht ein Umsteigevorgang? Die betrachteten Modelle sind (28), (33) und (38).

Die value of transfer errechnet sich, indem der Faktor der β 's für die Umsteigehäufigkeit und für die Reisezeit gebildet wird. Die Ergebnisse für Modelle (28) und (33) sind aus Tabelle 13 ersichtlich.

Tabelle 13 Reisezeitäquivalent des Umsteigens für Modelle (28) und (33)

Modell	Reisezeitäquivalent = $\frac{\beta_{Umst}}{\beta_{RZeit}} \left[\frac{\text{Minuten}}{\text{Umsteigevorgang}} \right]$	
28		1.71
33		1.69

Bei den linearen Modellansätzen ändert sich besagter Wert also durch die Berücksichtigung der Variable IND kaum. Beim nichtlinearen Ansatz (38) muss die Umrechnung von Umsteigevorgängen in Minuten für jeden Wert der Umsteigehäufigkeiten von Hand berechnet werden. Es soll gelten:

$$\beta_{Umst} \cdot Umst^{e_{Umst}} = \beta_{RZeit} \cdot RZeit^{e_{RZeit}} \Leftrightarrow RZeit = \left(\frac{\beta_{Umst}}{\beta_{RZeit}} \cdot Umst^{e_{Umst}} \right)^{-e_{RZeit}} \quad (45)$$

Die Werte für die Anzahl Umsteigevorgänge werden nun von 1 bis 4 variiert und jeweils die dazugehörige Reisezeit mit demselben negativen Nutzen bestimmt. Die Ergebnisse sind aus Tabelle 14 ersichtlich.

Tabelle 14 Reisezeitäquivalent des Umsteigens für Modell (38)

Anzahl Umsteigevorgänge	Reisezeitäquivalent für einen Umsteigevorgang [min]	
1		1.78
2		1.63
3		1.55
4		1.49

Es ist festzustellen, dass der Reisezeitäquivalent des Umsteigens für alle Modelle etwa gleich ist und mit unter 2 Minuten relativ tief liegt, allerdings dem für die Berechnung der empfundenen Reisezeit (Kapitel 5.3, Formel (22)) verwendeten Ansatz sehr nahe kommt.

6.1.5 Elastizitäten

Für Modell (38) wurden die Eigenelastizitäten für die verschiedenen Attribute berechnet. Die Eigenelastizität ist die prozentuale Änderung der Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative bei der Änderung eines Attributs um 1%. Für eine lineare Nutzenfunktion ist die Eigenelastizität wie folgt gegeben:

$$E_{P_i, x_i} = \beta \cdot x_i \cdot (1 - P_i) \quad (46)$$

β geschätzter Modellparameter für Eigenschaft x

P_i berechnete Auswahlwahrscheinlichkeit für Alternative i

Die allgemeine Form lautet:

$$E_{P_i, x_i} = \frac{\delta P_i}{\delta x_i} \cdot \frac{x_i}{P_i} \cdot (1 - P_i), \quad (47)$$

Für den nichtlinearen Ansatz von Modell (38) ergibt dies:

$$E_{P_i, x_i} = e_i \cdot \beta_i \cdot x_i^{e_i} \cdot (1 - P_i) \quad (48)$$

Im Datensatz werden nun alle gewählten Alternativen mit deren modellierten Auswahlwahrscheinlichkeiten betrachtet und für jeden Fall die Elastizität in Bezug auf die Reisezeit und die Übergangszeit berechnet. Die Ergebnisse sind aus den Tabellen 15 und 16 ersichtlich, die Boxplots in den Abbildungen 26 und 27 zeigen den Verlauf der Elastizitäten mit steigender Reise- bzw. Übergangszeit.

Tabelle 15 Elastizitäten Reisezeit

Reisezeit [min]	Mittelwert Elastizität
< 5	-4.15
6 – 10	-6.15
11 – 15	-7.13
16 – 20	-7.80
21 – 30	-8.32
30 – 45	-9.72
> 45	-10.30

Tabelle 16 Elastizitäten Übergangszeit

Übergangszeit [min]	Mittelwert Elastizität
< 2	0.00
2 – 5	-0.92
5 – 10	-1.65

Abbildung 26 Elastizitäten Reisezeit

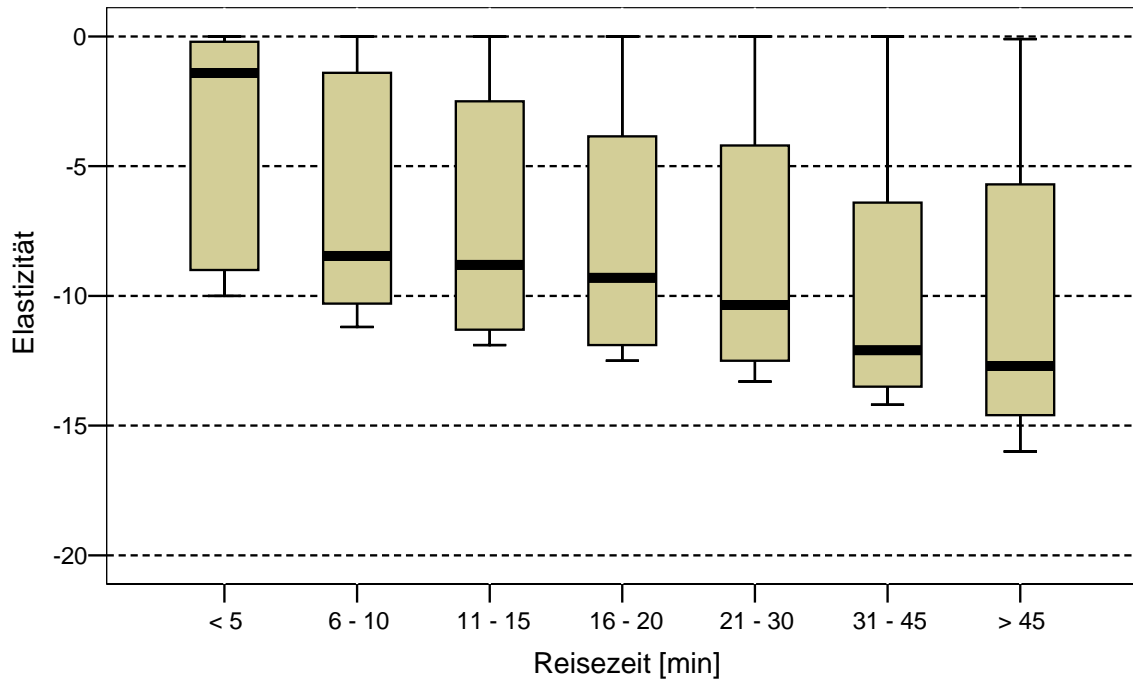
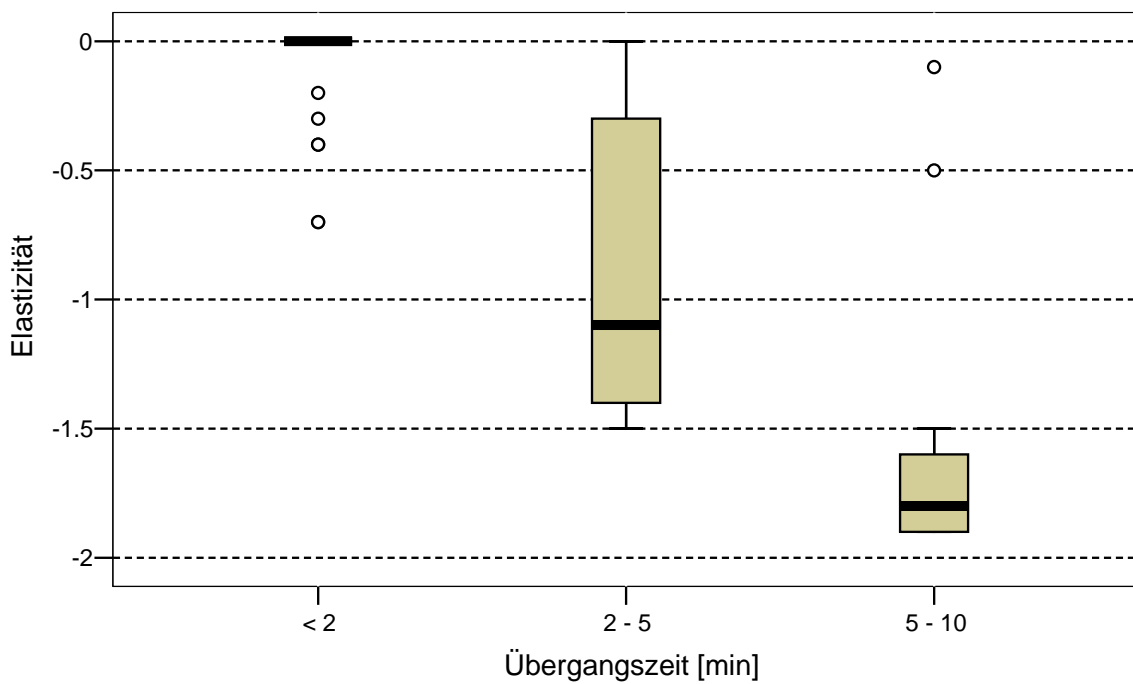


Abbildung 27 Elastizitäten Übergangszeit



6.1.6 EVA-Funktion

In einem letzten Ansatz soll das klassische Logit-Modell dem sogenannten EVA-Ansatz gegenübergestellt werden. Bei diesem ist die Bewertungswahrscheinlichkeit einer Alternative gegeben durch:

$$f(U) = (1+U)^{-\varphi(U)} \quad (49)$$

mit:

$$\varphi(W) = \frac{E}{1 + e^{F-G \cdot W}} \quad (50)$$

W Widerstand, negativer Nutzen

E, F, G positive Parameter

Für die Werte der Parameter E, F, G geben Schnabel und Lohse (1997) für den ÖPNV Wertebereiche an, welche in Tabelle 17 zusammengefasst sind.

Tabelle 17 Parameter der EVA-Funktion

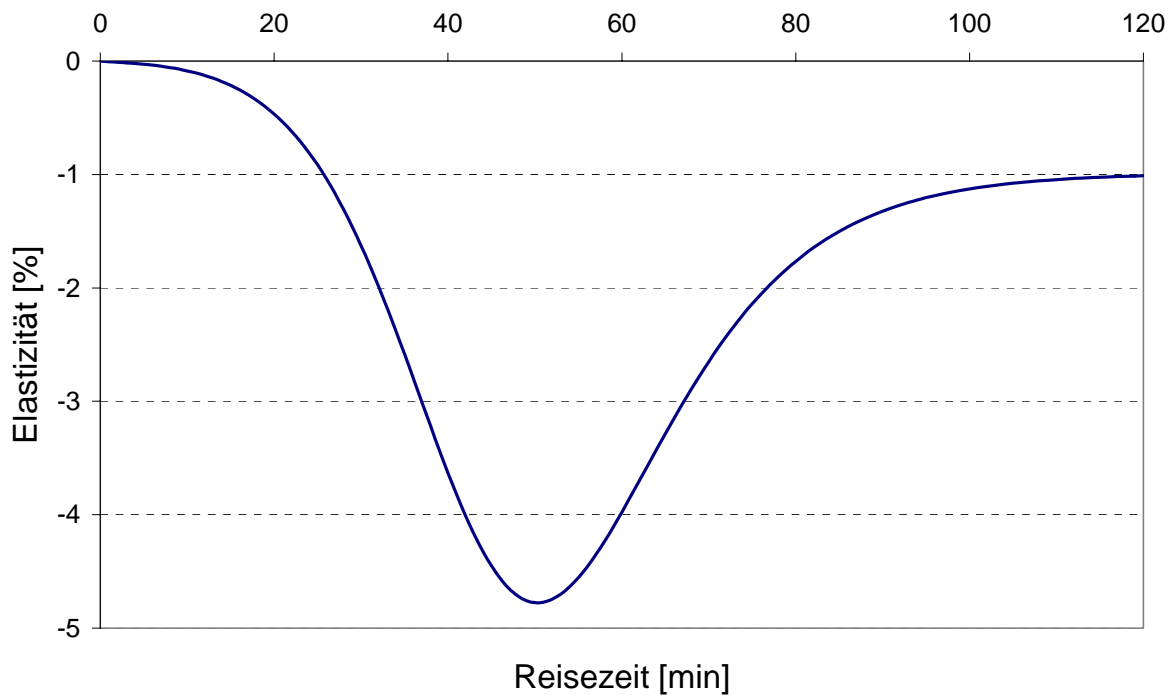
Parameter	Minimum	Maximum
E	0.50	1.50
F	3.00	6.00
G	0.05	0.25

Der Vorteil des EVA-Ansatzes gegenüber dem Logit-Modell, welches die Exponentialfunktion für die Berechnung der Bewertungswahrscheinlichkeiten verwendet, liegt in der wesentlich differenzierteren Elastizitätsfunktion. Die Elastizitäten sind gegeben durch:

$$E(W) = -\frac{E \cdot W}{1 + e^{F-G \cdot W}} \cdot \left[\frac{1}{1+W} + \ln(1+W) \cdot \frac{G \cdot e^{F-G \cdot W}}{1 + e^{F-G \cdot W}} \right] \quad (51)$$

Die Elastizitätsfunktion ist für den betrachteten Datensatz für die lineare Widerstandskomponente der Reisezeit aus Modell (28) in Abbildung 28 dargestellt.

Abbildung 28 Reisezeitelastizität: EVA-Funktion



Es ist ersichtlich, dass die Elastizität:

- für tiefe Reisezeiten (unter ca. 20 min) nahe an 0 liegt,
- im Bereich von ca. 20-90 Minuten ansteigt und
- sich bei sehr langen Reisezeiten einem Grenzwert annähert.

Diese Elastizitätsfunktion scheint einen plausibleren Verlauf aufzuzeigen und somit die wirkliche Situation besser zu beschreiben als die in Abbildung 26 dargestellte.

Die EVA-Funktion kann auch als Ersatz für die Formulierung der Nutzenfunktion für die Modellschätzung verstanden werden. Die zu schätzenden Parameter sind in diesem Fall die b 's sowie die Parameter E, F und G der EVA-Funktion. Um die Modellschätzung zu

vereinfachen, werden wieder lineare Ansätze für die Routenattribute sowie der Logarithmus für die IND-Variable verwendet. Die Nutzenfunktion ist also nun durch Formel (49) gegeben, wobei U die Form aus Modell (30) besitzt. Die Modellergebnisse sind aus Tabelle 18 ersichtlich. Der Parameter für die Umsteigehäufigkeit war nicht signifikant (wurde zu 0 geschätzt). Wie aus Tabelle 18 ersichtlich ist, wurde durch die Einführung der EVA-Funktion keine Verbesserung der Modellgüte erreicht.

Tabelle 18 Ergebnisse der Schätzung für Modell (49)

Parameter	Wert	Standardabweichung	t-Test
β_{RZeit}	1.66	0.96	1.74
β_{UebZ}	35.83	20.74	1.73
E	1.40	0.44	3.20
F	6.00	0.64	9.43
G	0.15	0.08	1.74
Log-Likelihood:	$\ln(L) = -2372.0, \rho^2 = 0.08$		

6.2 Modellierung der Wechselwirkungen zwischen den Routeneigenschaften

Bei diesen Modellen wird versucht, die Einflüsse der verschiedenen Routeneigenschaften nicht mehr separat zu betrachten, sondern eine Interaktion zwischen ihnen festzustellen.

6.2.1 Reisedistanz

Zunächst wird die Reisedistanz, gewichtet mit dem Durchschnitt aller Routen, in die Nutzenfunktion eingefügt und in Korrelation mit den Eigenschaften Reisezeit, Umsteigehäufigkeit und Übergangszeit gebracht. Die Nutzenfunktion sieht hier wie folgt aus:

$$U = \beta_{RZeit} \cdot \left(\frac{Dist}{Dist}\right)^{e_{RZeit}} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot \left(\frac{Dist}{Dist}\right)^{e_{Umst}} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot \left(\frac{Dist}{Dist}\right)^{e_{UebZ}} \cdot UebZ \quad (52)$$

$$U = \sum_{i=1}^3 \beta_i \cdot \left(\frac{Dist}{Dist}\right)^{e_i} \cdot Eigenschaft_i \quad (53)$$

Zusätzlich wird noch die Eigenständigkeit mit dem im vorherigen Kapitel ermittelten Ansatz in die Nutzenfunktion eingeführt, so dass diese wie folgt lautet:

$$U = \sum_{i=1}^3 \beta_i \cdot \left(\frac{Dist}{Dist} \right)^{e_i} \cdot Eigenschaft_i + \beta_{IND} \cdot T(IND) \quad (54)$$

Dies führt zu einer Verbesserung des Modells. Die Ergebnisse der Schätzung von Modell (54) sind aus Tabelle 19 ersichtlich.

Tabelle 19 Ergebnisse der Schätzung für Modell (54)

Parameter	Wert	Standardabweichung	t-Test
β_{RZeit}	-26.379	2.508	-10.517
e_{RZeit}	-0.654	0.074	-8.806
β_{Umst}	-0.601	0.058	-10.413
e_{Umst}	-0.681	1.990	3.422
β_{UebZ}	-4.475	0.488	-9.719
e_{UebZ}	-0.995	0.122	-8.178
β_{IND}	4.570	1.406	-3.250
λ	3.406	1.082	3.149
Log-Likelihood:	$\ln(L) = -1612.2, \rho^2 = 0.31$		

Folgende Abbildungen zeigen die Nutzenfunktionen in Abhängigkeit der Distanz sowie jeweils der Reisegeschwindigkeit (Faktor Distanz/Zeit), der Umsteigehäufigkeit und der Übergangszeit. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Distanz die Reisegeschwindigkeit immer wichtiger wird, dafür die Umsteigehäufigkeiten und Übergangszeiten weniger negativ bewertet werden. Hierzu ein Beispiel, welches sich aus Abbildung 30 herauslesen lässt: ein zweimaliges Umsteigen reduziert den Nutzen einer Route von 20 km im selben Mass wie 3 Umsteigevorgänge jenen einer Route von 40 km.

Abbildung 29 Nutzen in Funktion der Reisegeschwindigkeit und der Distanz

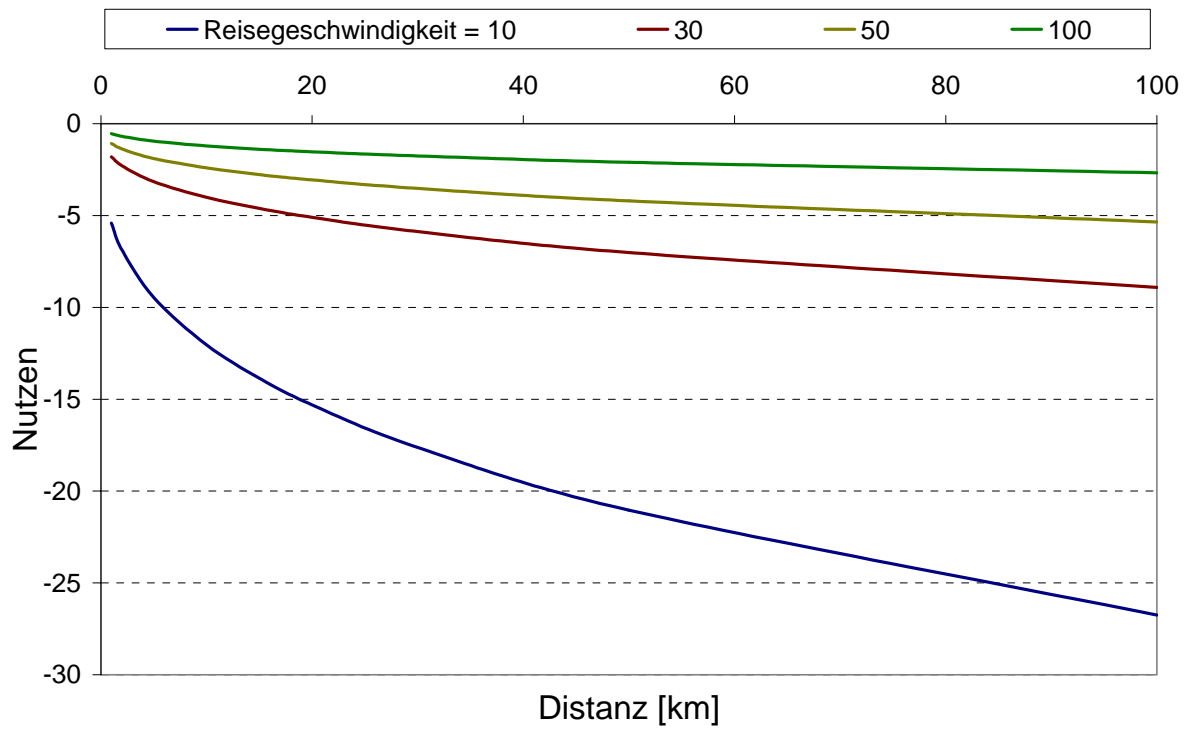


Abbildung 30 Nutzen in Funktion der Umsteigehäufigkeit und der Distanz

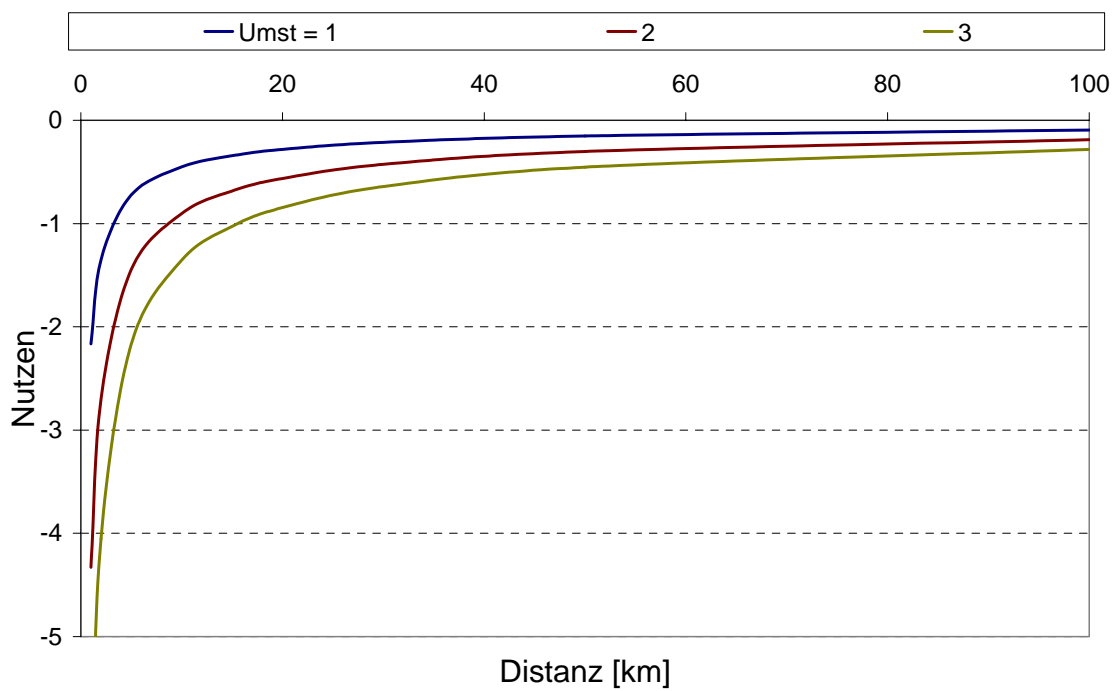
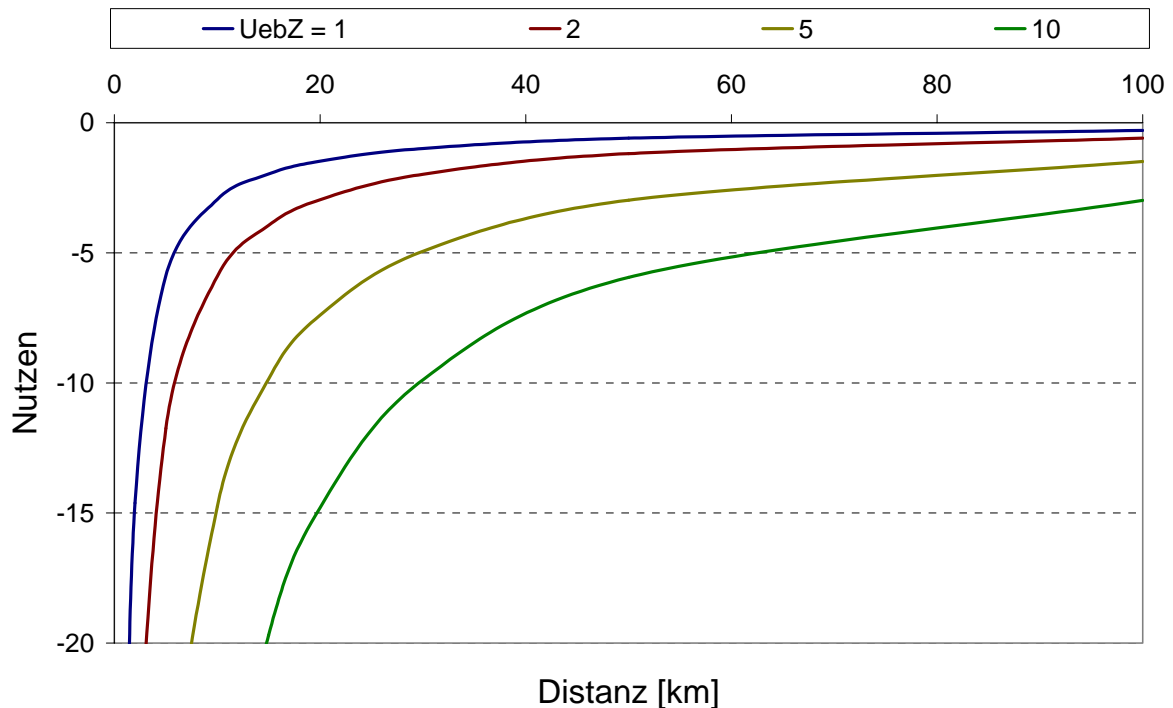


Abbildung 31 Nutzen in Funktion der Übergangszeit und der Distanz



6.2.2 Reisezeit

Hier wird mit verschiedenen Ansätzen versucht, eine Interaktion zwischen der Reisezeit sowie den anderen Routeneigenschaften festzustellen. Die verwendete Nutzenfunktion lautet

$$U = \beta_{Umst} \cdot RZeit^{e_{Umst}} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot RZeit^{e_{Umst}} \cdot UebZ \quad (55)$$

ohne Berücksichtigung der Eigenständigkeiten resp.

$$U = \beta_{Umst} \cdot RZeit^{e_{Umst}} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot RZeit^{e_{Umst}} \cdot UebZ + \beta_{IND} \cdot T(IND) \quad (56)$$

mit. Modell (56) führt wiederum zu einer leichten Verbesserung der Modellschätzung gegenüber (55).

Auch bei diesem Ansatz bestätigt sich, dass bei weiteren Wegen die Umsteigehäufigkeiten und Übergangszeiten weniger schlecht bewertet werden. Dies ist für das Beispiel der

Umsteigehäufigkeit in den Abbildungen 32 und 33 dargestellt. Der Umstand, dass für kürzere Reisezeiten der negative Nutzen des Umsteigens grösser ist, wird durch die stärker abfallende Kurve in Abbildung 33 verdeutlicht. Es ist zum Beispiel ersichtlich, dass bei 15 Minuten Reisezeit ein einmaliges Umsteigen gleich schlecht bewertet wird wie bei 60 Minuten 2 Umsteigevorgänge.

Abbildung 32 Nutzen in Funktion der Umsteigehäufigkeit und der Reisezeit

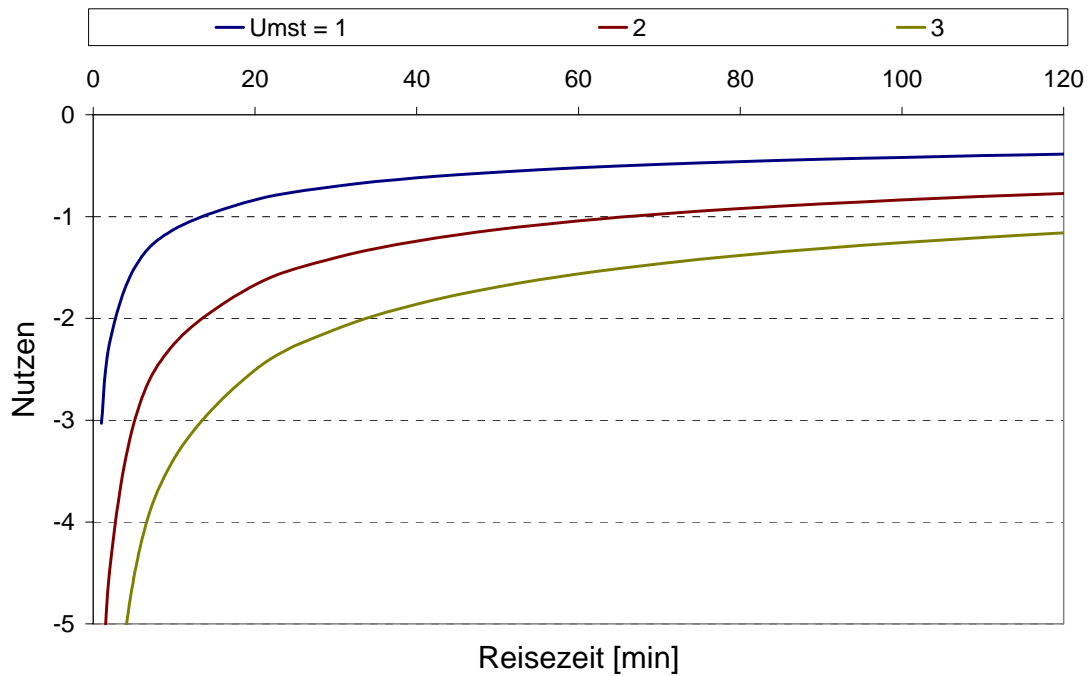
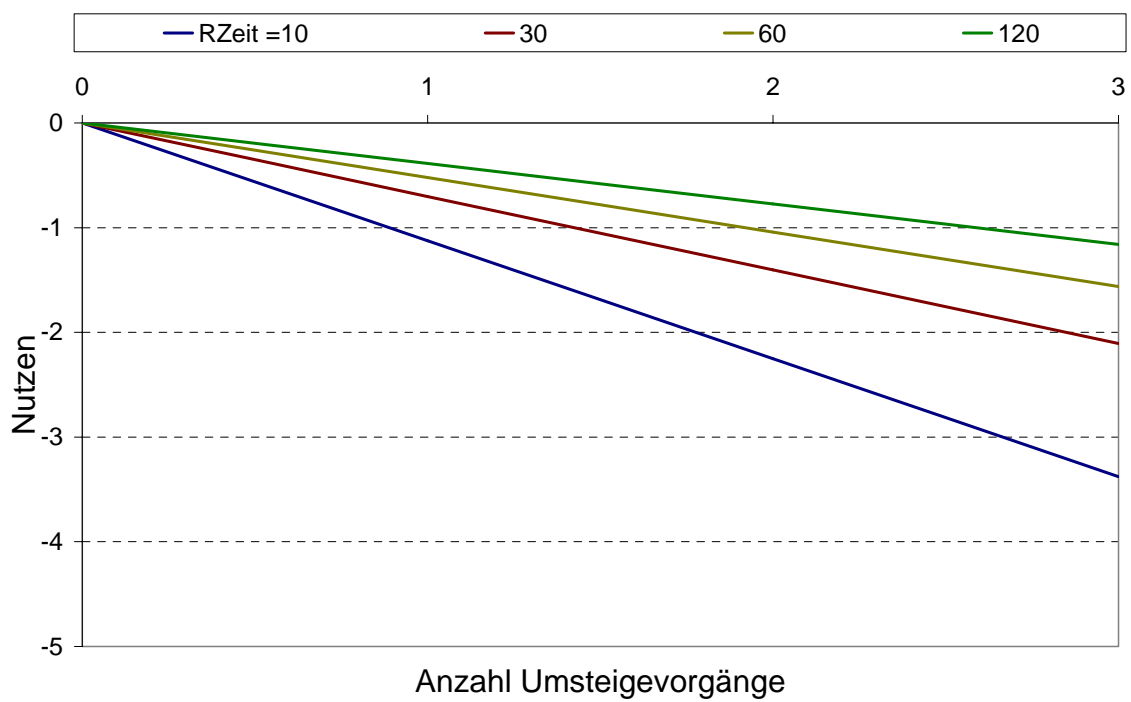


Abbildung 33 Nutzen in Funktion der Reisezeit und der Umsteigehäufigkeit



6.2.3 Eigenständigkeit

Es soll nun zusätzlich untersucht werden, wie mit zunehmender Reisezeit die Wichtigkeit des Eigenständigkeitsparameters IND bewertet wird. Hierzu werden folgende Nutzenfunktionen verwendet:

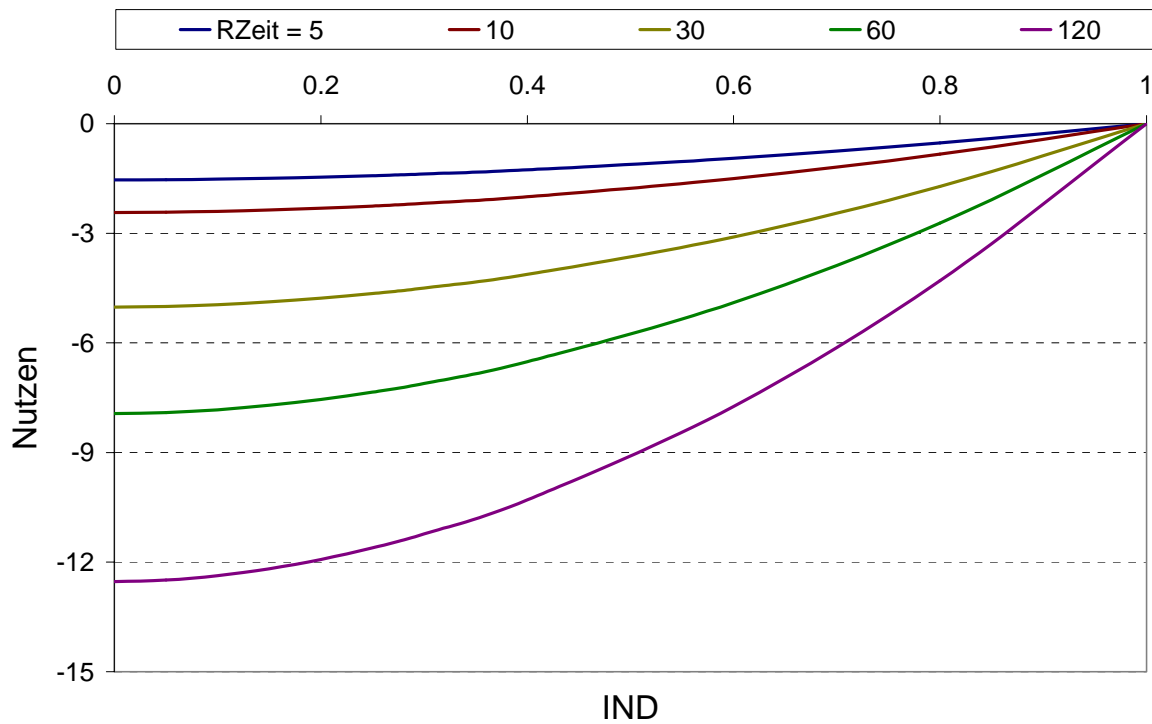
$$U = \beta_{RZeit} \cdot RZeit^{e_{RZeit, IND}} \cdot IND, \quad (57)$$

$$U = \beta_{RZeit} \cdot RZeit^{e_{RZeit, IND}} \cdot IND^{e_{IND}}, \quad (58)$$

$$U = \beta_{RZeit} \cdot RZeit^{e_{RZeit, IND}} \cdot T(IND) \quad (59)$$

Die grafische Darstellung der Schätzung von Modell (58) ist aus Abbildung 34 ersichtlich. Es zeigt sich, dass die Eigenständigkeit einer langen Route wichtiger ist als die einer kurzen, oder anders ausgedrückt, dass bei kurzen Wegen eher ähnliche Alternativrouten gewählt werden als bei langen. Zur Illustration dient folgendes aus Abbildung 34 herausgelesene Beispiel: Ein $IND = 0.7$ reduziert die Nutzenfunktion bei einer Route mit 60 Minuten Reisezeit um den gleichen Wert wie $IND = 0.4$ eine Route von 30 Minuten.

Abbildung 34 Nutzen in Funktion der Reisezeit und der Eigenständigkeit



6.3 Berücksichtigung der soziodemographischen Eigenschaften

Hier werden die soziodemographischen Eigenschaften der Befragten in die Modelle eingeführt und deren Einfluss auf die Bewertung der Routeneigenschaften untersucht. Bei diesen Ansätzen wird immer der Unterschied im Nutzen von allen Kategorien zu einer Referenzkategorie gemessen. Das zu diesem Zweck durchgeführte Effect-Coding ist im Glossar beschrieben.

6.3.1 Ohne Wechselwirkungen

Alter

In den Nutzenfunktionen kommen die Routeneigenschaften mit linearen und nichtlinearen Ansätzen sowie Dummyvariablen für die Alterskategorie vor, also:

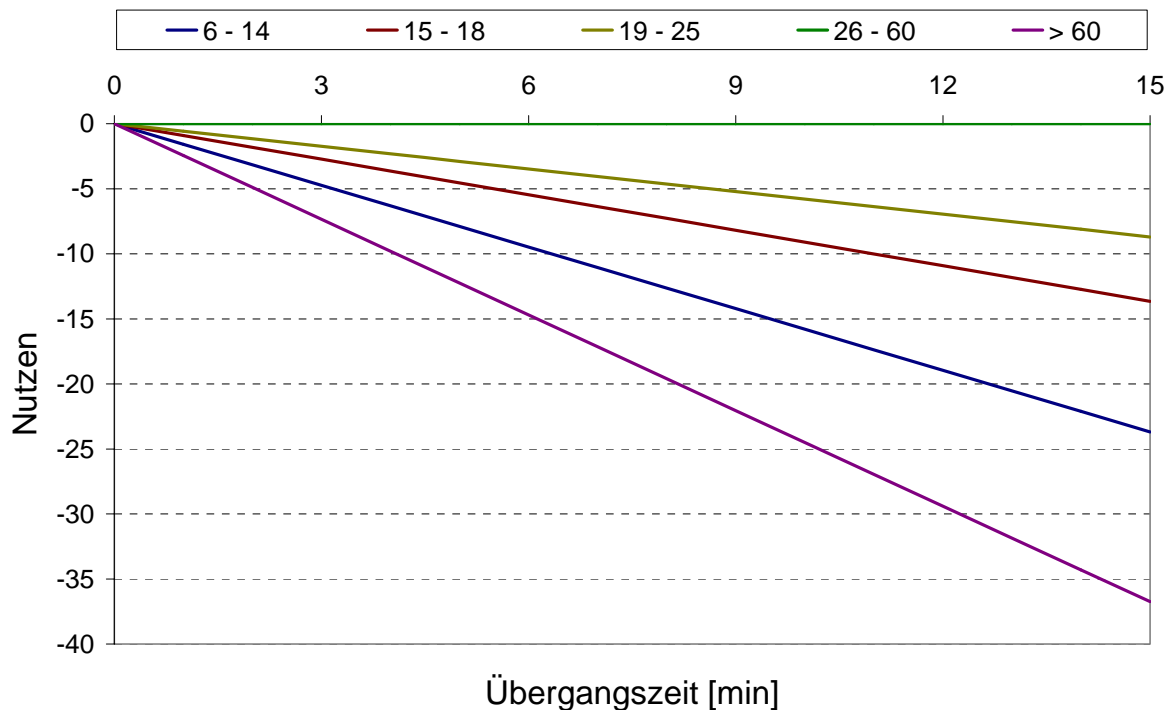
$$U = \sum_{i=1}^5 \beta_i \cdot A_i \cdot Umst \quad (60)$$

$$U = \sum_{i=1}^5 \beta_i \cdot A_i \cdot Umst^{e_i} \quad (61)$$

$$U = \sum_{i=1}^5 \beta_i \cdot A_i \cdot UebZ \quad (62)$$

Bei einem nichtlinearen Ansatz für die Übergangszeit konvergiert die Modellschätzung nicht. Bei den Umsteigehäufigkeiten wird kein wesentlicher Unterschied im Nutzen zwischen den einzelnen Altersgruppen festgestellt. Bei den Übergangszeiten zeigt sich, dass lange Übergangszeiten vor allem bei den über 60jährigen und Kindern negativ bewertet werden. Als Illustration von Modell (62) dient Abbildung 35. Bei den über 60jährigen hat bereits eine Übergangszeit von ca. 2 Minuten denselben negativen Einfluss auf die Nutzenfunktion, welcher bei den 15-18jährigen erst bei einer 3-mal höheren Übergangszeit erreicht wird. Dieses Resultat erscheint etwas zu stark zwischen den einzelnen Altersgruppen zu differenzieren. Ein nichtlineares Modell würde diesen Effekt wahrscheinlich abschwächen.

Abbildung 35 Nutzen in Funktion der Übergangszeit und des Alters



Geschlecht

Die verschiedenen Ansätze für die Nutzenfunktionen sind aus Tabelle 20 ersichtlich.

Tabelle 20 Nutzenfunktionen mit Berücksichtigung des Geschlechts

U =

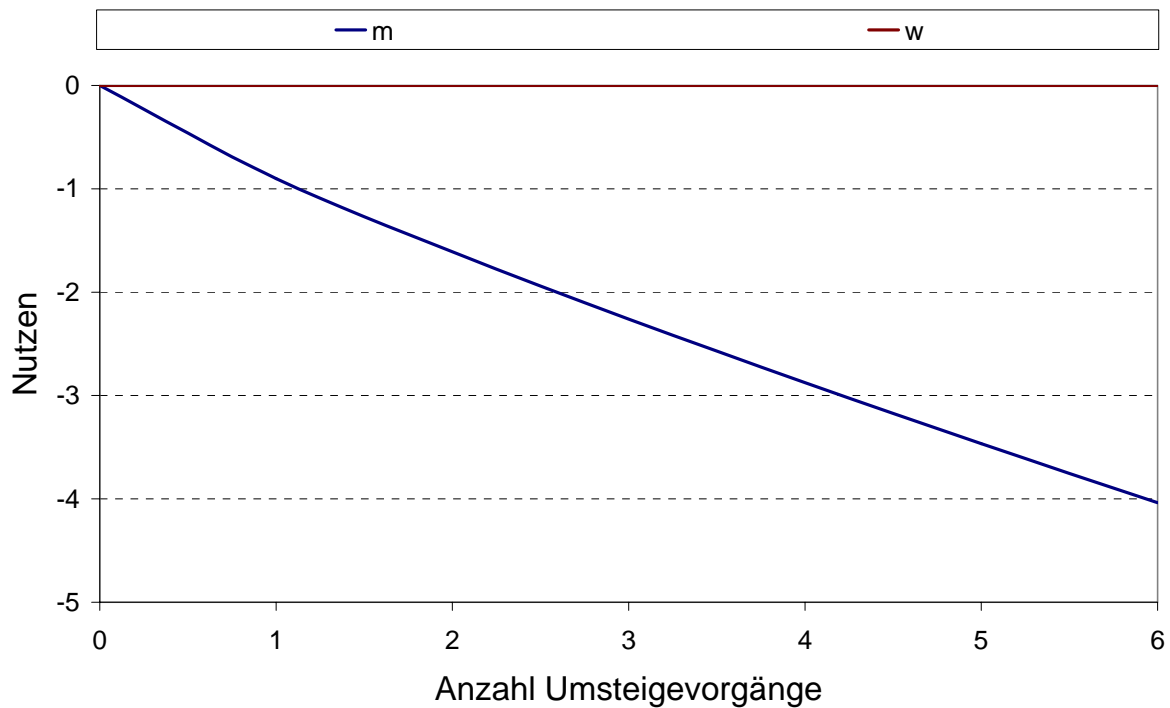
$$(\beta_m \cdot m + \beta_w \cdot w) \cdot Umst \quad (63)$$

$$\beta_m \cdot m \cdot Umst^{e_m} + \beta_w \cdot w \cdot Umst^{e_w} \quad (64)$$

$$(\beta_m \cdot m + \beta_w \cdot w) \cdot UebZ \quad (65)$$

Auch hier konnte bei einem nichtlinearen Ansatz für die Übergangszeit kein konvergierendes Modell geschätzt werden. Abbildung 36 zeigt am Beispiel von Modell (64), dass häufige Umsteigevorgänge eher von den Männern als störend empfunden werden.

Abbildung 36 Nutzen in Funktion der Umsteigehäufigkeit und des Geschlechts



Fahrtzweck

Dieselben Nutzenfunktionen wie für das Alter und das Geschlecht werden hier für den Fahrtzweck angesetzt, d.h.:

$$U = \sum_{i=1}^4 \beta_i \cdot Zw_i \cdot Umst \quad (66)$$

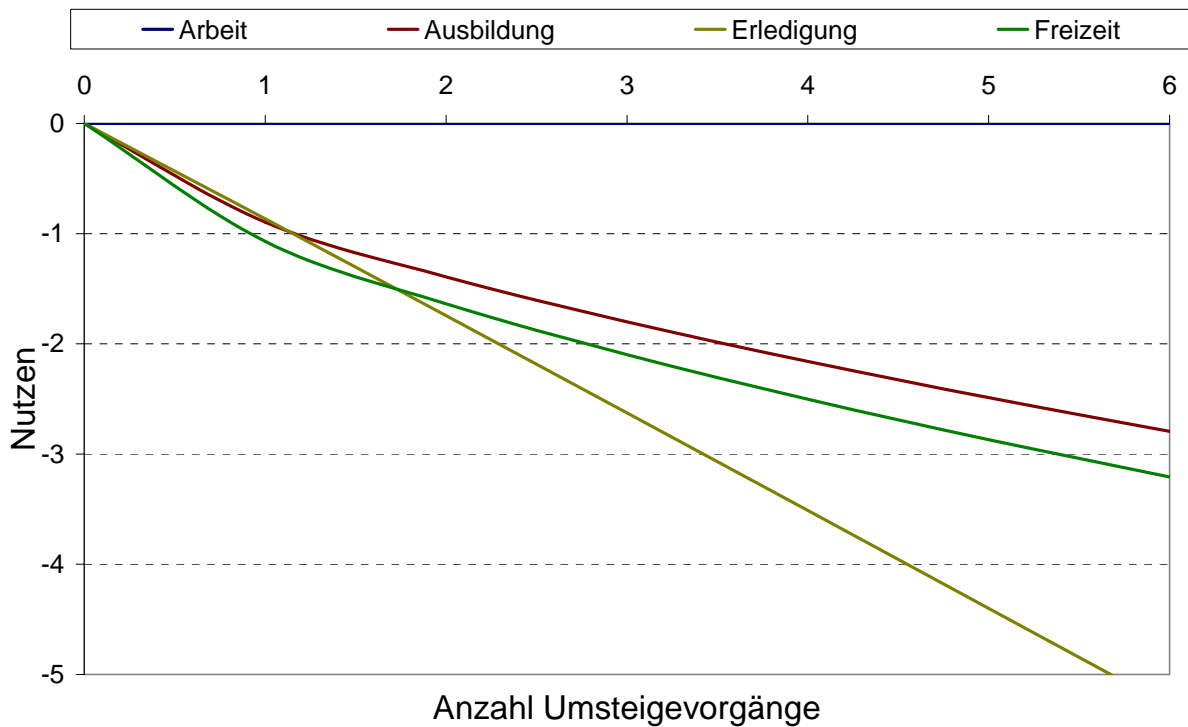
$$U = \sum_{i=1}^4 \beta_i \cdot Zw_i \cdot Umst^{e_i} \quad (67)$$

$$U = \sum_{i=1}^4 \beta_i \cdot Zw_i \cdot UebZ \quad (68)$$

Auch hier wird ein einmaliges Umsteigen noch für jeden Fahrtzweck etwa gleich bewertet. Mehrmaliges Umsteigen ist vor allem bei den Befragten mit Fahrtzweck Einkauf/Erledigung

schlecht angesehen. Dies erscheint wiederum logisch, da mit schweren Einkaufsstützen beladene Fahrgäste eher direkte Wege verwenden wollen.

Abbildung 37 Nutzen in Funktion der Umsteigehäufigkeit und des Fahrtzwecks



Differenzierung des nichtlinearen Modells

Die Nutzenfunktionen von Modell (38) werden umgeschrieben, so dass Unterschiede zwischen den soziodemographischen Gruppen berücksichtigt werden. Die Nutzenfunktionen lauten

$$U = \sum_{i=1}^5 \beta_{RZeit,i} \cdot A_i \cdot RZeit^{e_{UebZ,i}} \sum_{i=1}^5 \beta_{UebZ,i} \cdot A_i \cdot UebZ^{e_{UebZ,i}} + \sum_{i=1}^5 \beta_{Umst,i} \cdot A_i \cdot Umst^{e_{Umst,i}} + \beta_{IND} \cdot T(IND) \quad (69)$$

für das Alter,

$$U = \sum_{i=1}^5 \left(\beta_{RZeit,i} \cdot Gesch_i \cdot RZeit^{e_{RZeit,i}} + \beta_{UebZ,i} \cdot Gesch_i \cdot UebZ^{e_{UebZ,i}} + \beta_{Umst,i} \cdot Gesch_i \cdot Umst^{e_{Umst,i}} + T(IND) \right) \quad (70)$$

für das Geschlecht und

$$U = \sum_{i=1}^5 \left(\beta_{RZeit,i} \cdot Zw_i \cdot RZeit^{e_{RZeit,i}} + \beta_{UebZ,i} \cdot Zw_i \cdot UebZ^{e_{UebZ,i}} + \beta_{Umst,i} \cdot Zw_i \cdot Umst^{e_{Umst,i}} + T(IND) \right) \quad (71)$$

für den Fahrtzweck. Aus Tabelle 21 ist ersichtlich, dass diese Differenzierung nicht zu einer Verbesserung der Modellergebnisse gegenüber Modell (38) führt. Angesichts der Verkleinerung des Datensatzes durch die Differenzierung können die Ergebnisse jedoch als befriedigend angesehen werden.

Tabelle 21 Modellergebnisse für Modelle (69) – (71)

Modell Nr.	berücksichtigte soziodemographische Variable	ln(L)	ρ^2
68	Alter	-1791.8	0.24
69	Geschlecht	-2141.2	0.09
70	Fahrtzweck	-1987.4	0.15

Gesamtmodell

Abschliessend wird nun noch versucht, ein Modell zu schätzen, welches alle soziodemographischen und routenbeschreibenden Variablen beinhaltet, also folgende Nutzenfunktion besitzt:

$$\begin{aligned}
 U = & \sum_{i=1}^5 \left(\beta_{Umst,Alt_i} \cdot A_i \cdot Umst^{e_{Umst,Alt_i}} + \beta_{UebZ,Alt_i} \cdot A_i \cdot UebZ^{e_{UebZ,Alt_i}} \right) \\
 & + \sum_{j=1}^5 \left(\beta_{Umst,Zw_j} \cdot Zw_j \cdot Umst^{e_{Umst,Zw_j}} + \beta_{UebZ,Zw_j} \cdot Zw_j \cdot UebZ^{e_{UebZ,Zw_j}} \right) \\
 & + \sum_{k=m,w} \left(\beta_{Umst,Gesch_k} \cdot Gesch_k \cdot Umst^{e_{Umst,Gesch_k}} + \beta_{UebZ,Gesch_k} \cdot Gesch_k \cdot UebZ^{e_{UebZ,Gesch_k}} \right) \\
 & + \beta_{IND} \cdot T(IND)
 \end{aligned} \quad (72)$$

Die Schätzung dieses Gesamtmodells ergibt eine Log-Likelihood von -1812.8, ρ^2 ist 0.23. Die geschätzten Parameter besitzen die erwarteten Vorzeichen.

6.3.2 Mit Wechselwirkungen

Zusätzlich zum Einfluss der soziodemographischen Variablen werden nun gleichzeitig Interaktionen zwischen den verschiedenen Routeneigenschaften berücksichtigt (analog zu den Modellen in Abschnitt 6.2). Für die Schätzung dieser komplexen Modelle benötigt BIOGEME sehr lange Zeit, und auch die Darstellbarkeit der Ergebnisse stösst an ihre Grenzen. Die Güte der Modellschätzungen nimmt zudem stark ab.

Alter

Die angesetzten Nutzenfunktionen lauten:

$$U = \sum_{i=1}^5 \beta_{Umst,i} \cdot Altersgruppe_i \cdot RZeit^{e_{Umst,i}} \cdot Umst \quad (73)$$

$$U = \sum_{i=1}^5 \beta_{UebZ,i} \cdot Altersgruppe_i \cdot RZeit^{e_{UebZ,i}} \cdot UebZ \quad (74)$$

Die Ergebnisse der Schätzung von Modell (74) sind aus Tabelle 22 ersichtlich, den Verlauf der Nutzenfunktionen zeigen die Abbildungen 38 und 39.

Tabelle 22 Ergebnisse der Schätzung für Modell (74)

Parameter	Wert	Standardabweichung	t-Test
$\beta_{Umst,1}$	-1.156	0.698	-1.656
$e_{Umst,1}$	-0.060	0.233	-0.259
$\beta_{Umst,2}$	-2.161	1.129	-1.914
$e_{Umst,2}$	-0.366	0.204	-1.750
$\beta_{Umst,3}$	-0.816	0.672	-1.214
$e_{Umst,3}$	0.032	0.287	1.124
$\beta_{Umst,4}$	-	-	-
$e_{Umst,4}$	-	-	-
$\beta_{Umst,5}$	-0.777	0.444	-1.752
$e_{Umst,5}$	0.088	0.203	0.435
Log-Likelihood:	$\ln(L) = -2230.4, \rho^2 = 0.05$		

Abbildung 38 Nutzen in Funktion des Alters und der Reisezeit für 1 mal umsteigen

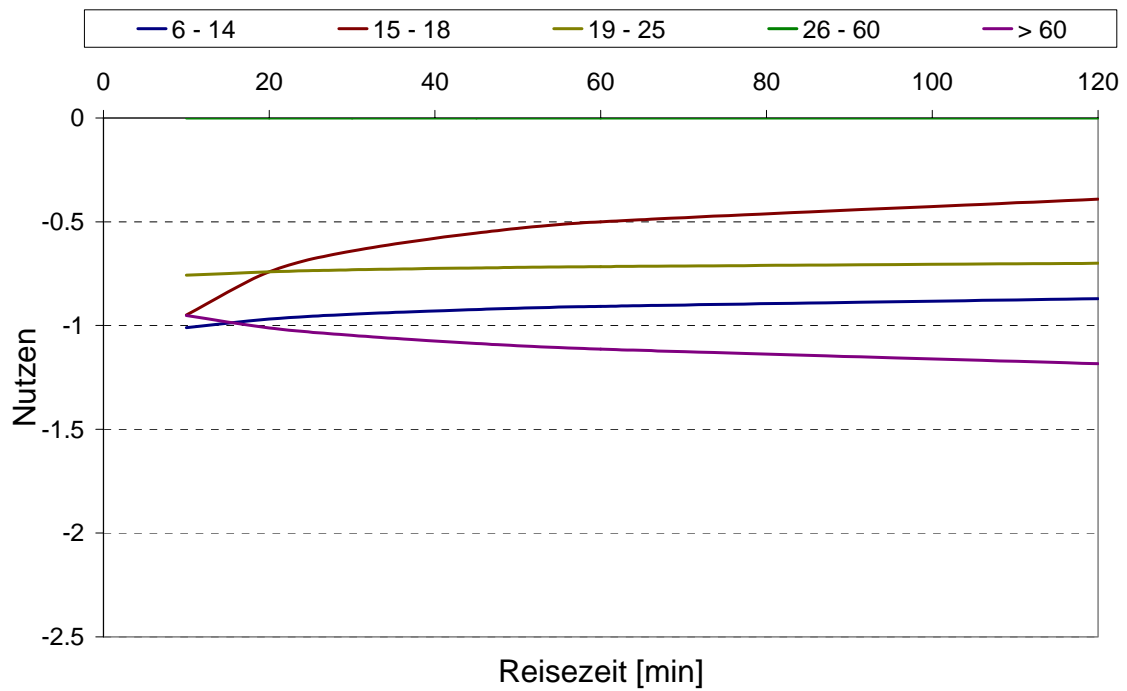
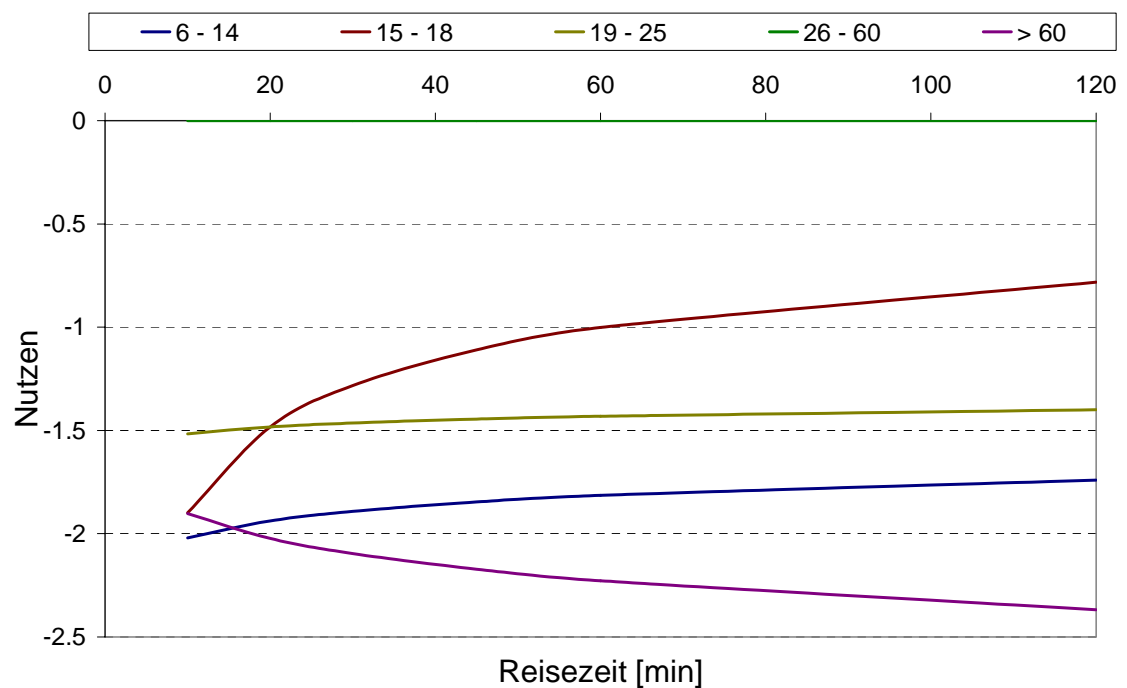


Abbildung 39 Nutzen in Funktion des Alters und der Reisezeit für 2 mal umsteigen



Geschlecht

Die Nutzenfunktionen sind hier wie folgt gegeben:

$$U = \sum_{i=m,w} \left(\beta_{Umst,i} \cdot Geschlecht_i \cdot RZeit^{e_{Umst,i}} \cdot Umst \right) \quad (75)$$

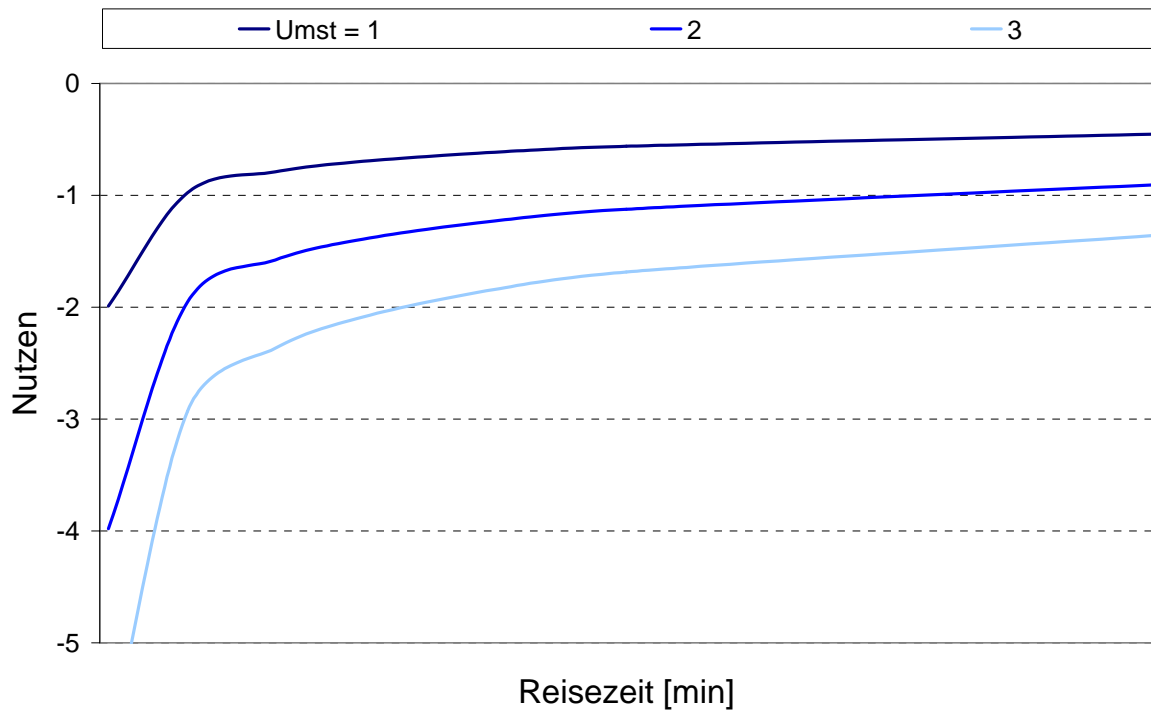
$$U = \sum_{i=m,w} \left(\beta_{UebZ,i} \cdot Geschlecht_i \cdot RZeit^{e_{UebZ,i}} \cdot UebZ \right) \quad (76)$$

Die Ergebnisse für Modell (75) (Tabelle 23 und Abbildung 40) zeigen wiederum, dass bei zunehmender Reisezeit das Umsteigen weniger störend wirkt. Der Trend, dass Männer weniger gern umsteigen als Frauen, wird bestätigt.

Tabelle 23 Ergebnisse der Schätzung für Modell (75)

Parameter	Wert	Standardabweichung	t-Test
$\beta_{Umst,m}$	-1.986	0.741	-2.680
$e_{Umst,m}$	-0.309	0.142	-2.176
$\beta_{Umst,w}$	-	-	-
$e_{Umst,w}$	-	-	-
Log-Likelihood:	$\ln(L) = -2272.3, \rho^2 = 0.03$		

Abbildung 40 Nutzen in Funktion des Geschlechts und der Reisezeit in Abhängigkeit der Anzahl Umsteigevorgänge



Fahrtzweck

Die Nutzenfunktionen lauten hier:

$$U = \sum_{i=1}^4 \beta_{Umst,i} \cdot Zweck_i \cdot RZeit^{e_{Umst,i}} \cdot Umst \quad (77)$$

$$U = \sum_{i=1}^4 \beta_{UebZ,i} \cdot Zweck_i \cdot RZeit^{e_{UebZ,i}} \cdot UebZ \quad (78)$$

Die Schätzung für Modell (77) bestätigt sowohl die Hypothese, dass mit zunehmender Reisezeit weniger ungerne umgestiegen wird, als auch den Trend, dass Fahrgäste im Einkaufsverkehr am ehesten direkte Routen bevorzugen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 24 aufgeführt, die Darstellung der Nutzenfunktionen in den Abbildungen 41 und 42.

Tabelle 24 Ergebnisse der Schätzung für Modell (77)

Parameter	Wert	Standardabweichung	t-Test
$\beta_{Umst,1}$	-	-	-
$e_{Umst,1}$	-	-	-
$\beta_{Umst,2}$	-1.980	0.891	-2.222
$e_{Umst,2}$	-0.320	0.175	-1.827
$\beta_{Umst,3}$	-0.934	0.532	-1.755
$e_{Umst,3}$	-0.034	0.215	-0.156
$\beta_{Umst,4}$	-2.513	0.925	-2.717
$e_{Umst,4}$	-0.341	0.139	-2.456
Log-Likelihood:	$\ln(L) = -2195.5, \rho^2 = 0.07$		

Abbildung 41 Nutzen in Funktion des Fahrtzwecks und der Reisezeit für 1 mal umsteigen

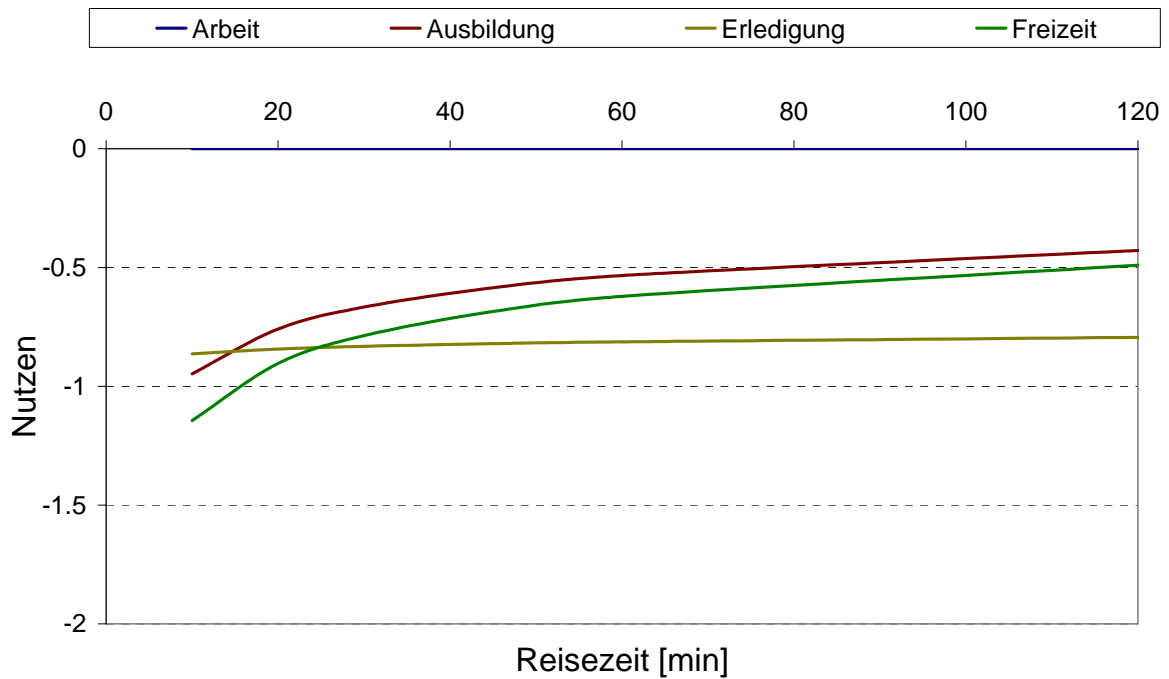
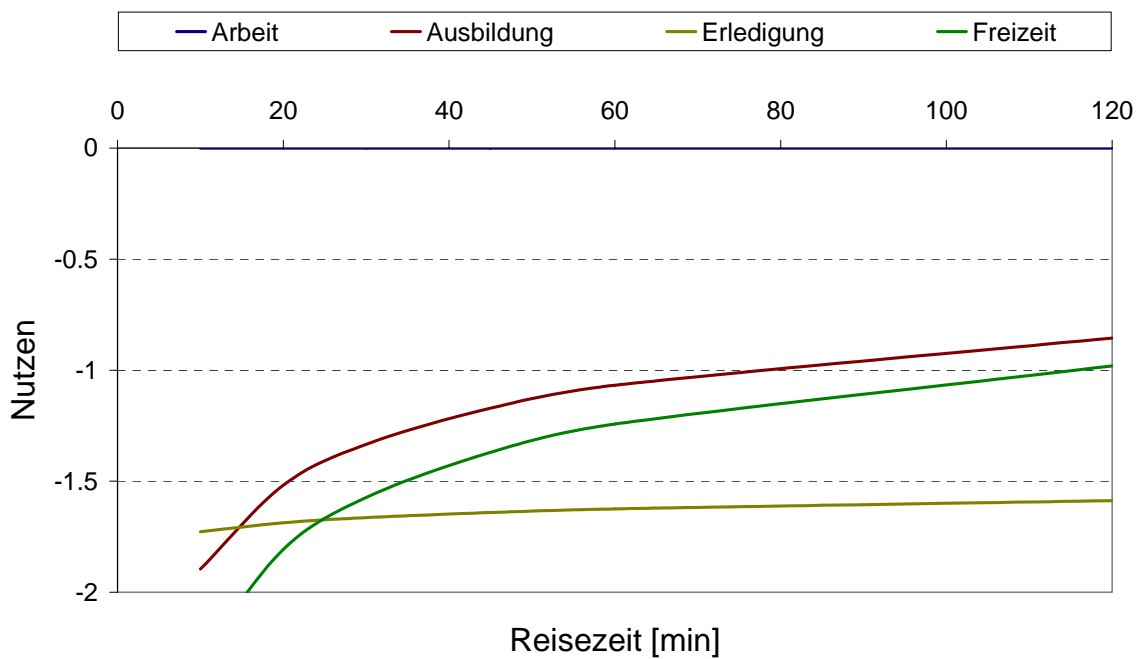


Abbildung 42 Nutzen in Funktion des Fahrtzwecks und der Reisezeit für 2 mal umsteigen



Gesamtmodell

Auch in dieser Modellfamilie wurde abschliessend noch ein Gesamtmodell, welches alle genannten Einflussgrössen gleichzeitig berücksichtigt, geschätzt. Wie vorher besitzen die geschätzten Parameter die erwarteten Vorzeichen. Die Log-Likelihood beträgt -1821.7, $\rho^2 = 0.23$.

6.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird nur eine Auswahl der geschätzten Modelle beschrieben. Eine Übersicht über alle im Rahmen dieser Arbeit erhaltenen Modellergebnisse stellen Tabellen 25 bis 27 dar. Die Ergebnisse bestätigen durchgehend, dass die Addition der Box-Cox-transformierten Variable IND zu den Nutzenfunktionen die Modellschätzungen leicht verbessern. Dieser Ansatz sollte also beibehalten werden.

Tabelle 25 Basis-Modelle

Nutzenfunktion U		$\ln(L)$	ρ^2
$\beta_{RZeit} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot UebZ$	(28)	-1473.8	0.43
$\beta_{RZeit} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot UebZ + \beta_{IND} \cdot IND$	(29)	-1472.8	0.43
$\beta_{RZeit} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot UebZ + \ln(IND)$	(30)	-1471.9	0.43
$\beta_{RZeit} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot UebZ + \beta_{IND} \cdot \ln(IND)$	(31)	-1470.5	0.43
$\beta_{RZeit} \cdot RZeit^{e_{RZeit}} + \beta_{Umst} \cdot Umst^{e_{Umst}} + \beta_{UebZ} \cdot UebZ^{e_{UebZ}} + \beta_{IND} \cdot \ln(IND)$	(36)	-1185.4	0.54
$\beta_{RZeit} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot UebZ + T(IND)$	(32)	-1470.1	0.43
$\beta_{RZeit} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot UebZ + \beta_{IND} \cdot T(IND)$	(33)	-1444.8	0.44
$\beta_{RZeit} \cdot RZeit^{e_{RZeit}} + \beta_{Umst} \cdot Umst^{e_{Umst}} + \beta_{UebZ} \cdot UebZ^{e_{UebZ}} + T(IND)$	(37)	-1181.6	0.54
$\beta_{RZeit} \cdot RZeit^{e_{RZeit}} + \beta_{Umst} \cdot Umst^{e_{Umst}} + \beta_{UebZ} \cdot UebZ^{e_{UebZ}} + \beta_{IND} \cdot T(IND)$	(38)	-1165.5	0.55
$(\beta_{RZeit} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot UebZ) \cdot \ln(IND)$	(41)	-2461.6	0.05
$(\beta_{RZeit} \cdot RZeit^{e_{RZeit}} + \beta_{Umst} \cdot Umst^{e_{Umst}} + \beta_{UebZ} \cdot UebZ^{e_{UebZ}}) \cdot \ln(IND)$	(42)	-2399.0	0.07
$(\beta_{RZeit} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot UebZ) \cdot T(IND)$	(43)	-2379.8	0.08
$(\beta_{RZeit} \cdot RZeit^{e_{RZeit}} + \beta_{Umst} \cdot Umst^{e_{Umst}} + \beta_{UebZ} \cdot UebZ^{e_{UebZ}}) \cdot T(IND)$	(44)	-2299.6	0.11
$\beta_{RZeit} \cdot T(RZeit) + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot T(UebZ) + \beta_{IND} \cdot T(IND)$	(39)	-1166.8	0.55
$\beta_{RZeit} \cdot T(RZeit) + \beta_{Umst} \cdot Umst^{e_{Umst}} + \beta_{UebZ} \cdot T(UebZ) + \beta_{IND} \cdot T(IND)$	(40)	-1165.5	0.55

Tabelle 26 Modelle mit Wechselwirkungen zwischen den Routeneigenschaften

Nutzenfunktion U		$\ln(L)$	ρ^2
$\beta_{RZeit} \cdot \left(\frac{Dist}{Dist}\right)^{e_{RZeit}} \cdot RZeit + \beta_{Umst} \cdot \left(\frac{Dist}{Dist}\right)^{e_{Umst}} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot \left(\frac{Dist}{Dist}\right)^{e_{UebZ}} \cdot UebZ$ (53)		-1637.1	0.30
$U = \sum_{i=1}^3 \beta_i \cdot \left(\frac{Dist}{Dist}\right)^{e_{Dist,i}} \cdot Eigenschaft_i + \beta_{IND} \cdot T(IND)$	(54)	-1612.2	0.31
$\beta_{Umst} \cdot RZeit^{e_{Umst}} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot RZeit^{e_{Umst}} \cdot UebZ$	(55)	-1818.8	0.23
$\beta_{Umst} \cdot RZeit^{e_{Umst}} \cdot Umst + \beta_{UebZ} \cdot RZeit^{e_{Umst}} \cdot UebZ + \beta_{IND} \cdot T(IND)$	(56)	-1762.0	0.25
$\beta_{IND} \cdot RZeit^{e_{RZeit,IND}} \cdot T(IND)$	(59)	-2274.1	0.03

Tabelle 27 Modelle mit soziodemographischen Eigenschaften

Nutzenfunktion U		$\ln(L)$	ρ^2
$\sum_{i=1}^5 \beta_{Umst,i} \cdot A_i \cdot Umst$	(60)	-2232.4	0.05
$\sum_{i=1}^5 \beta_{Umst,i} \cdot A_i \cdot Umst^{e_{Umst,i}}$	(61)	-2232.0	0.05
$\sum_{i=1}^5 \beta_{Umst,i} \cdot A_i \cdot Umst + \beta_{IND} \cdot T(IND)$		-2128.9	0.09
$\sum_{i=1}^5 \beta_{Umst,i} \cdot A_i \cdot Umst^{e_{Umst,i}} + \beta_{IND} \cdot T(IND)$		-2210.6	0.06
$\beta_{Umst,m} \cdot m \cdot Umst + \beta_{Umst,w} \cdot w \cdot Umst$	(63)	-2274.5	0.03
$\beta_{Umst,m} \cdot m \cdot Umst^{e_{Umst,m}} + \beta_{Umst,w} \cdot w \cdot Umst^{e_{Umst,w}}$	(64)	-2274.3	0.03
$\beta_{Umst,m} \cdot m \cdot Umst + \beta_{Umst,w} \cdot w \cdot Umst + \beta_{IND} \cdot T(IND)$		-2253.8	0.04
$\beta_{Umst,m} \cdot m \cdot Umst^{e_{Umst,m}} + \beta_{Umst,w} \cdot w \cdot Umst^{e_{Umst,w}} + \beta_{IND} \cdot T(IND)$		-2253.6	0.04
$\sum_{i=1}^4 \beta_{Umst,i} \cdot Zw_i \cdot Umst$	(66)	-2200.0	0.06
$\sum_{i=1}^4 \beta_{Umst,i} \cdot Zw_i \cdot Umst^{e_{Umst,i}}$	(67)	-2198.5	0.07
$\sum_{i=1}^4 \beta_{Umst,i} \cdot Zw_i \cdot Umst + \beta_{IND} \cdot T(IND)$		-2177.4	0.07
$\sum_{i=1}^4 \beta_{Umst,i} \cdot Zw_i \cdot Umst^{e_{Umst,i}} + \beta_{IND} \cdot T(IND)$		-2176.0	0.07
$\sum_{i=1}^5 \beta_{UebZ,i} \cdot A_i \cdot UebZ$	(62)	-2174.7	0.08
$\sum_{i=1}^5 \beta_{UebZ,i} \cdot A_i \cdot UebZ + \beta_{IND} \cdot T(IND)$		-2135.5	0.09
$\beta_{UebZ,m} \cdot m \cdot UebZ + \beta_{UebZ,w} \cdot w \cdot UebZ$	(65)	-2308.8	0.02
$\beta_{UebZ,m} \cdot m \cdot UebZ + \beta_{UebZ,w} \cdot w \cdot UebZ + \beta_{IND} \cdot T(IND)$		-2279.9	0.03
$\sum_{i=1}^4 \beta_{UebZ,i} \cdot Zw_i \cdot UebZ$	(68)	-2140.7	0.09
$\sum_{i=1}^4 \beta_{UebZ,i} \cdot Zw_i \cdot UebZ + \beta_{IND} \cdot T(IND)$		-2088.9	0.11

$\sum_{i=m,w} (\beta_{Umst,i} \cdot Geschlecht_i \cdot RZeit^{e_{Umst,i}} \cdot Umst)$	(75)	-2272.3	0.03
$\sum_{i=m,w} (\beta_{Umst,i} \cdot Geschlecht_i \cdot RZeit^{e_{Umst,i}} \cdot Umst) + \beta_{IND} \cdot T(IND)$		-2252.2	0.04
$\sum_{i=m,w} (\beta_{UebZ,i} \cdot Geschlecht_i \cdot RZeit^{e_{Umst,i}} \cdot UebZ)$	(76)	-2253.5	0.04
$\sum_{i=m,w} (\beta_{UebZ,i} \cdot Geschlecht_i \cdot RZeit^{e_{Umst,i}} \cdot UebZ) + \beta_{IND} \cdot T(IND)$		-2222.3	0.06
$\sum_{i=1}^5 \beta_{Umst,i} \cdot Altersgruppe_i \cdot RZeit^{e_{Umst,i}} \cdot Umst$		-1952.7	0.17
$+ \sum_{i=1}^5 \beta_{UebZ,i} \cdot Altersgruppe_i \cdot RZeit^{e_{Umst,i}} \cdot UebZ + \beta_{IND} \cdot T(IND)$			
$\sum_{i=1}^5 \beta_{Umst,i} \cdot Altersgruppe_i \cdot RZeit^{e_{Umst,i}} \cdot Umst$	(73)	-2230.4	0.05
$\sum_{i=1}^5 \beta_{Umst,i} \cdot Altersgruppe_i \cdot RZeit^{e_{Umst,i}} \cdot Umst + \beta_{IND} \cdot T(IND)$		-2209.4	0.06
$\sum_{i=1}^4 \beta_{Umst,i} \cdot Zweck_i \cdot RZeit^{e_{Umst,i}} \cdot Umst$	(74)	-2195.5	0.07
$\sum_{i=1}^4 \beta_{Umst,i} \cdot Zweck_i \cdot RZeit^{e_{Umst,i}} \cdot Umst + \beta_{IND} \cdot T(IND)$		-2174.1	0.08

7 Interpretation der Ergebnisse

Die Schätzung der Routenwahlmodelle im vorherigen Kapitel hat zu folgenden Erkenntnissen geführt:

- Die Eigenschaften Reisezeit, Umsteigehäufigkeit und Übergangszeit fließen wie erwartet negativ in die Nutzenfunktionen ein.
- Die in Kapitel 6 definierte Eigenständigkeit einer Route hat einen positiven Einfluss, d.h. je ähnlicher die angebotenen Routenalternativen zwischen zwei Punkten sind, desto niedriger ist der Nutzen jeder einzelner dieser Routen.

Es scheint also empfehlenswert zu sein, bei der Planung eines Netzes die Ähnlichkeiten zu berücksichtigen. Insbesondere sollte der Fahrplan so gestaltet werden, dass Routen zeitlich klar voneinander unterscheidbar sind und immer eine Alternative als die klar beste und zu wählende ersichtlich ist. Es kann sinnvoll sein, einzelne nahe aneinander liegende Verbindungen zu streichen und somit die Eigenständigkeit der verbleibenden sowie deren Nutzen zu erhöhen. Das Angebot wird dadurch für den Nutzer übersichtlicher. Es sollte jedoch nicht vergessen werden, dass auch der Takt einer Verbindung, welcher in dem hier untersuchten Datensatz nicht berücksichtigt wurde, bei der Auswahl, vor allem als Qualitätsmerkmal und Argument bei der Verkehrsmittelwahl, von Bedeutung ist. Die Rationalisierung des Angebots zugunsten einer Verbesserung der Eigenständigkeiten sollte also nicht zum Nachteil eines dichten und gestaffelten Fahrplans geschehen, sondern dessen Qualität noch verbessern.

- Nichtlineare Ansätze für die Nutzenfunktionen führen zu besseren Modellschätzungen als lineare.
- Für die Eigenschaften Reisezeit, Übergangszeit und Eigenständigkeit bewährt sich die Einführung der jeweiligen Variablen als Box-Cox-transformierte Grössen.
- Die Eigenständigkeit sollte als additiver Term in die Nutzenfunktion eingeführt werden. Multiplikative Ansätze führten nicht zu befriedigenden Modellschätzungen.

- Untersuchungen der Interaktionen zwischen den Routeneigenschaften haben ergeben, dass Umsteigehäufigkeit und Übergangszeit bei zunehmender Reisezeit bzw. -distanz immer weniger negativ bewertet werden. Bei längeren Wegen wird eher die Reisegeschwindigkeit für die Wahl einer Route massgebend als diese „Umsteigeeigenschaften“.
- Die Berücksichtigung der soziodemographischen Eigenschaften der Befragten in den Nutzenfunktionen führt zu sehr langen Rechenzeiten für die Modellschätzungen.
- Tendenziell werden grosse Umsteigehäufigkeiten resp. lange Übergangszeiten von älteren Menschen, Männern und im Einkaufsverkehr am schlechtesten bewertet. Auch hier sind die erwähnten Veränderungen der Nutzen in Funktion der Reisezeiten festzustellen.

Zur weiteren Untersuchung und zur Anwendung auf das Beispiel im folgenden Kapitel wird das Modell ausgewählt, dessen Modellschätzung zu den besten Ergebnissen geführt hat, d.h. dessen Log-Likelihood am grössten war. Zur Erinnerung sei dessen Nutzenfunktion hier nochmals genannt:

$$U = \beta_{RZeit} \cdot RZeit^{e_{RZeit}} + \beta_{Umst} \cdot Umst^{e_{Umst}} + \beta_{UebZ} \cdot UebZ^{e_{UebZ}} + \beta_{IND} \cdot T(IND) \quad (38)$$

Dieser Ansatz scheint für die Modellierung der Routenwahl im ÖV empfehlenswert zu sein.

8 Anwendung

8.1 Verwendung verschiedener Nutzenfunktionen zur Berechnung der Nachfrageverteilung auf ein Netz

In diesem Abschnitt sollen einige der in dieser Arbeit entwickelten Modellansätze auf ein Beispielnetz angewendet werden. So soll der Einfluss der Berücksichtigung der Ähnlichkeiten zwischen den Routen auf deren Auswahlwahrscheinlichkeiten und Belastungen aufgezeigt werden.

Als Beispielnetz dient ein Teil des Netzes der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB), welches bereits in Vrtic (2003) verwendet wurde. Das Netz erstreckt sich von Zürich bis nach Bern. Es besteht aus 11 Knoten, für welche die Quelle-Ziel Matrix vorliegt, sowie aus 26 Strecken. Die Knoten und Strecken sind in den Tabellen 28 und 29 aufgelistet. Tabelle 29 enthält zudem die Mittelwerte der Eigenständigkeits für alle Verbindungen, welche die über gegebene Strecke verkehren.

Tabelle 28 Knoten im Beispielnetz

Nr.	Name
1	Zürich
2	Baden
3	Brugg
4	Basel
5	Delémont
6	Solothurn
7	Bern
8	Oltén
9	Liestal
10	Aarau
11	Lenzburg

Tabelle 29 Strecken im Beispielnetz

Nr.	von	nach	mittlere Eigenständigkeit der Routen über die Strecke
1	Zürich HB	Killwangen-Spreitenbach	0.77
2	Killwangen-Spreitenbach	Baden	0.74
3	Baden	Brugg	0.76
4	Brugg	Pratteln	0.83
5	Pratteln	Basel	0.76
6	Killwangen-Spreitenbach	Mellingen	0.79
7	Mellingen	Othmarsingen	0.79
8	Othmarsingen	Lenzburg	0.80
9	Lenzburg	Rapperswil	0.76
10	Baden	Mellingen	0.83
11	Brugg	Othmarsingen	0.84
12	Brugg	Rapperswil	0.78
13	Rapperswil	Aarau	0.76
14	Aarau	Olten	0.77
15	Olten	Liestal	0.76
16	Liestal	Pratteln	0.73
17	Olten	Bern Wankdorf	0.83
18	Olten	Solothurn	0.88
19	Solothurn	Zollikofen	0.65
20	Solothurn	Moutier	0.81
21	Basel	Delémont	0.86
22	Delémont	Moutier	0.86
23	Moutier	Biel	0.86
24	Biel	Zollikofen	0.88
25	Zollikofen	Bern Wankdorf	0.81
26	Bern Wankdorf	Bern	0.83

Der Modal Split, also die Aufteilung der Nachfrage zwischen IV und ÖV, wurde bereits ermittelt und wird zunächst als konstant angenommen, d.h. die veränderten Nutzenfunktionen für den ÖV sollen keinen Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl haben. Es geht also in einem ersten Schritt darum, die Quelle-Ziel-Matrix für den ÖV mittels verschiedener Ansätze für die Nutzenfunktionen auf die verschiedenen Strecken umzulegen und die Ergebnisse miteinander zu vergleichen.

Als zu vergleichende Nutzenfunktionen wurden die einfache lineare Funktion (28), der logarithmische Ansatz (36) sowie der Ansatz mit Box-Cox-transformierter Grösse IND (38) verwendet. Zunächst wurden aus dem Fahrplan für die im Netz gegebenen Quelle-Ziel-Paare alle Verbindungen mit Abfahrtszeitpunkt zwischen 16:00 und 17:00 herausgesucht und deren Eigenschaften Reisezeit, Umsteigehäufigkeit und Übergangszeit herausgeschrieben.

Mit diesem Datensatz wurden dann die Eigenständigkeiten berechnet. Die Eingabe der Nutzenfunktionen führte zu den Auswahlwahrscheinlichkeiten der einzelnen Alternativen einer Verbindung sowie die Aufteilung der Nachfrage. Diese wurde nun noch auf die einzelnen Strecken verteilt, indem die Anteile von Alternativen, welche die gleichen Strecken verwenden, aufaddiert wurden. Aus dieser „manuellen Umlegung“ entstand schliesslich ein Vektor mit den Belastungen der 26 gegebenen Strecken für die verschiedenen Modellansätze.

Zur Eingabe dieser Belastungen in VISUM wurde zunächst das benötigte Teilnetz mit allen Knoten, Strecken und Verbindungen erzeugt. In dieses wurden dann die einzelnen Streckenbelastungen eingelesen und konnten nun grafisch dargestellt werden. Die Netzbelastungen für die verwendeten Ansätze sind aus Tabelle 30 sowie den Abbildungen 43, 44 und 45 ersichtlich. Tabelle 31 zeigt die prozentualen Unterschiede in den Belastungen zwischen den verschiedenen Ansätzen, Abbildungen 46 und 47 die Differenznetze zwischen den Belastungen für den Vergleich der verschiedenen Modelle. Die aus den Berechnungen resultierenden Belastungen sind jeweils auf die Nachfrage eines ganzen Tages bezogen, genau wie die Quelle-Ziel-Matrix.

Tabelle 30 Streckenbelastungen für verschiedene Modellansätze

Strecke Nr.	Belastung		
	linear (28)	Log (36)	Box-Cox (38)
1	18396	18396	18396
2	9833	9665	9648
3	9129	8957	8940
4	5281	5106	5090
5	14932	14937	14936
6	8807	8977	8994
7	8807	8977	8994
8	9183	9357	9373
9	8733	8907	8923
10	0	2	2
11	376	377	377
12	2427	2428	2428
13	10984	11150	11165
14	9322	9488	9503
15	4582	4748	4764
16	9648	9819	9834
17	5893	5904	5905
18	1804	1825	1826
19	842	653	686
20	624	811	777
21	572	562	562
22	593	603	603
23	593	766	733
24	213	390	357
25	1055	1044	1043
26	6948	6948	6948

Abbildung 43 Belastung des Beispielnetzes ohne Berücksichtigung der Ähnlichkeiten (linearer Ansatz)

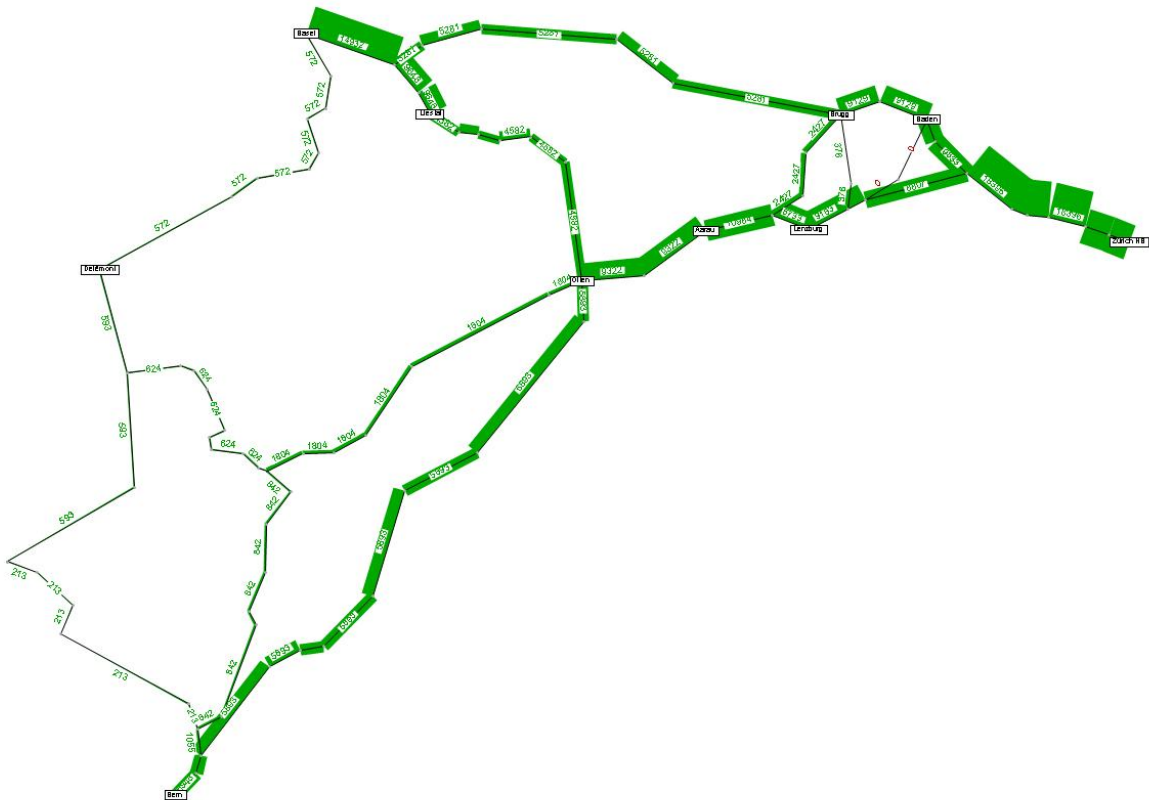


Abbildung 44 Belastung des Beispielnetzes mit Berücksichtigung der Ähnlichkeiten
(logarithmischer Ansatz)

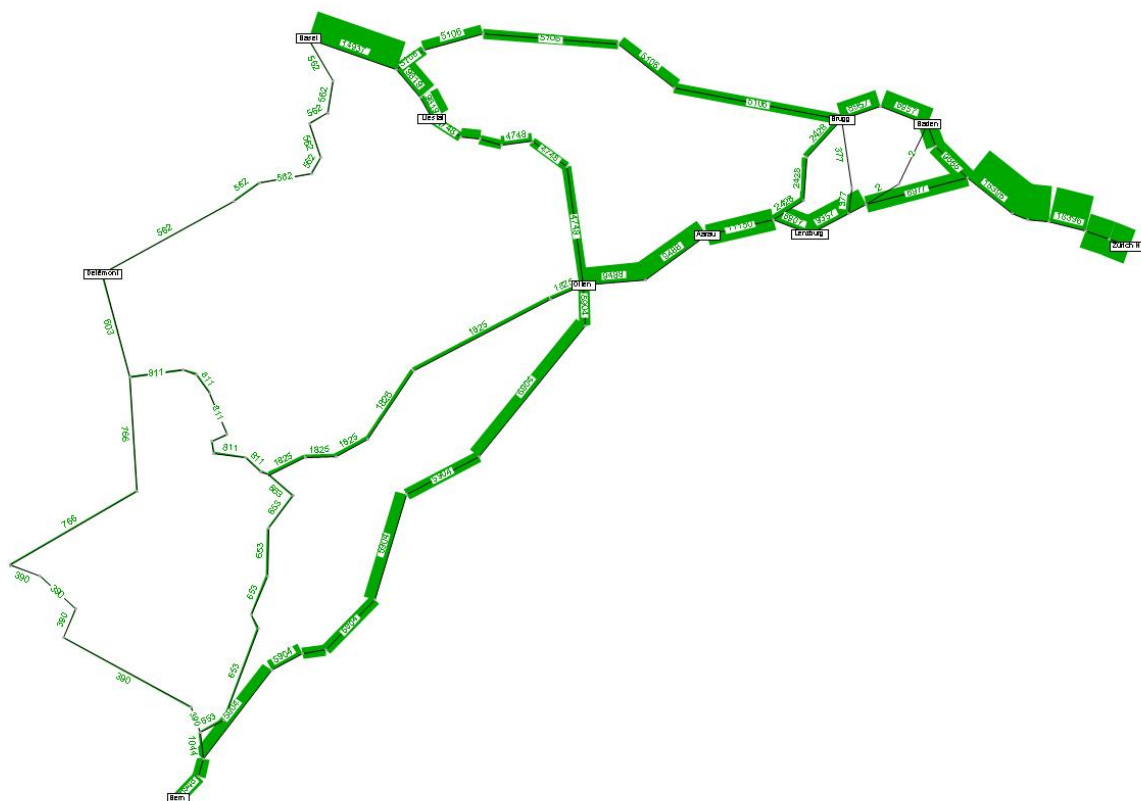


Abbildung 45 Belastung des Beispielnetzes mit Berücksichtigung der Ähnlichkeiten (Box-Cox-Ansatz)

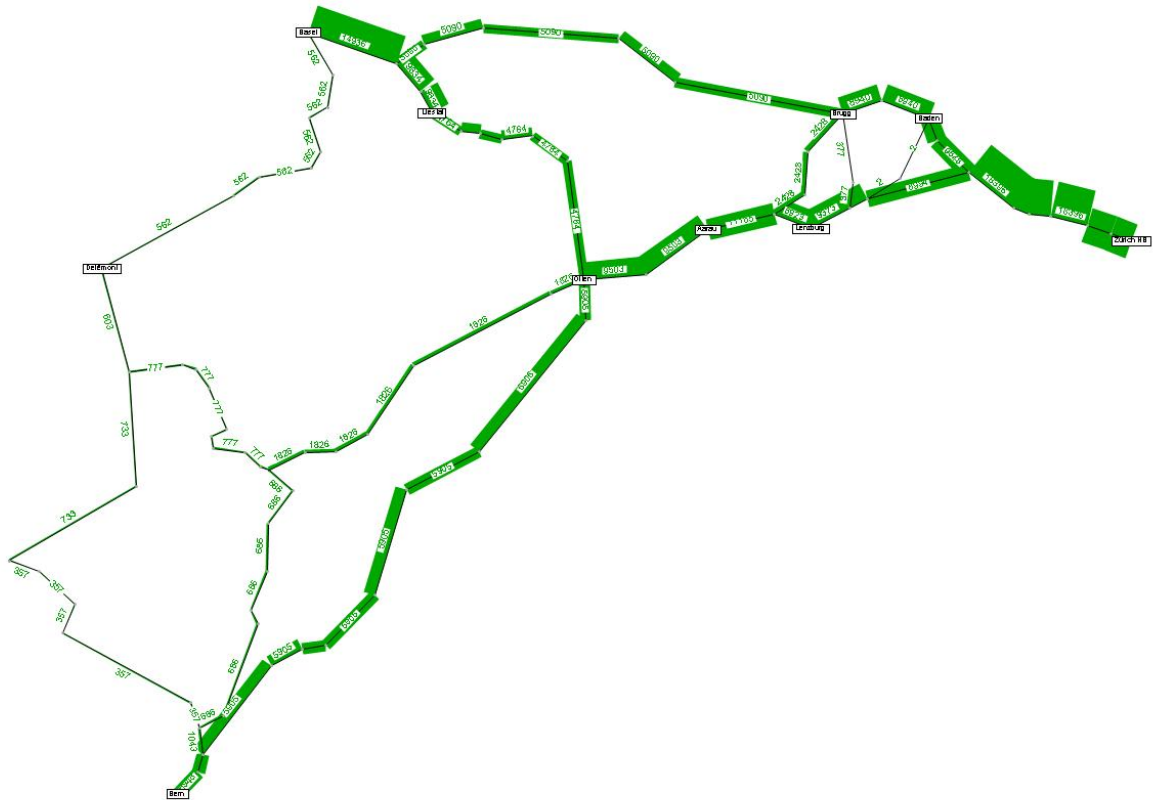
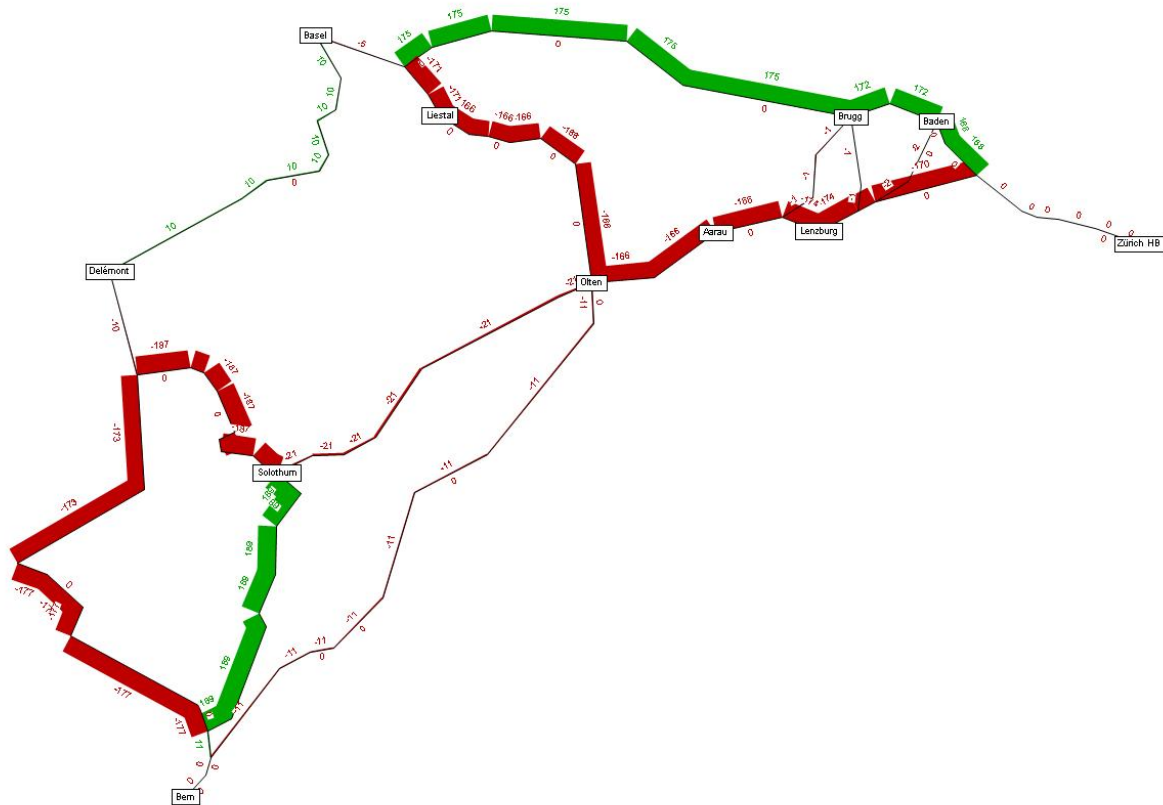


Tabelle 31 Differenzen in den Streckenbelastungen für verschiedene Modellansätze

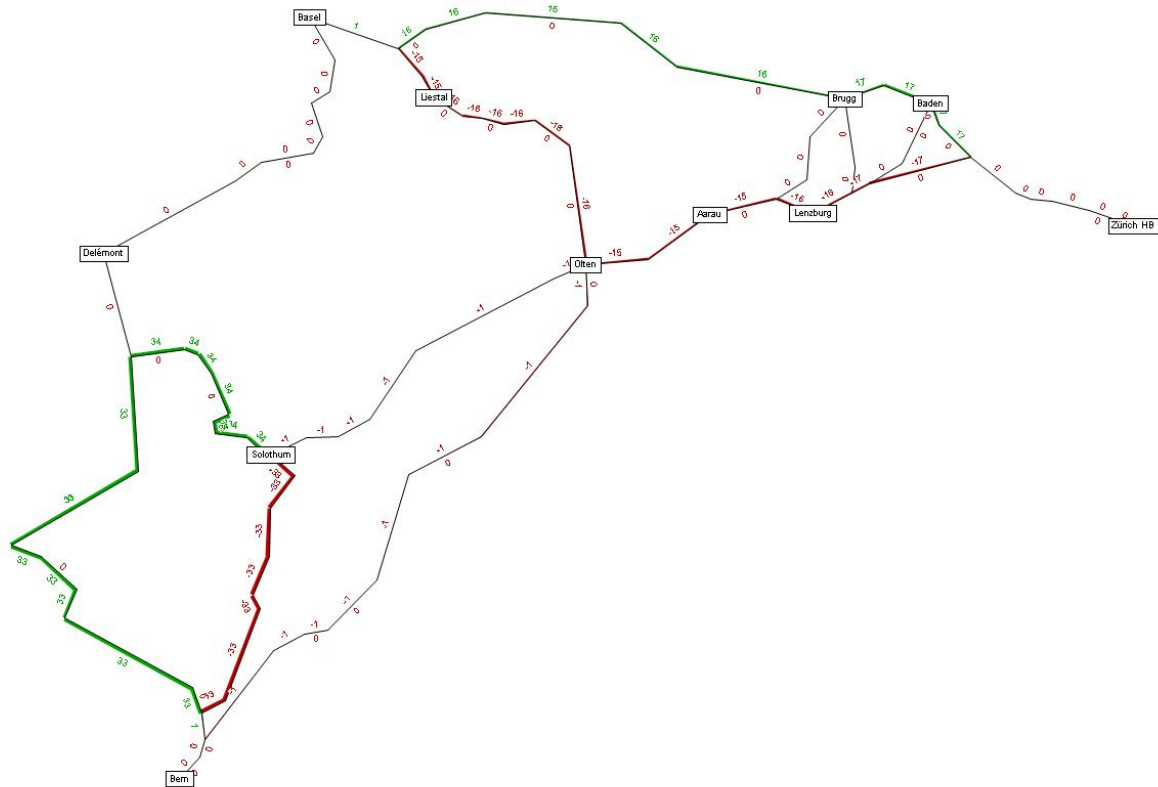
Strecke Nr.	Belastungsdifferenz [%]	
	linear – Log	Log – Box-Cox
1	0.00	0.00
2	1.71	0.18
3	1.88	0.19
4	3.31	0.31
5	-0.03	0.01
6	-1.93	-0.19
7	-1.93	-0.19
8	-1.89	-0.17
9	-1.99	-0.18
10	200.00	0.00
11	-0.27	0.00
12	-0.04	0.00
13	-1.51	-0.13
14	-1.78	-0.16
15	-3.62	-0.34
16	-1.77	-0.15
17	-0.19	-0.02
18	-1.16	-0.05
19	22.45	-5.05
20	-29.97	4.19
21	1.75	0.00
22	-1.69	0.00
23	-29.17	4.31
24	-83.10	8.46
25	1.04	0.10
26	0.00	0.00

Abbildung 46 Differenznetz der Belastungen Linear – logarithmisch



Die grössten Unterschiede sind hier bei den Verbindungen von Zürich nach Basel zu verzeichnen, wo durch die Einführung der Eigenständigkeitsvariable im nichtlinearen Modell die Auswahlwahrscheinlichkeit für die Route über Lenzburg-Aarau-Olten grösser wird und diese Nutzer von der Route über Baden-Brugg abzieht. Des Weiteren ist bei der Verbindung Solothurn-Bern ein Unterschied erkennbar: durch die grössere Eigenständigkeit wird hier die Route über Biel häufiger genutzt als beim linearen Modell. Alle anderen Strecken werden nur geringfügig beeinflusst.

Abbildung 47 Differenznetz der Belastungen Logarithmisch – Box-Cox



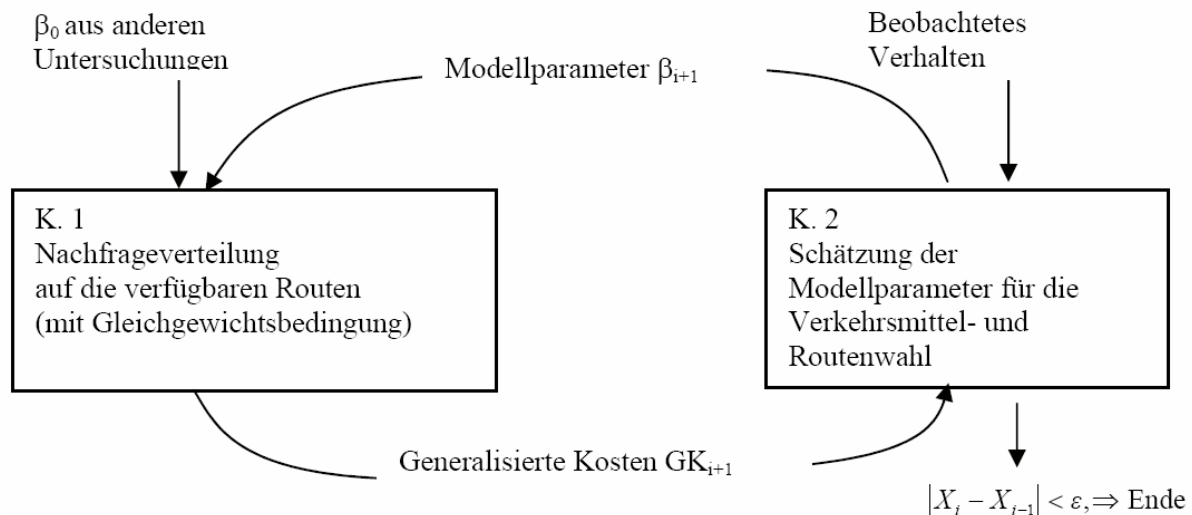
Es ist ersichtlich, dass die Änderung der Nutzenfunktion vom logarithmischen zum Box-Cox-Ansatz nur eine leichte Veränderung der Auswahlwahrscheinlichkeiten und Routenbelastungen zur Folge hat. Die aus Abbildung 46 ersichtlichen Trends werden durch den neuen Modellansatz erwartungsgemäss leicht verstärkt. Durch den Box-Cox-Ansatz werden Ähnlichkeiten zwischen Routenalternativen zwar noch stärker bestraft, bzw. zeitlich eigenständige Routen sehr stark bevorzugt. Bei den meisten Routen wird dieser Trend, welcher grosse Unterschiede in der Bewertung nur bei sehr ähnlichen Routen ($IND < 0.3$, siehe Abbildung 22) zur Folge hat, jedoch bereits durch das logarithmische Modell ausreichend berücksichtigt.

8.2 Simultanes Routen- und Verkehrsmittelwahlmodell

Abschliessend sollen die neuen Parameter, welche für die Modellschätzungen in dieser Arbeit verwendet wurden, in ein bestehendes Programm, welches in Vrtic (2003) entwickelt wurde, eingebunden werden. Dieses Programm berechnet iterativ sowohl ein Verkehrsmittel- als auch ein Routenwahlmodell und kalibriert die Modellparameter für die Nutzenfunktionen. Als Modellform wird der Nested-C-Logit-Ansatz verwendet, eine Kombination aus Nested- und C-Logit. Durch die Korrektur des Nested-Logit-Modells mit der Berücksichtigung der räumlichen Überlappung von Routen analog zum C-Logit und somit der teilweisen Elimination der IIA-Eigenschaft ist das Nested-C-Logit ein gutes Modell für die simultane Routen- und Verkehrsmittelwahl.

Der entwickelte Modellansatz erreicht sowohl ein inneres Gleichgewicht bei der Nachfrageaufteilung im Netz als auch ein äusseres zwischen der Umlegung im Netz und den geschätzten Modellparametern. Dieser Optimierungsvorgang ist in Abbildung 48 dargestellt.

Abbildung 48 Ablauf des Optimierungsprozesses



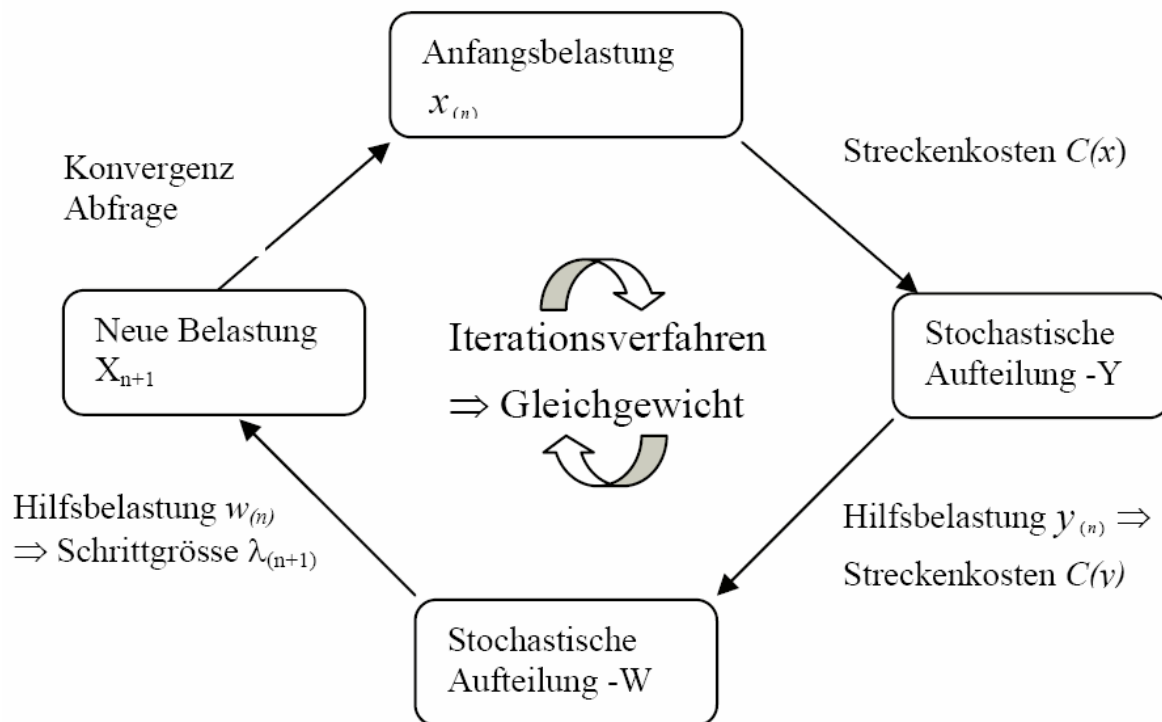
Quelle: Vrtic (2003)

Die Initialisierung des Prozesses besteht in der Nachfrageverteilung auf das Netz anhand von vorgegebenen Parametern, welche aus vorangegangenen Untersuchungen übernommen oder

als Erfahrungswerte festgelegt werden. Die Umlegung ergibt dann neue, von den jeweiligen Belastungen abhängige Variablen (Zeit, Preis...), welche im nächsten Schritt für die Kalibrierung der neuen Modellparameter verwendet werden. Dieser Prozess wird solange durchgeführt, bis eine Konvergenzbedingung erreicht ist, die Modellparameter sich also zwischen zwei Iterationsschritten nicht mehr signifikant verändern.

Die Umlegung der Nachfrage auf das Netz erfolgt mittels eines stochastischen Nutzergleichgewichts (SUE). Das Verfahren ist in Abbildung 49 dargestellt. Für die detaillierte Beschreibung des Iterationsprozesses wird auf Vrtic (2003) verwiesen.

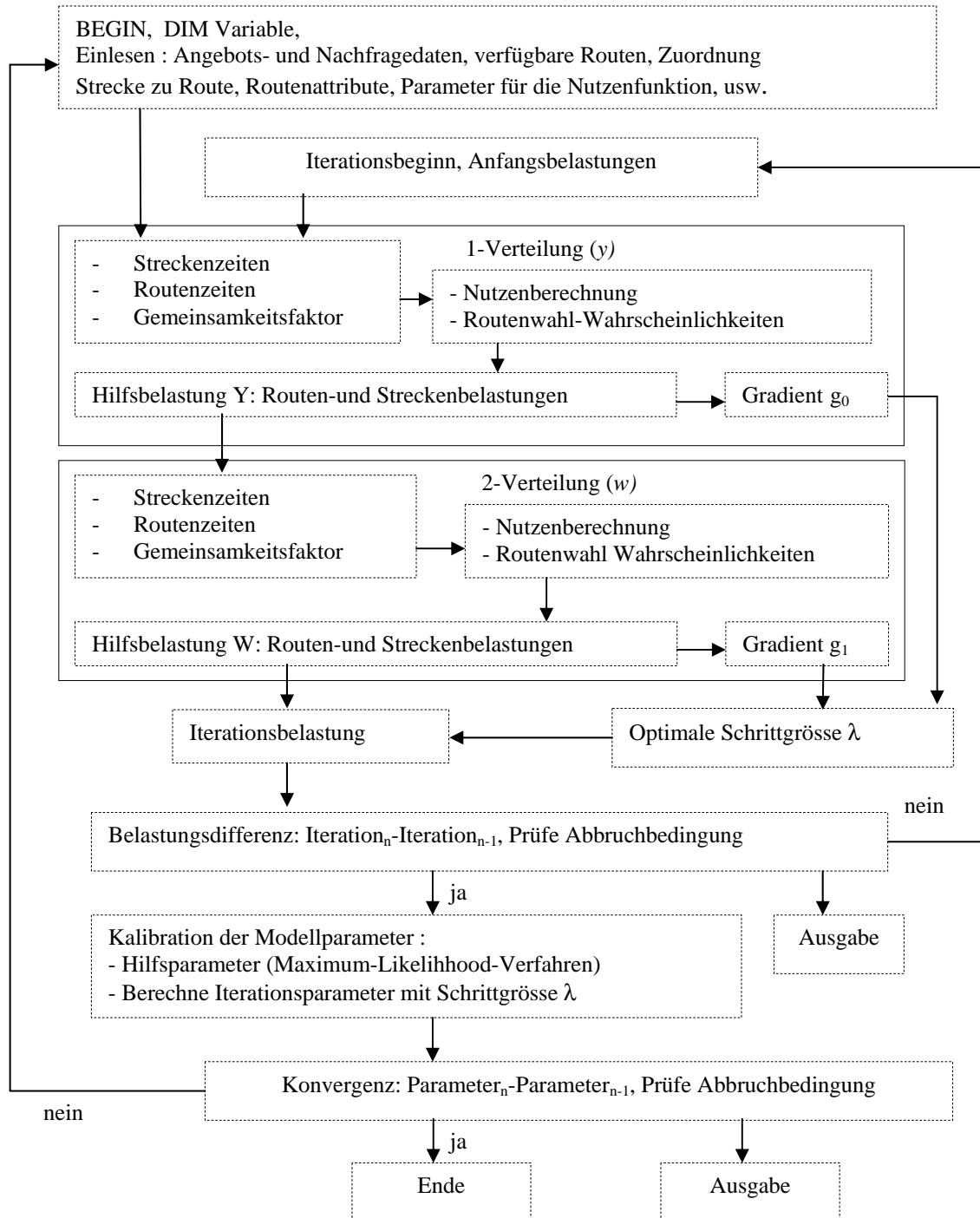
Abbildung 49 Ablauf des SUE-Verfahrens



Quelle: Vrtic (2003)

Es liegt ein VBA-Programm vor, welches iterativ die Nachfrageverteilung berechnet und so einen Gleichgewichtszustand herstellt und die Einflussgrößen für die generalisierten Kosten berechnet. Die Kalibrierung der Modellparameter, also die Log-Likelihood-Schätzung, erfolgt mit dem EXCEL-Solver. Die Ergebnisse werden gespeichert und mit den neuen Nutzenfunktionen wieder an das Skript übergeben, welches ein neues Gleichgewicht berechnet. Der Ablauf des Programms ist in Abbildung 50 dargestellt.

Abbildung 50 Ablauf des Programms



Quelle: Vrtic (2003)

Das Programm soll nun durch die Einbindung der zeitlichen Eigenständigkeiten, also der Variable IND, in die Nutzenfunktionen ergänzt werden.

Das verwendete Netz ist dasselbe wie in Kapitel 8 beschrieben. Für jede Quelle-Ziel-Beziehung sind maximal 2 verschiedene ÖV- sowie 3 IV-Routen mit deren Eigenschaften Reisezeit, Preis, Umsteigehäufigkeit, Takt und Ähnlichkeiten cf (siehe Kapitel 2.4) definiert. Die Einbindung der Variable IND in den Datensatz erfolgt, indem für die aus dem Fahrplan gewonnenen Verbindungsalternativen (jeweils bis zu 5) der Mittelwert jener Verbindungen verwendet wird, welche dieselbe Route verwenden. An einem konkreten Beispiel sieht dies wie folgt aus: zwischen Zürich und Basel wurden zwischen 16:00 und 17:00 5 verschiedene Verbindungen gefunden. 2 davon verkehren über Baden-Brugg (Route 1), die restlichen 3 über Lenzburg-Aarau-Olten (Route 2). Für diese 5 Verbindungen wurden für die Berechnungen in Kapitel 8 bereits die zeitlichen Eigenständigkeiten ermittelt. Es wird nun der Mittelwert von IND für die 2 verschiedenen Routen berechnet, also ein Wert für Route 1 und einer für Route 2. Diese Werte werden nun in den Datensatz für das Programm übermittelt. Diese Vereinfachung ist notwendig, da in besagtem Datensatz keine Fahrplandaten vorhanden sind und die Berücksichtigung der Eigenständigkeiten demnach nur durch diese manuelle Eingabe erfolgen kann.

Die Nutzenfunktionen für ÖV und IV sehen einschliesslich der C-Logit-Korrektur (cf. Kapitel 2.4) wie folgt aus:

$$U_{IV} = const + \beta_{RZeit} \cdot RZeit_{IV} + \beta_{Preis} \cdot Preis_{IV} - cf_{IV} \quad (79)$$

$$U_{\text{ÖV}} = \beta_{RZeit} \cdot RZeit_{\text{ÖV}} + \beta_{Preis} \cdot Preis_{\text{ÖV}} + \beta_{Umst} \cdot Umst + \beta_{Takt} \cdot Takt - cf_{\text{ÖV}} + \beta_{IND} \cdot T(IND) \quad (80)$$

Die Nutzenfunktionen werden zudem mit einem zu schätzenden Parameter μ für das Nested-Logit-Modell (cf. Kapitel 2.6) skaliert. Die Modifizierung der Nutzenfunktionen durch die Einführung der zusätzlichen Variablen wurde im VBA-Code sowie in den jeweiligen EXCEL-Worksheets für die Parameterschätzung vorgenommen. Das Programm konnte also nun mit angenommenen Anfangswerten für die Modellparameter laufen gelassen werden und so ein neues Entscheidungsmodell geschätzt werden. Die geschätzten Parameter sind die b 's für die Nutzenkomponenten, der Skalierungsfaktor sowie das a des C-Logit-Modells wie in Kapitel 2.4 angegeben. Als Anfangswerte werden für β_{IND} und λ Werte von 0.1 resp. -3.5 angenommen. Für alle anderen Parameter werden als Anfangswerte die in Vrtic (2003) geschätzten Parameter gewählt. Diese resultierten aus einer Kalibrierung mit 11 Iterationsschritten. Die angenommenen Anfangswerte für die Parameter sowie die Ergebnisse der Modellschätzung, welche nach weiteren 3 Iterationen erreicht wurden, sind in Tabelle 32 angegeben. In einem weiteren Versuch wurde das Modell unter Vernachlässigung der

räumlichen Überlappung beim ÖV geschätzt, die Ähnlichkeiten zwischen ÖV-Routen also alleine über die Grösse IND berücksichtigt. Dies führt zu einer leichten Verschlechterung der Log-Likelihood-Schätzung. Des Weiteren wurde versucht, auch die räumliche Überlappung nicht zu logarithmieren, sondern als Box-Cox-transformierte Variable einzuführen, d.h. den C-Logit-Ansatz wie folgt zu modifizieren:

$$cf_i = \alpha \cdot T \left(1 + \sum_{j=1}^n \left(\frac{L_{ij}}{\sqrt{L_i} \cdot \sqrt{L_j}} \right)^\lambda \right) \quad (81)$$

Dieser Ansatz verbessert die Log-Likelihood des Modells leicht. Alle Modellergebnisse sind aus Tabelle 32 ersichtlich.

Tabelle 32 Ergebnisse der Modellschätzungen

Parameter	const	μ	β_{RZeit}	β_{Preis}	β_{Umst}	β_{Takt}	β_{IND}	λ	α_{cf}	ln(L)
Anfangswerte	0.029	0.177	-0.366	-0.030	-0.257	-0.371	0.100	-3.500	0.191	-114.7
geschätzte Werte	0.067	0.206	-0.347	-0.010	-0.070	-0.354	0.114	-3.490	0.221	-113.3
geschätzte Werte ohne $cf_{\text{ÖV}}$	0.100	0.158	-0.253	-0.010	-0.041	-0.402	0.096	-3.497	0.135	-113.8
geschätzte Werte mit Box-Cox-Ansatz für cf	0.039	0.156	-0.249	-0.010	-0.043	-0.291	0.085	-3.489	0.082 $\lambda = 1.67$	-113.1

Es ergibt sich also als Nutzenkomponente für die Eigenständigkeit:

$$U_{IND} = 0.114 \cdot T_{-3.490}(IND) \quad (82)$$

Der Verlauf dieser Nutzenkomponente und der Vergleich mit jener, welche aus der Schätzung von Modell (38) resultiert, sowie mit der einfachen logarithmischen Funktion ($\beta = 1$, $\lambda = 0$) ist in Abbildung 51 dargestellt. Abbildung 52 zeigt den Verlauf des Log-Ansatzes für die räumliche Überlappung cf im Vergleich mit dem Box-Cox-Modell. Mit l wird hier der Term

$$\sum_{j=1}^n \left(\frac{L_{ij}}{\sqrt{L_i} \cdot \sqrt{L_j}} \right)^\lambda$$

in der Formel für die Berechnung von cf bezeichnet.

Abbildung 51 Vergleich der Nutzenfunktionen in Abhängigkeit von IND

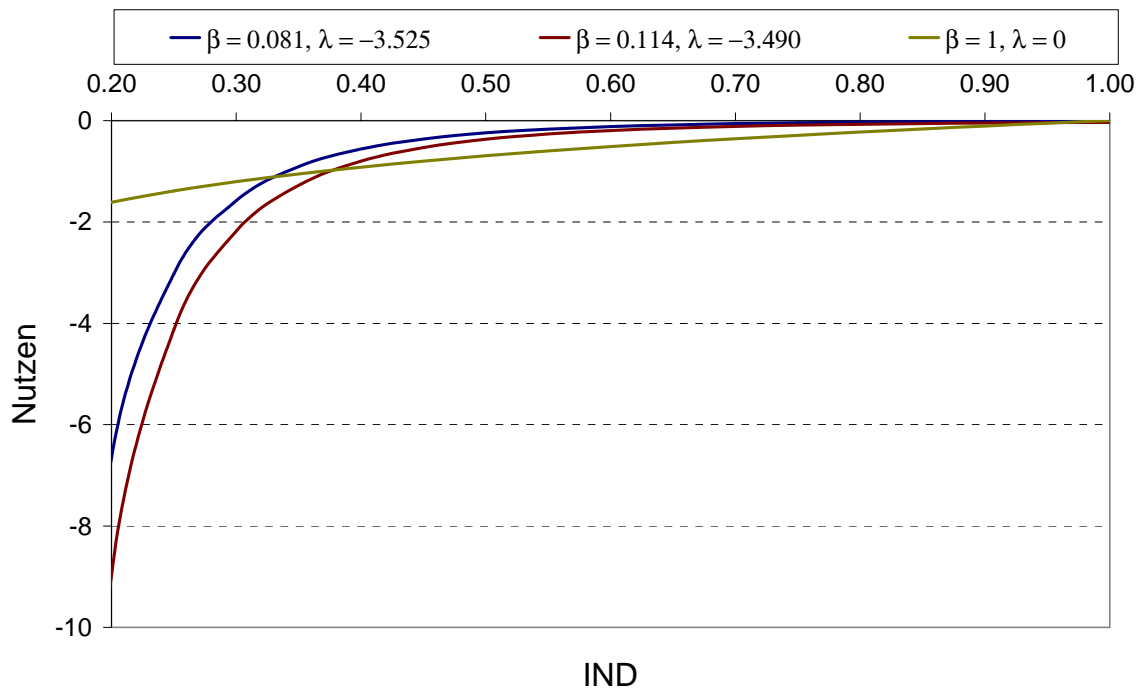
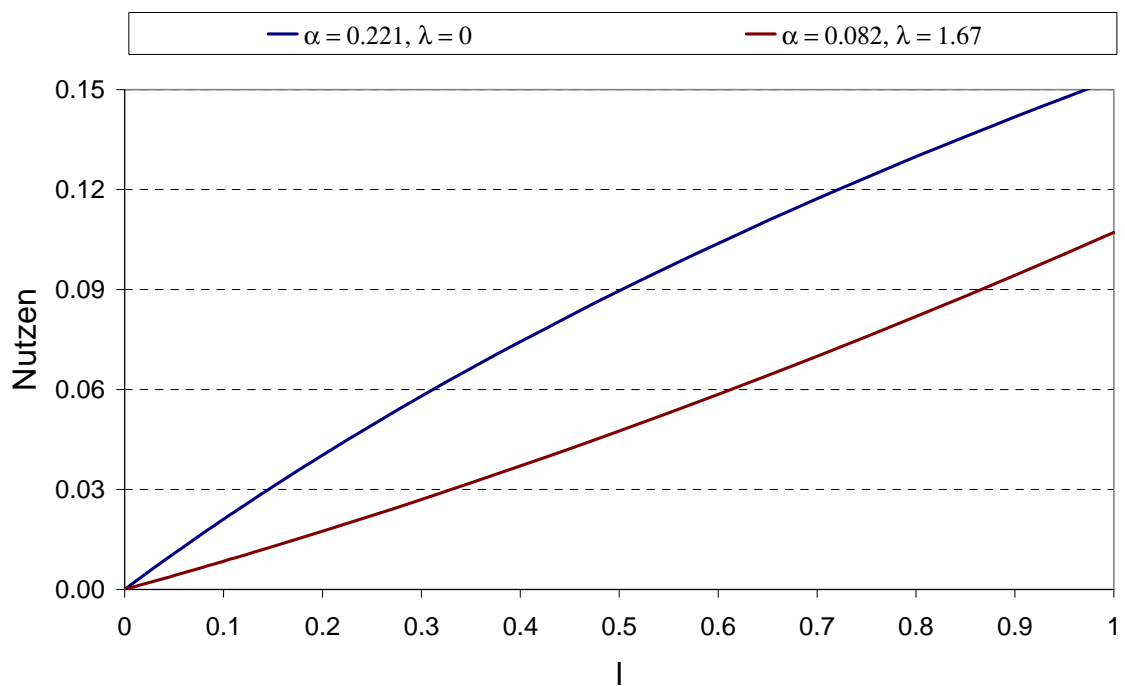


Abbildung 52 Vergleich der Nutzenfunktionen in Abhängigkeit von IND



Die Kalibrierung des Modells mit einem neuen Datensatz bestätigt also weitgehend die in Kapitel 6 ermittelten Trends. Die Auswirkungen dieser Modellschätzung auf die Aufteilung der Verkehrsnachfrage zwischen Strasse und Bahn sind in Tabelle 33 dargestellt.

Tabelle 33 ÖV-Anteile in den Modellen mit und ohne Berücksichtigung von IND

ÖV-Anteile ohne IND aus Vrtic (2003) [%]												
von	nach	Zürich	Baden	Brugg	Basel	Delé- mont	Solo- thurn	Bern	Olten	Lies- tal	Aarau	Lenz- burg
Zürich		-	47	48	44	34	48	44	47	44	46	50
Baden		47	-	47	40		35	43	44	34	41	34
Brugg		48	47	-	40	36	36	44	47	35	54	37
Basel		44	40	40	-	42	36	40	53	43	36	39
Delemont		31	0	36	42	-	39	37	29	0	34	0
Solothurn		48	35	36	36	39	-	43	47	37	40	41
Bern		44	43	44	40	37	43	-	48	38	44	42
Olten		47	44	47	53	29	47	48	-	51	46	46
Liestal		44	34	35	43		37	38	51	-	45	44
Aarau			41	54	36	34	40	44	46	45	-	46
Lenzburg		50	34	37	40	0	41	42	46	44	46	-
ÖV-Anteile mit IND aus geschätztem Modell [%]												
von	nach	Zürich	Baden	Brugg	Basel	Delé- mont	Solo- thurn	Bern	Olten	Lies- tal	Aarau	Lenz- burg
Zürich		-	45	46	44	40	48	42	46	43	44	48
Baden		46	-	41	41		39	46	40	46	46	36
Brugg		40	37	-	47	36	40	38	40	42	45	46
Basel		40	44	39	-	41	39	38	50	37	37	39
Delemont		50	0	43	41	-	40	35	33	0	40	0
Solothurn		41	40	43	41	31	-	40	38	41	48	40
Bern		40	39	43	39	40	44	-	41	40	36	42
Olten		49	46	39	41	41	47	46	-	43	46	46
Liestal		45	46	48	50	0	29	46	46	-	46	47
Aarau		41	45	41	35	36	42	46	41	43	-	47
Lenzburg		45	47	45	45	0	41	45	39	30	35	-

Differenz der ÖV-Anteile Vrtic - geschätzt [%]

von	nach	Zürich	Baden	Brugg	Basel	Delémont	Solothurn	Bern	Olten	Liestal	Aarau	Lenzburg
Zürich		-	2	2	1	-6	1	2	1	2	2	2
Baden		1	-	6	-1	0	-3	-2	4	-12	-5	-2
Brugg		8	10	-	-7	0	-4	5	7	-7	10	-9
Basel		5	-5	1	-	1	-3	1	3	6	-1	0
Delemont		-19	0	-7	1	-	0	2	-4	0	-6	0
Solothurn		7	-4	-7	-6	9	-	3	9	-5	-7	1
Bern		4	5	1	0	-3	-1	-	7	-1	7	0
Olten		-2	-2	8	12	-11	1	2	-	8	0	0
Liestal		-1	-11	-12	-7	0	7	-8	5	-	-1	-3
Aarau		5	-4	14	1	-3	-2	-2	5	2	-	-1
Lenzburg		5	-13	-8	-5	0	1	-3	7	13	12	-

Die grössten Unterschiede resultieren demnach bei den Verbindungen von und nach Delémont resp. Liestal. Bei diesen werden der Nutzen der ÖV-Variante und dadurch die Auswahlwahrscheinlichkeit des ÖV im Verkehrsmittelwahlmodell durch die hohe zeitliche Eigenständigkeit der angebotenen Verbindungen am grössten.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung von Routenwahlmodellen im öffentlichen Verkehr. Es sollte anhand verschiedener funktionaler Ansätze für die Nutzenfunktionen erprobt werden, wie sich verschiedene Einflussgrößen auf den Nutzen einer vorgeschlagenen Route und somit auf deren Auswahlwahrscheinlichkeit unter dem Satz der vorhandenen Alternativen auswirken. Die betrachteten Variablen waren die Routeneigenschaften Reisezeit, Umsteigehäufigkeit und Übergangszeiten sowie soziodemographische Eigenschaften der auf den erhobenen Routen erfassten Reisenden: Alter, Geschlecht und Fahrtzweck. Des Weiteren sollte der Einfluss einer weiteren, in vorangegangenen Untersuchungen vernachlässigten Variable, der zeitlichen Ähnlichkeit zwischen verschiedenen Routen und der damit einhergehenden gegenseitigen Beeinflussung dieser, untersucht werden. Der für die Nutzenkomponente dieser Grösse allgemein angenommene logarithmische Ansatz wurde hinterfragt und mit verschiedenen neuen Ansätzen verglichen. Es stellte sich heraus, dass für die Eigenständigkeit einer Route ein Box-Cox-transformierter Ansatz, welcher grosse Ähnlichkeiten zwischen konkurrierenden Routen stärker negativ bewertet, in der Log-Likelihood-Schätzung besser abschneidet als der bisher angenommene Ansatz. Für die weiteren Routeneigenschaften wurden jeweils Parameter mit dem zu erwartenden negativen Vorzeichen geschätzt, die Modellergebnisse sind also durchweg plausibel.

Des Weiteren wurden verschiedene Gruppen von Modellen geschätzt, welche Interaktionen zwischen Routeneigenschaften, z.B. die unterschiedliche Bewertung des Umsteigens bei zunehmender Reisedistanz bzw. –dauer berücksichtigen. Zudem wurden die soziodemographischen Eigenschaften in die Nutzenfunktionen eingebunden, um Unterschiede im Routenwahlverhalten zwischen verschiedenen Bevölkerungsgruppen aufzuzeigen. Diese Untersuchungen führten zu konsistenten Ergebnissen.

Als letzter Schritt der Arbeit sollten die Erkenntnisse, welche aus der Schätzung der Nutzenfunktionen unter Einbindung des neu eingeführten Eigenständigkeitsparameters gewonnen wurden, in ein konkretes Beispiel eingeführt werden. Zunächst wurden für ein Teilnetz der SBB die Eigenständigkeitsparameter berechnet, die Nutzenfunktionen eingegeben und die Auswahlwahrscheinlichkeiten sowie daraus die Streckenbelastungen für die im Netz vorhandenen Routen für den Ansatz ohne und jenen mit Berücksichtigung der neuen Variablen ermittelt. Die Ergebnisse wurden ins Netzmodell eingegeben, was eine Visualisierung der Unterschiede zwischen den jeweiligen Ansätzen ermöglichte.

Dann wurde die neue Nutzenkomponente in ein bestehendes Programm zur simultanen Modellierung der Routen- und Verkehrsmittelwahl eingebunden. Die Ergebnisse der Parameterschätzung decken sich tendenziell mit jenen aus den vorangegangenen Modellschätzungen, so dass schlussfolgernd festgehalten werden kann, dass der Box-Cox-Ansatz sich zumindest bei den beiden in dieser Arbeit untersuchten Datensätzen bewährt hat. Zukünftige Arbeiten sollten sich eingehend mit der Einbindung der Ähnlichkeitsvariablen in die Nutzenfunktionen für die Routenwahlmodellierung befassen und Empfehlungen zur formellen Berücksichtigung dieser Grösse in Umlegungssoftwares ausarbeiten.

10 Literatur

- Axhausen, K.W. (2005) Entscheidungsmodelle, *Materialien zur Vorlesung Verkehr I: Verkehrsplanung*, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich, Zürich
- Axhausen, K.W. (2002) Werkzeuge: Entscheidungsmodelle, *Materialien zur Vorlesung Verkehrskonzepte*, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich, Zürich
- Axhausen, K.W. und P. Keller (2003) Hinweise für die Erstellung von studentischen Berichten, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, **76**, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich, Zürich
- Batley, R., A. Daly, T. Fowkes, E. Hato, D. Watling und G. Whelan (2001) Models for analyzing route choice, *Universities' Transport Studies Group Conference*, University of Oxford
- Ben-Akiva, M. und M. Bierlaire (1999) Discrete choice methods and their applications to short term travel decisions, *Handbook of Transportation Science*, **23**, 5-35, Kluwer
- Bierlaire, M. (2005) *An introduction to BIOGEME (Version 1.3)*, roso.epfl.ch/mbi/biogeme/doc/tutorial.pdf
- Bovy, P.H.L. und S. Hoogendorn-Lanser (2005) Modelling route choice behavior in multi-modal transport networks, *Transportation*, **32** (4) 341-368
- Cascetta, E. (2001) Path choice models, in E. Cascetta *Transportation Systems Engineering: Theory and Methods*, 197-215, Kluwer, Dordrecht
- Ortúzar, J. d. D. und L. G. Willumsen (2001) Public transport assignment, *Modelling Transport*, 343-351, John Wiley & Sons Ltd., Chichester
- Freijinger, E. und M. Bierlaire (2006) Capturing correlation in large scale route choice models, *Report RO-060106*, Operations Research Group (ROSO), Institute of Mathematics, EPF Lausanne, Lausanne
- Friedrich, M., I. Hofsaess und S. Weckeck (2001) Timetable-based transit assignment using branch and bound techniques, *Transportation Research Record*, **1752**, 100-107
- Hertkorn, G. und P. Wagner (2003) Modellierung von Verkehrsnachfrage, *Vorlesung Prinzipien der Verkehrssystemplanung*, Institut für Verkehrsforschung, TU Berlin, Berlin

- Hokamp, P. (2004) Fahrgasterhebung im Gebiet der Stadt Oberhausen 2003 – Beschreibung der Grund- und Auswertedateien, PTV AG, Karlsruhe
- Hoogendorn-Lanser, S., P. Bovy und R. van Nes (2004) Path size modeling in multi-modal route choice analysis, paper prepared for the 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., January 2005
- König, A., K.W. Axhausen und G. Abay (2001) Zeitkostenansätze im Personenverkehr: Hauptstudie, *Forschungsbericht SVI 2001/534*, IVT, Rapp Trans AG, Zürich
- Lohse, D. (2004) Nachfragemodellierung mit dem Modell EVA, Institut für Verkehrsplanung und Strassenverkehr, TU Dresden, Dresden
- Prashker, J.N. und S. Bekhor (2003) Route choice models used in the stochastic user equilibrium problem: A review, *Transport Reviews*, **24** (4) 437-463
- Russo, F. und A. Vitetta (2003) An assignment model with modified logit, which obviates enumeration and overlapping problems, *Transportation*, **30** (2) 177-201
- Schiller, C. (2004) Integration des Ruhenden Verkehrs in die Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung, *Dissertation*, Institut für Verkehrsplanung und Strassenverkehr, TU Dresden, Dresden
- Schnabel, W. und D. Lohse (1997) *Grundlagen der Strassenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*, **II**, Verlag für Bauwesen, Berlin
- Tschopp, M. (2003) Das multinomiale Logit-Modell, *Doktorandenseminar 2003*, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich, Zürich
- Vrtic, M. (2003) Abbildung der Ähnlichkeiten von Alternativen durch Korrekturfaktoren, *Doktorandenseminar 2003*, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich, Zürich
- Vrtic, M. (2003) Simultanes Routen- und Verkehrsmittelwahlmodell, *Dissertation*, Fakultät für Verkehrswissenschaften, TU Dresden, Dresden
- Vrtic, M. und K.W. Axhausen (2002) Modelle der Verkehrsmittelwahl aus RP- und SP-Datengrundlage, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, **105**, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich, Zürich
- Vrtic, M. und K.W. Axhausen (2002) The impact of tilting trains in Switzerland: a route choice model of regional- and long distance public transport trips, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, **128**, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich, Zürich
- Vrtic, M. und K.W. Axhausen (2003) Überprüfung von Prognosemethoden im Personenverkehr, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, **153**, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich, Zürich

- Vrtic, M., K.W. Axhausen, P. Fröhlich, U. Heidl, P. Kern, F. Perret, S. Pfisterer, N. Schüssler, C. Schultze, C. Schulze und A. Zimmermann (2005) Verkehrsmodell für den öffentlichen Verkehr des Kantons Zürich, Im Auftrag des Amtes für Verkehr, Kanton Zürich, IVT, Ernst Basler + Partner und PTV Karlsruhe, Zürich
- Vrtic, M., K.W. Axhausen, P. Fröhlich, D. Lohse, C. Schiller, N. Schüssler und H. Teichert (2005) A simultaneous two-dimensionally constraint disaggregate trip generation, distribution and mode choice model: Theory and application for the Swiss national model, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, **309**, IVT, ETH Zürich, Zürich

11 Glossar

11.1 Gumbel-Verteilung

Die Gumbel-Verteilung ist eine die Normalverteilung annähernde Wahrscheinlichkeitsverteilung mit folgender Verteilungsfunktion:

$$F(x) = e^{-e^{-x}} \quad (83)$$

Die Dichtefunktion (Ableitung der Verteilungsfunktion) lautet:

$$f(x) = e^{-x} \cdot e^{-e^{-x}} \quad (84)$$

Der Erwartungswert und die Varianz sind gegeben durch:

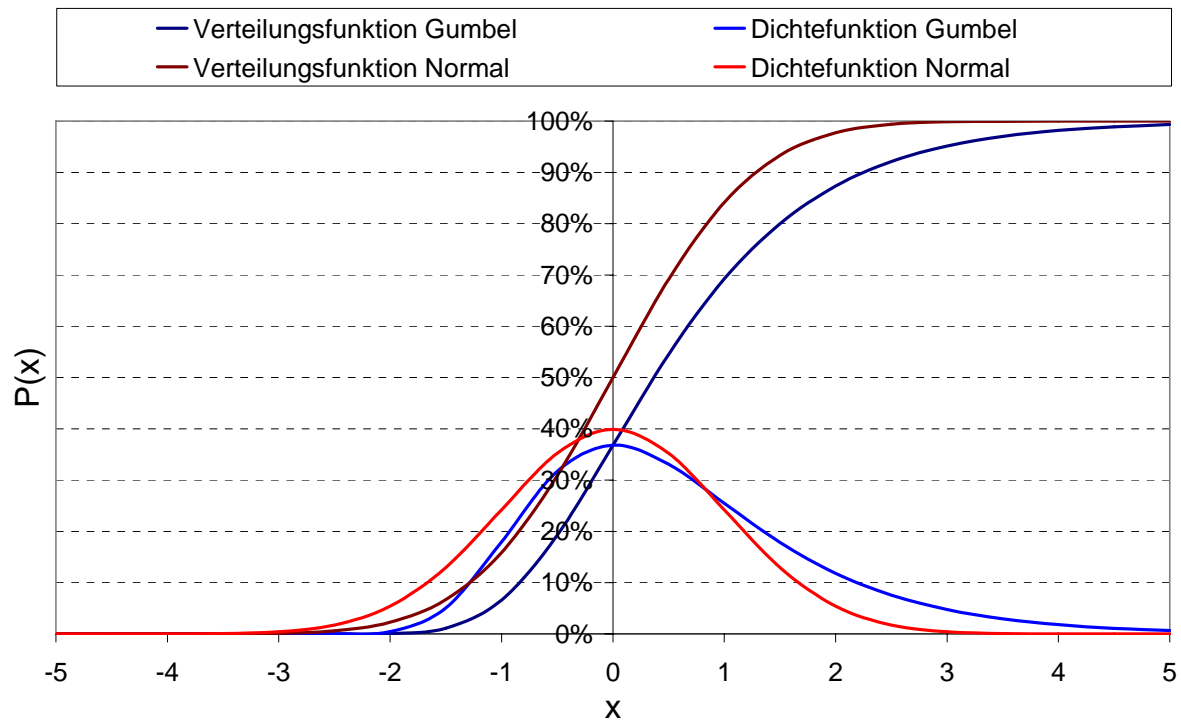
$$E(X) = \gamma \quad (85)$$

$$\gamma = 0.5772 \quad \text{Euler-Mascheroni-Konstante}$$

$$V(X) = \frac{\pi^2}{6} \quad (86)$$

Verteilungs- und Dichtefunktion von Gumbel- und Standard-Normalverteilung sind in Abbildung 53 dargestellt.

Abbildung 53 Verteilungs- und Dichtefunktionen für Gumbel- und Standard-Normalverteilung



11.2 Box-Cox-Transformation

Die Box-Cox-Transformation ist ein Spezialfall der Box-Tukey-Transformation, welche wie folgt definiert ist:

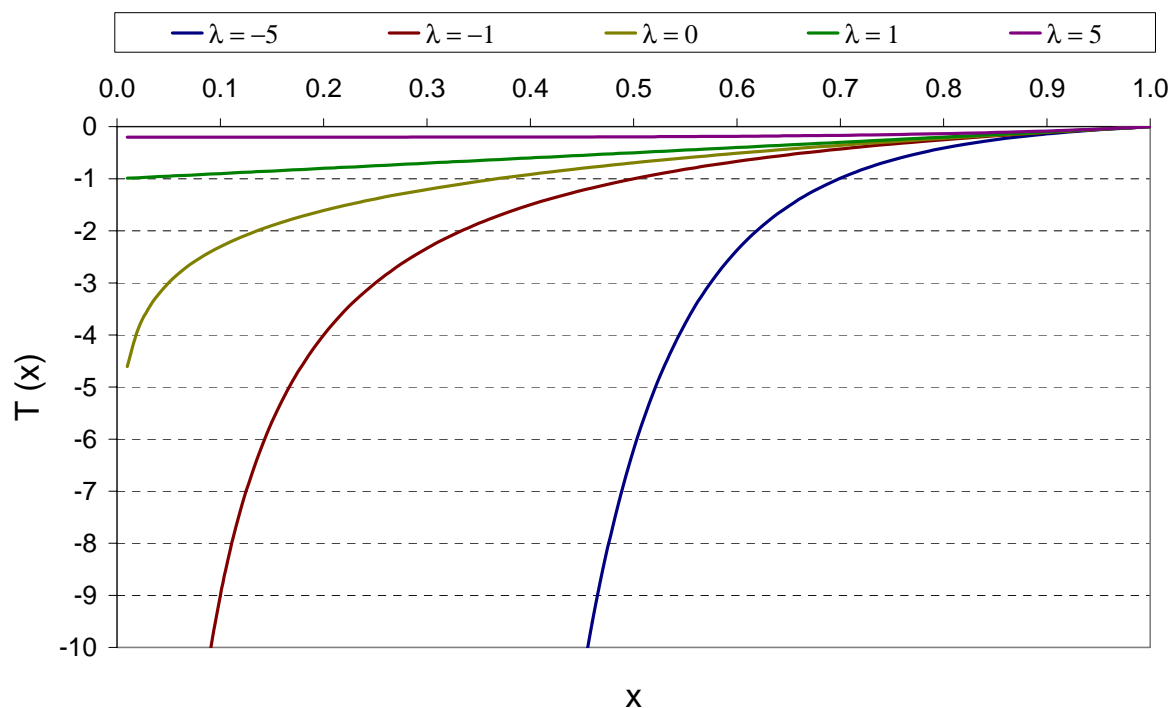
$$T_{\lambda, \mu}(x) = \begin{cases} \frac{(x + \mu)^\lambda - 1}{\lambda} & \lambda \neq 0 \\ \ln(x + \mu) & \lambda = 0 \end{cases} \quad (87)$$

Bei der Box-Cox-Transformation wird der Parameter $\mu = 0$ gesetzt. Sie ist ein in der Statistik angewendetes Verfahren zur Linearisierung einer Variable, welche zur Verbesserung des Fittings von Modellparametern verwendet wird (d.h. um die Korrelation einer Einflussgröße und einer davon abhängigen Größe zu reduzieren), und ist durch folgende Funktion gegeben:

$$T_{\lambda}(x) = \begin{cases} \frac{x^{\lambda} - 1}{\lambda} & \lambda \neq 0 \\ \ln x & \lambda = 0 \end{cases} \quad (88)$$

Der Verlauf der Box-Cox-Funktion ist für verschiedene Werte von λ in Abbildung 54 dargestellt. Bei negativem λ verläuft die Funktion für Werte nahe an 0 steiler als der Logarithmus, für positive λ 's flacher.

Abbildung 54 Box-Cox-Transformation für verschiedene Werte von λ



11.3 Effect Coding

Effect Coding ist eine Methode zur Kodierung von Dummyvariablen. Es gibt 2 grundsätzliche Arten, die Kodierung durchzuführen.

Bei der ersten Methode (auch Dummy Coding genannt), die auch in dieser Arbeit verwendet wird, wird die Dummyvariable 1 gesetzt, wenn ein Zustand zutrifft, andernfalls 0. Gehört beispielsweise eine Person der Altersgruppe Nr. 3 aus 5 möglichen an, so ist die

Dummyvariable AGruppe_3 gleich 1, alle anderen AGruppe_i gleich 0. Im Modell werden von n Kategorien nur n-1 verwendet, diejenige, welche nicht vorhanden ist, wird als Referenzkategorie verwendet und die Parameter für die anderen Kategorien mit dieser verglichen. In den in dieser Arbeit beschriebenen Modellen sind die Referenzkategorien die Gruppe der 26-60jährigen (für die Altersvariablen), die Frauen (Geschlecht) sowie die Pendler (Fahrzweck). In Tabelle 34 sind die Werte für die Dummyvariablen dargestellt, wobei Kategorie 2 die Referenzkategorie ist.

Tabelle 34 Werte der Dummyvariablen für Dummy Coding

	Kategorie_1	Kategorie_2	Kategorie_3
Kategorie = 1	1	(0)	0
Kategorie = 2	0	(1)	0
Kategorie = 3	0	(0)	1

Die andere Methode (das eigentliche Effect Coding) kodiert die Dummyvariablen nach dem Schlüssel, der in Tabelle 35 dargestellt ist. Hier werden im Modell die Parameter für alle Kategorien berechnet und diese mit dem Mittelwert aller Kategorien verglichen. Die Besonderheit ist hier, dass die Summe aller β 's 0 ergibt.

Tabelle 35 Werte der Dummyvariablen für Effect Coding

	Kategorie_1	Kategorie_2	Kategorie_3
Kategorie = 1	1	0	-1
Kategorie = 2	0	1	-1
Kategorie = 3	0	0	1

11.4 Boxplot

Der Boxplot oder Box-Whisker-Plot ist eine Möglichkeit der grafischen Darstellung einer Datenreihe. Er stellt den Median, die zwei Quartile sowie die zwei Extremwerte dar.

Die „Box“ ist ein durch die Werte der Quartile begrenztes Rechteck, welches 50% der Daten beinhaltet. Der Abstand der beiden Quartile ist der sogenannte Interquartilsabstand, welcher als Mass für die Streuung der Daten dient. Des Weiteren ist der Median in die Box eingezeichnet. Dessen Lage in der Box gibt einen Eindruck über die Schiefe der Daten.

Die beiden vertikalen Linien über- und unterhalb der Box, die „Whisker“, besitzen eine Länge von maximal 1,5mal dem Interquartilsabstand. Die genaue Länge ist durch die Lage eines Datenpunktes bestimmt. Werte, welche ausserhalb dieser Grenzen liegen, werden als Ausreisser bezeichnet.

Anhänge

A 1 Detailbeschreibung der Daten

Tabelle 36 Beschreibung der im Datensatz verwendeten Variablen

Variable	Beschreibung	Werte
Wahl	Nr. der gewählten Route	
Wahl1 – Wahl5	Dummyvariablen für Routenwahl	
RZeit	Reisezeit [min]	
Umst	Anzahl Umsteigevorgänge	
UebZ	Übergangszeit total [min]	
		0 = k.A.
Geschlecht	Geschlecht der befragten Person	1 = m 2 = w
m / w	Dummyvariablen für Geschlecht	
		-1 = k.A.
		0 = < 6
		1 = 6 – 14
AGruppe	Altersgruppe	2 = 15 – 18
		3 = 19 – 25
		4 = 26 – 60
		5 = > 60
AGr_0 – AGr_5	Dummyvariablen für Altersgruppe	
		1 = Einzelfahrkarte
		2 = Abonnement
FSchein	Fahrschein	3 = Freifahrer
		4 = Tageskarte
		5 = k.A.
FS_1 – FS_4	Dummyvariablen für Fahrschein	

		0 = 05:00 – 09:00
		1 = 09:00 – 12:00
Zeitraum	Zeitraum der Befragung	2 = 12:00 – 14:00
		3 = 14:00 – 17:00
		4 = 17:00 – 19:00
		5 = 19:00 – 05:00
ZR_0 – ZR_5	Dummyvariablen für Zeitraum der Befragung	
		0 = k.A.
		1 = Arbeit/Beruf
Zweck	Fahrtzweck	2 = Einkauf/Arzt/Erledigung
		3 = Schule/Ausbildung
		4 = Freizeit
ZW_1 – ZW_4	Dummyvariablen für Fahrtzweck	
Dist	Reisedistanz der gewählten Route	
MeanDist	Mittelwert aller Reisedistanzen	
GewDist	Gewichtete Distanz = $\text{Dist} / \text{MeanDist}$	

A 2 Beispiel eines BIOGEME-Modells

Die Spezifikation der funktionalen Ansätze für die Entscheidungsmodelle wird bei der Software BIOGEME über eine Textdatei definiert. Die Syntax einer solchen Modelldatei ist für ein einfaches Beispiel in Tabelle 37 aufgeführt und erklärt.

Tabelle 37 Beispiel für die Syntax einer BIOGEME-Modelldatei

[ModelDescription]

// Hier können Kommentare zur Beschreibung des Modells eingefügt werden.

[Beta]

// Hier werden die Modellparameter mit Name, Startwert, unterem und oberem Grenzwert

// sowie der Angabe, ob der Parameter fest ist (Status = 1) oder geschätzt werden soll

// (Status = 0).

// Name	Value	LowerBound	UpperBound	Status
CONST	0.0	0.0	0.0	1
BZEIT	-1.0	-100.0	10.0	0
BUEBZ	-1.0	-100.0	10.0	0
BUMST	-1.0	-100.0	10.0	0
BIND	1.0	-10.0	10.0	0
EZEIT	1.0	-10.0	10.0	0
EUEBZ	1.0	-10.0	10.0	0
EUMST	1.0	-10.0	10.0	0

[Utilities]

// Hier wird der lineare Teil der Nutzenfunktionen definiert.

// ID	Name	avail	linear expression
// Nr. der Alternative	Dummyvariable für Wahl	Dummyvariable für „Alternative vorhanden“	
1	Wahl1	av1	CONST * one
2	Wahl2	av2	CONST * one
3	Wahl3	av3	CONST * one
4	Wahl4	av4	CONST * one
5	Wahl5	av5	CONST * one

[GeneralizedUtilities]

// // Hier wird der nichtlineare Teil der Nutzenfunktionen definiert.

```
//ID      non-linear expression
1      BZEIT * RZeit1 ^ EZEIT + BUEBZ * UebZ1 ^ EUEBZ
      + BUMST * Umst1 ^ EUMST + BIND * (IND1 ^ LAMBDA - one ) / LAMBDA
2      BZEIT * RZeit2 ^ EZEIT + BUEBZ * UebZ2 ^ EUEBZ
      + BUMST * Umst2 ^ EUMST + BIND * (IND2 ^ LAMBDA - one ) / LAMBDA
3      BZEIT * RZeit3 ^ EZEIT + BUEBZ * UebZ3 ^ EUEBZ
      + BUMST * Umst3 ^ EUMST + BIND * (IND3 ^ LAMBDA - one ) / LAMBDA
4      BZEIT * RZeit4 ^ EZEIT + BUEBZ * UebZ4 ^ EUEBZ
      + BUMST * Umst4 ^ EUMST + BIND * (IND4 ^ LAMBDA - one ) / LAMBDA
5      BZEIT * RZeit5 ^ EZEIT + BUEBZ * UebZ5 ^ EUEBZ
      + BUMST * Umst5 ^ EUMST + BIND * (IND5 ^ LAMBDA - one ) / LAMBDA
```

[Expressions]

// Hier werden alle in den Nutzenfunktionen verwendeten Ausdrücke, welche nicht

// explizit aus dem Datensatz hervorgehen, definiert.

one = 1

[Model]

// Hier wird angegeben, welche Modellform berechnet werden soll

\$MNL // Multinomial Logit
