

# Ein integriertes Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodell – Ansatz einer Synthese von Mikroökonomie und Verkehrsplanung

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

von der Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“

der Technischen Universität Dresden

genehmigte

DISSERTATION

von

Diplomingenieur Christian Winkler

geboren am 07. November 1978

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Dieter Lohse

Prof. Dr.-Ing. Kay W. Axhausen

Tag der Einreichung: 14.04.2011

Tag der Verteidigung: 24.11.2011

## **Danksagung**

Mein ausdrücklicher und herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dieter Lohse für das entgegengebrachte Vertrauen, die Betreuung dieser Arbeit und die damit verbundenen fachlichen und persönlichen Gespräche und Ratschläge. Herrn Prof. Kay Axhausen möchte ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und die wertvollen Anregungen danken.

Ein weiterer Dank gebührt Herrn Prof. Bernhard Wieland für die fruchtbaren Diskussionen und Hinweise „aus Sicht der Ökonomen“. Herrn Prof. Reinhold Maier und Herrn PD Christian Schiller danke ich für die Gewährung der Freiräume, die zur eigenständigen Bearbeitung des Forschungsthemas außerordentlich wichtig waren. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Herrn PD Christian Schiller für die große Unterstützung und Motivation im Besonderen in der Anfangszeit der Bearbeitung.

Außerdem haben noch weitere Personen einen Anteil am Gelingen dieser Arbeit. Für unterschiedlichste Hilfe und Anregungen bin ich dankbar: Stephanie Haubold, Jana Monse, Juliane Pillat, Dr. Heidrun Teichert und Frank Zimmermann.

Ein ganz besonderer und persönlicher Dank gilt meiner Familie. Vor allem meinen Eltern, die mich stets auf meinem Weg unterstützt haben sowie meiner Schwester Susanne für das sorgfältige Korrekturlesen der Arbeit.

Aber der größte Dank gilt meiner Frau Anja, nicht nur für den Verzicht auf gemeinsame Wochenenden und Abende, sondern auch für die grenzenlose Geduld, sich die neu erworbenen Erkenntnisse erläutern zu lassen. С п а с и́ б о з а в с ё !

## **Autorenreferat**

In dieser Arbeit wird ein Modell zur integrierten Verkehrsnachfrage- und Nutzenberechnung für den privaten Personenverkehr entwickelt, mit dem eine harmonisierte Bewertung der entscheidungsrelevanten Aufwände der Verkehrsteilnehmer in der Verkehrsnachfragemodellierung und der Nutzen-Kosten-Analyse ermöglicht wird. Notwendig ist die Modellentwicklung und die damit verbundene Zusammenführung, da die derzeit praktizierte methodische Trennung zum einen nicht theoriekonform mit der Nutzen-Kosten-Analyse ist, zum anderen daraus fehlerhafte Ergebnisse im Rahmen der ökonomischen Gesamtbewertung einer Verkehrsinvestition resultieren können.

Das entwickelte Modell liefert als Ergebnis einerseits die Verkehrsnachfrage für den Ohne- und Mitfall (ohne und mit zu bewertender Verkehrsinvestition), andererseits wird die Änderung der Konsumentenrente der Verkehrsteilnehmer ausgegeben, die unmittelbar in die Nutzen-Kosten-Analyse einfließt. Das zugrundegelegte Verkehrsnachfragemodell ist das EVA-Logit-Modell, das dem EVA-Grundmodell in Form eines Logit-Modells entspricht und damit mikroökonomisch interpretierbar und integrierbar ist. Die Nutzenänderung der Verkehrsteilnehmer wird durch das Integral des EVA-Logit-Modells bestimmt und mit Hilfe der in der Verkehrsnachfrage modellierten Bewertungspräferenzen der Verkehrsteilnehmer gegenüber den Reisekosten monetarisiert. Das Ergebnis stellt die konsistent bestimmte Änderung der Konsumentenrente dar. Die Funktionsfähigkeit und Verwendbarkeit des entwickelten Modells wird anhand einer Beispielanwendung getestet.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Ausgangssituation .....	1
1.2	Zielsetzung .....	2
1.3	Aufbau der Arbeit .....	4
<b>2</b>	<b>Mikroökonomische Grundlagen</b> .....	<b>6</b>
2.1	Der individuelle Entscheidungsprozess .....	6
2.2	Die mikroökonomische Konsumtheorie .....	8
2.3	Das ökonomische Marktmodell .....	11
2.4	Prinzipien der ökonomischen Gesamtbewertung .....	13
2.5	Änderung der Konsumentenrente .....	16
2.5.1	Ursprung .....	16
2.5.2	Vertiefende Betrachtungen .....	18
2.5.3	Aggregation und soziale Wohlfahrtsfunktion .....	22
<b>3</b>	<b>Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung</b> .....	<b>25</b>
3.1	Verkehrsangebotsmodellierung .....	25
3.1.1	Verkehrsnetzmodellierung .....	26
3.1.2	Ermittlung bewertungsrelevanter Aufwände .....	26
3.2	Verkehrsnachfragemodellierung .....	29
3.2.1	Verkehrserzeugung .....	30
3.2.1.1	Quelle-Ziel-Gruppen .....	31
3.2.1.2	Ermittlung der Kennwerte .....	32
3.2.1.3	Randsummenbedingungen .....	33
3.2.2	Ziel- und Verkehrsmittelwahl .....	36
3.2.2.1	EVA-Grundmodell .....	38
3.2.2.1.1	Überblick .....	38
3.2.2.1.2	EVA-Grundmodell auf Basis des BAYESSchen Axioms .....	43
3.2.2.1.3	EVA-Grundmodell auf Basis der Informationsgewinnminimierung .....	46
3.2.2.2	Stochastische diskrete Wahltheorie .....	48

3.2.2.2.1 Hintergrund .....	48
3.2.2.2.2 Allgemeiner Ansatz.....	50
3.2.2.2.3 Logit-Modell .....	53
3.2.2.3 Bewertung von Alternativen .....	56
3.2.2.3.1 Bewertungsfunktionen .....	57
3.2.2.3.2 Verknüpfung von Aufwänden.....	60
3.2.3 Routensuch- und Routenwahlverfahren .....	65
3.2.3.1 Routensuchverfahren .....	66
3.2.3.2 Routenwahlmodelle.....	66
3.3 Gleichgewicht zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage.....	67
3.3.1 Der Verkehrsmarkt.....	67
3.3.2 Nutzergleichgewicht .....	70
3.3.3 Systemoptimum.....	71
3.3.4 Gleichgewichtsebenen.....	72
3.4 Induzierter Verkehr .....	72
<b>4 Bewertungskonzepte .....</b>	<b>76</b>
4.1 Konsum- und Zufallsnutzentheorie .....	77
4.1.1 Indirekte Nutzenfunktion .....	77
4.1.1.1 Bedingte indirekte Nutzenfunktion .....	77
4.1.1.2 Unbedingte indirekte Nutzenfunktion .....	80
4.1.1.3 Eigenschaften indirekter Nutzenfunktionen .....	81
4.1.1.4 Eigenschaften des Erwartungswertes des unbedingten indirekten Nutzens .....	83
4.1.2 Eigenschaften von Zufallsnutzenmodellen.....	84
4.2 Änderung des internen Nutzens und der Konsumentenrente .....	86
4.2.1 Logsum-Differenz.....	87
4.2.1.1 Konzept .....	87
4.2.1.2 Zerlegung der Änderung der Konsumentenrente.....	88
4.2.2 Halbierungsregel .....	89
4.2.2.1 Konzept .....	90
4.2.2.2 Zerlegung der Änderung der Konsumentenrente.....	93
4.2.3 Erweiterte approximative Ansätze.....	94
4.2.3.1 Numerische Integration bei großen Aufwandsänderungen .....	95
4.2.3.2 Dreieck-Methode bei ungleichen Alternativenmengen .....	96
4.2.4 Einkommenseffekte und Nichtlinearitäten .....	99
4.2.5 Aggregation der veränderten Konsumentenrenten .....	101

4.3	Ersparnisansatz .....	102
4.3.1	Konzept .....	102
4.3.2	Induzierter Verkehr beim Ersparnisansatz.....	103
4.4	Einschätzung und Vergleich der Bewertungsansätze.....	105
4.5	Wert der Reisezeiteinsparung .....	107
4.6	Standardisierte Bewertungsverfahren .....	110
4.6.1	Einige ausgewählte Verfahren .....	110
4.6.2	Besonderheiten standardisierter Bewertungsverfahren .....	117
4.6.2.1	Einheitlicher Wert der Reisezeiteinsparungen.....	117
4.6.2.2	Wahrgenommene und nicht wahrgenommene Kosten .....	117
<b>5</b>	<b>Modellentwicklung .....</b>	<b>119</b>
5.1	Anforderungen und Überblick.....	119
5.2	EVA-Logit-Modell.....	121
5.2.1	Randsummenbedingungen.....	122
5.2.1.1	Unelastische Randsummenbedingungen .....	122
5.2.1.2	Elastische Randsummenbedingungen .....	125
5.2.1.3	Vorzeichen und Größe der Pseudo-Potentiale.....	126
5.2.2	Prognoseansatz .....	127
5.2.3	Bewertung von Aufwänden .....	128
5.2.3.1	EVA-Transformationen .....	129
5.2.3.2	Mehrere Reisekosten- und Reisezeitkomponenten.....	130
5.2.3.3	Verkehrsmittelspezifische Bewertung .....	132
5.2.4	Eigenschaften der EVA-Nutzenfunktion .....	133
5.3	Änderung des internen Nutzens .....	138
5.3.1	Korrigierte Logsum-Differenz zur Bestimmung der Änderung des internen Nutzens .....	138
5.3.1.1	Methodische Problematik der Logsum-Differenz.....	138
5.3.1.2	Korrigierte Logsum-Differenz für unelastische Randsummenbedingungen .....	141
5.3.1.3	Korrigierte Logsum-Differenz für elastische Randsummenbedingungen .....	150
5.3.2	Halbierungsregel zur Bestimmung der Änderung des internen Nutzens.....	153
5.3.2.1	Halbierungsregel bei unelastischen Randsummenbedingungen .....	153
5.3.2.2	Halbierungsregel bei elastischen Randsummenbedingungen .....	156

---

5.3.3	Erweiterte approximative Ansätze zur Bestimmung der Änderung des internen Nutzens .....	158
5.3.3.1	Numerische Integration bei großen Aufwandsänderungen .....	158
5.3.3.2	Dreieck-Methode bei ungleichen Alternativenmengen .....	159
5.4	Grenznutzen des Einkommens .....	159
5.5	Änderung der Konsumentenrente .....	162
5.5.1	Ansätze zur Bestimmung der Änderung der Konsumentenrente.....	162
5.5.2	Zerlegung der Änderung der Konsumentenrente .....	164
5.6	Berücksichtigung tageszeitabhängiger Aufwands- und Verkehrsnachfrageänderungen .....	168
5.7	Berücksichtigung projektinduzierter Raumstrukturänderungen.....	171
5.8	Einordnung in die ökonomische Gesamtbewertung .....	174
<b>6</b>	<b>Beispielanwendung .....</b>	<b>177</b>
6.1	Vorbemerkungen .....	177
6.2	Verkehrsmodellierung.....	178
6.3	Bestimmung der Pseudo-Potentiale .....	183
6.4	Bewertung .....	186
6.4.1	Änderung des internen Nutzens .....	186
6.4.2	Grenznutzen des Einkommens .....	189
6.4.3	Änderung der Konsumentenrente .....	190
6.4.4	Ersparnis .....	192
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>195</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>199</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>209</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Individueller Optimierungsvorgang .....	11
Abbildung 2-2: Das ökonomische Marktmodell .....	12
Abbildung 2-3: Konsumentenrente eines Konsumenten .....	17
Abbildung 3-1: CR-Funktion nach LOHSE .....	28
Abbildung 3-2: Quelle-Ziel-Gruppen-Einteilung mit 17 Gruppen .....	32
Abbildung 3-3: Kurzschreibweise einer zweidimensionalen Verkehrsstrommatrix .....	37
Abbildung 3-4: Ableitungsansätze simultaner Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodelle .....	38
Abbildung 3-5: Vergleich der exponentiellen und der EVA-2-Bewertungsfunktion .....	58
Abbildung 3-6: Vergleich der Elastizitäten der exponentiellen und der EVA-2- Bewertungsfunktion .....	59
Abbildung 3-7: Box-Tukey-Transformationen der Aufwände .....	63
Abbildung 3-8: EVA-2-Transformationen der Aufwände .....	63
Abbildung 3-9: EVA-2-Transformationen der Parameter .....	65
Abbildung 3-10: Gleichgewicht von Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage .....	69
Abbildung 3-11: Schematischer Rückkopplungsprozess zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage .....	72
Abbildung 4-1: Halbierungsregel .....	92
Abbildung 4-2: Numerische Integration bei großen Aufwandsänderungen .....	95
Abbildung 4-3: Interner Nutzen bei Einführung einer neuen Alternative .....	97
Abbildung 4-4: Numerische Integration bei Einführung einer neuen Alternative .....	98
Abbildung 4-5: Ersparnisansatz und induzierter Verkehr .....	104
Abbildung 5-1: Grundstruktur des integrierten Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodells .....	121
Abbildung 5-2: EVA-Nutzenfunktionen in Abhängigkeit eines Aufwandes $a$ .....	130
Abbildung 5-3: Verlauf der zweiten Ableitung der EVA-Nutzenfunktion nach der Reisekostenkomponente $\kappa$ .....	136
Abbildung 5-4: Beispiel – Zielwahl mit unelastischen Randsummenbedingungen .....	139
Abbildung 5-5: Nutzenänderung bei konstantem Zielverkehrsaufkommen .....	146
Abbildung 5-6: Nutzenänderung bei Erhöhung des Zielverkehrsaufkommens .....	148
Abbildung 5-7: Subjektiver Wert der Reisezeiteinsparung der Komponente $\zeta$ .....	165
Abbildung 5-8: Schematische Darstellung des Bewertungsmoduls .....	167
Abbildung 5-9: Verkehrsplanerische und ökonomische Komponenten in einer ökonomischen Gesamtbewertung .....	175
Abbildung 6-1: Berechnungsstufen .....	177
Abbildung 6-2: Verkehrsangebotsmodell der Stadt Zwickau .....	180
Abbildung 6-3: Umlegungsergebnis des MIV im Ohnefall .....	181
Abbildung 6-4: Umlegungsergebnis des MIV im Mitfall .....	182
Abbildung 6-5: MIV-Differenznetz .....	183
Abbildung A-1: Einfaches Kennwertmodell für den Personenverkehr .....	211



---

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 4-1:	Vergleich der Bewertungskonzepte .....	105
Tabelle 4-2:	Zeitwerte je Fahrtzweck und Verkehrsmittel für ausgewählte Länder ..	109
Tabelle 4-3:	Gegenüberstellung ausgewählter standardisierter Bewertungsverfahren .....	111
Tabelle 5-1:	Berechnungsansätze der Änderung der Konsumentenrente – exakte Berechnung mittels der Logsum-Differenz .....	162
Tabelle 5-2:	Berechnungsansätze der Änderung der Konsumentenrente – Näherung mittels der Halbierungsregel .....	163
Tabelle 6-1:	Bewertungsrelevante Aufwände im Beispiel .....	179
Tabelle 6-2:	Quelle-Ziel-Gruppen im Beispiel .....	179
Tabelle 6-3:	Notwendige Umrechnungen in VISEVA .....	185
Tabelle 6-4:	Verwendete Berechnungsansätze zur Bestimmung der exakten Änderung des internen Nutzens .....	187
Tabelle 6-5:	Ergebnis – Änderung des internen Nutzens .....	187
Tabelle 6-6:	Ergebnis – Änderung des internen Nutzens je Ortsveränderung .....	188
Tabelle 6-7:	Modellierte Grenznutzen des Einkommens .....	189
Tabelle 6-8:	Ergebnis – Änderung der Konsumentenrente .....	191
Tabelle 6-9:	Ergebnis – Zerlegte Änderung der Konsumentenrente .....	191
Tabelle 6-10:	Ergebnis – Transformierte Aufwandsersparnisse .....	192
Tabelle 6-11:	Ergebnis – Monetarisierete Aufwandsersparnisse .....	193

---

**Anhangverzeichnis**

Anhang A:	Einfaches Kennwertmodell für den Personenverkehr .....	210
Anhang B:	Ableitung des Logit-Modells .....	213
Anhang C:	EVA-Grundmodell als universales Logit-Modell .....	216
Anhang D:	Verkehrsstrombasierte Berechnung der Nutzenänderung mit Pseudo- Potentialen.....	218
Anhang E:	Verkehrsaufkommen und Modal-Split des Ohne- und Mitfalls je Quelle-Ziel-Gruppe und Verkehrsmittel .....	220
Anhang F:	Nutzenänderungsergebnisse auf Basis der korrigierten Logsum-Differenz .....	221

## Abkürzungsverzeichnis

BPR	Bureau of Public Roads
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
CR-Funktion	Capacity Restraint Function (Kapazitätsbeschränkungsfunktion)
DM	Dreieck-Methode
EA	Ersparnisansatz
EVA-Modell	Simultanes Erzeugungs-, Verteilungs- und Aufteilungsmodell
EWS	Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
HR	Halbierungsregel
IIA-Eigenschaft	Independence from Irrelevant Alternatives
MID	Mobilität in Deutschland
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MRS	Grenzrate der Substitution (marginal rate of substitution)
MS Excel	Microsoft Excel
MS	Modal-Split
NI	Numerische Integration
NKA	Nutzen-Kosten-Analyse
ÖPV	Öffentlicher Personenverkehr
Pkw	Personenkraftwagen
QZG	Quelle-Ziel-Gruppe
RSB	Randsummenbedingung
SB	Standardisierte Bewertung von Verkehrsweginvestitionen des Öffentlichen Personennahverkehrs
SrV	System repräsentativer Verkehrsbefragungen
svtts	subjektiver Wert der Reisezeiteinsparung (subjective value of travel time savings)
TAG	Transport Analysis Guidance
TUBA	Transport User Benefit Appraisal, ein für das britische Verkehrsministerium entwickeltes Softwareprogramm zur ökonomischen Bewertung von multimodalen Verkehrsmaßnahmen
WISEVA	Programmsystem der PTV AG, Verkehr in Städten und Regionen, Erzeugung-Verteilung-Aufteilung
VISUM	Programmsystem der PTV AG, Verkehr in Städten und Regionen, Umlegung
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
vtts	Wert der Reisezeiteinsparung (value of travel time savings)

## Notationen

Es werden die für die vorliegende Arbeit wichtigsten Zeichen aufgelistet. Nicht aufgeführt sind Parameter.

$a$	Aufwand
$A_k$	Verkehrsmittelaufkommen eines Verkehrsmittels $k$
$A_n$	Alternativenmenge des Entscheidungsträgers $n$
$\alpha$	soziales Gewicht in Wohlfahrtsfunktion
$BG$	Besetzungsgrad der Fahrzeuge
$B_{ijk}$	Aufwandsbewertung der Quelle-Ziel-Relation $ij$ mit dem Verkehrsmittel $k$
$c$	Quelle-Ziel-Gruppe / verhaltenshomogene Gruppe
$C$	Kapazität einer Strecke
$C_k$	Verkehrsmittelkonstante
$E(\cdot)$	Operator Erwartungswert
$E$	Ersparnis
$\bar{E}(\cdot)$	Operator mittlerer Erwartungswert
$\varepsilon$	stochastische Nutzenkomponente (Störgröße)
$f_A, f_I$	äußere und innere Bewertungsfunktion
$fa_k$	Faktor zur Einhaltung der Randsummenbedingung des Verkehrsmittelaufkommens
$fqi, fz_j$	Faktoren zur Einhaltung der quell- und zelseitigen Randsummenbedingungen
$\Phi$	indirekter Nutzen / bedingter indirekter Nutzen (bedingte Optimierung)
$\Phi^*$	unbedingter indirekter Nutzen / maximaler Nutzen einer Entscheidungssituation
$\Phi^{**}$	unbedingter indirekter Pseudo-Nutzen / maximaler Pseudo-Nutzen einer Entscheidungssituation
$\bar{\Phi}$	deterministischer Anteil des bedingten indirekten Nutzens
$g$	Generalisierte Kosten
$ga$	Generalisierter Aufwand
$GA$	Generalisierter Gesamtaufwand
$GN$	Grenznutzen
$h$	Transformationsfunktion
$I$	Informationsgewinn
$KR$	Konsumentenrente
$\kappa$	Reisekostenkomponenten
$\lambda$	LAGRANGE-Multiplikator, Grenznutzen des Einkommens
$mE$	monetäre Einsparung
$M$	Mitfall
$M_s$	Verkehrsstärke auf der Strecke $s$

---

$n$	Individuum/repräsentativer Verkehrsteilnehmer/Entscheidungsträger
$O$	Ohnefall
$OV$	Ortsveränderung
$P$	Wahrscheinlichkeitsmaß
$p^*$	Gleichgewichtspreis
$p_i$	Preis eines Gutes $i$
$q_i, z_j$	Lagefaktoren
$Q_i$	Quellverkehrsaufkommen des Verkehrsbezirks $i$
$Q_i^P$	Quellverkehrspotential des Verkehrsbezirks $i$
$\tilde{Q}_i, \tilde{Z}_j, \tilde{A}_k$	Quell-, Ziel- und Verkehrsmittelaufkommen ohne Einhaltung entsprechender vorgegebener Verkehrsaufkommen
$\theta_i, \tau_j, \psi_k$	Pseudo-Potentiale für Quelle $i$ , Ziel $j$ und Verkehrsmittel $k$
$rk$	Reisekosten
$RK$	Gesamtreisekosten
$rz$	Reisezeit
$RZ$	Gesamtreisezeit
$s$	Strecke
$SG$	Sättigungsgrad
$t_0$	Fahrzeit bei $M=0$
$TM$	Fahr- bzw. Wartezeit in Abhängigkeit der Verkehrsstärke $M$
$u$	direkter Nutzen (ermittelt über direkte Nutzenfunktion)
$u_b$	alternativenspezifischer Nutzen der Alternative $b$ (Kontext diskrete Wahlmodelle)
$\bar{u}$	deterministische Nutzenkomponente (Kontext diskrete Wahlmodelle)
$V$	Gesamtverkehrsaufkommen
$v_{ijk}$	Verkehrsstrom von Verkehrsbezirk $i$ nach Verkehrsbezirk $j$ mit Verkehrsmittel $k$
$v_{ijkr}$	Verkehrsstrom $v_{ijk}$ mit einer bestimmten Route $r$
$v_{ijkrt}$	Verkehrsstrom $v_{ijkr}$ zu einem bestimmten Zeitpunkt $t$
$W$	gesellschaftliches Wohlfahrtsmaß
$X$	unabhängige erklärende Variable einer Nutzenfunktion
$x_i$	konsumierte Menge des Gutes $i$
$x_i(p_i)$	MARSHALLSche Nachfragefunktion für das Gut $i$
$\xi_i, \sigma_j, \pi_k$	LAGRANGE-Faktoren (zur Ableitung des EVA-Grundmodells)
$y$	Geldeinkommen (Budget)
$Z_j$	Zielverkehrsaufkommen des Verkehrsbezirks $j$
$Z_j^P$	Zielverkehrspotential des Verkehrsbezirks $j$
$\zeta$	Reisezeitkomponenten

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Investitionsmaßnahmen im Verkehrswesen sind oftmals mit einem erheblichen finanziellen Aufwand verbunden, der durch das Gemeinwesen eines Staates erbracht werden muss. Da die knapper werdenden finanziellen Ressourcen begrenzt sind und öffentliche Projekte um diese Mittel konkurrieren, werden z. B. in Deutschland auf Bundesebene für solche Maßnahmen gemäß dem Haushaltsgrundsätzegesetz (HGrG) § 6 Abs. 2 (vgl. BMJ [18]) sowie der Bundeshaushaltsordnung (BHO) § 7 Abs. 2 (vgl. BMJ [17]) Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen gefordert. Im Verkehrssektor erfolgen Wirtschaftlichkeitsanalysen im Rahmen von Maßnahmenuntersuchungen, die das Kernstück der verkehrsplanerischen Bearbeitung darstellen (vgl. FGSV [52] S. 14). Die Untersuchung von Investitionsmaßnahmen umfasst dabei, neben der Entwicklung von Handlungskonzepten, die für die konkrete Wirtschaftlichkeitsuntersuchung unmittelbar relevanten Schritte der Abschätzung (Quantifizierung) und der Bewertung der Projektwirkungen. Die Wirkungsabschätzung beinhaltet im Wesentlichen die Ermittlung der Änderung der

- Verkehrsnachfrage,
- Aufwände der Verkehrsteilnehmer (z. B. Reisezeiten, Reisekosten),
- Einnahmen des Staates bzw. des Betreibers,
- externen Kosten (z. B. Unfallkosten, Lärmkosten).

Die Quantifizierung der meisten Projektwirkungen basiert unmittelbar auf der Änderung der Verkehrsnachfrage, die mittels Verkehrsnachfragemodellen bestimmt wird. Im Anschluss der Wirkungsabschätzung erfolgen die Bewertung der Projektwirkungen und deren Aggregation zu einer Gesamtgröße. Die ökonomische Gesamtbewertung wird mit Hilfe eines Bewertungsverfahrens durchgeführt, wobei die Nutzen-Kosten-Analyse das bedeutendste wirtschaftlichkeitsanalytische Verfahren darstellt. Die Nutzen-Kosten-Analyse ist ein Werkzeug der Wohlfahrtsökonomie, die ein Teilgebiet der Mikroökonomie ist. Sie stellt den a priori monetär vorliegenden Investitionskosten zu monetarisierende Nutzenänderungen gegenüber und weist die Vorteilhaftigkeit einer Maßnahme aus, wenn der Nutzen die Kosten übersteigt.

Eine große Herausforderung stellt die Ermittlung der Nutzenänderungen der Verkehrsteilnehmer einer Verkehrsmaßnahme dar, auf die durch die veränderte Verkehrsnachfrage

und die veränderten Aufwände geschlossen werden kann. Hierfür geht die Nutzen-Kosten-Analyse davon aus, dass über den individuellen Nutzen jeder Einzelne selbst am besten urteilen kann. Aus diesem Grund bedient sich die Nutzen-Kosten-Analyse der mikroökonomischen Konsumtheorie zur Ermittlung der individuellen Nutzenänderungen und unterliegt somit klaren theoretischen Regeln und Anforderungen bzgl. des Verhaltens und Bewertens der einzelnen Individuen. Von zentraler Bedeutung dabei ist, dass die Ermittlung der Nachfrage und des Nutzens eine modelltheoretische Einheit darstellt. Auf den Verkehr übertragen ergibt sich somit die Notwendigkeit einer integrierten Verkehrsnachfragemodellierung und Nutzenberechnung der Verkehrsteilnehmer. Die in der Verkehrsplanungspraxis üblicherweise angewandten Verfahren verstoßen jedoch gegen diese Anforderung, da die Quantifizierung und die Bewertung der Projektwirkungen meist zwei völlig voneinander entkoppelte Berechnungsschritte darstellen.

Während die Modellierung der Verkehrsnachfrage in den letzten Jahrzehnten einer stetigen Weiterentwicklung und Verfeinerung unterworfen wurde, besitzt die Betrachtung und Entwicklung einer theoriekonsistenten, integrierten Verkehrsnachfrage- und Nutzenermittlung der Verkehrsteilnehmer in der verkehrsplanerischen Fachliteratur kaum Präsenz. Ausnahmen, die sich mit dieser Problematik auseinandersetzen und dabei sowohl ökonomische als auch verkehrsplanerische Aspekte betrachten, sind z. B. BATES [8], HELMS [66], DE JONG ET AL. [79] oder WILLIAMS [155].

Neben dem erwähnten theoretischen Konflikt, der sich aus der entkoppelten Verkehrsnachfrage- und Nutzenberechnung ergibt, gehen dadurch auch zahlreiche für die Bewertung wichtige Zusammenhänge und Ergebnisse des Verkehrsnachfragemodells verloren. Werden z. B. nicht alle relevanten Nachfragedimensionen in der Nutzenberechnung beachtet, so ergeben sich von der realen Nutzenänderung abweichende Ergebnisse, wie ZÖLLIG und AXHAUSEN jüngst in [162] untersuchten. Dies führt zur Fehlallokation der Ressourcen und verhindert die maximal mögliche Wohlfahrtssteigerung.

## 1.2 Zielsetzung

Aus den vorangegangenen Ausführungen wird einerseits der Dissens zwischen den mikroökonomischen Anforderungen und der praktischen Umsetzung der Nutzenberechnung der Verkehrsteilnehmer in der Verkehrsplanung deutlich. Andererseits ergeben sich dadurch fehlerhafte Ergebnisse, die negative praktische Folgen in Form von falschen Projektprioritäten haben können. Es ist daher das zentrale Ziel dieser Arbeit diesen Konflikt im Detail zu beleuchten und mittels eines integrierten Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodells zu beheben. Dabei wird ausschließlich privater Personenverkehr betrachtet, da sich sowohl dessen Verkehrsnachfragemodellierung als auch die ökonomische Bewertung der Projektwirkungen für die Verkehrsteilnehmer wesentlich von anderen Verkehrsarten, z. B. dem Wirtschaftsverkehr, unterscheiden und eigenständige Forschungsfelder darstellen.

Ebenfalls werden keine externen Kosten in dem zu entwickelnden Modell betrachtet, da sie keinen Bestandteil von Verkehrsnachfragemodellen darstellen. Der ökonomische Bewertungsteil des Modells beinhaltet somit ausschließlich die Bestimmung der monetären Projektwirkungen auf die Verkehrsteilnehmer des privaten Personenverkehrs.

Die Interdisziplinarität der gestellten Aufgabe erfordert sowohl eine ausführliche Betrachtung mikroökonomischer Zusammenhänge als auch verkehrsplanerischer Anforderungen an die Verkehrsnachfragemodelle. Zentrale Fragen, die in dieser Dissertation im Detail zu beantworten sind, lauten:

- (1) Was sind mikroökonomische Annahmen und Anforderungen an eine konsistente Nachfrage- und Nutzenberechnung?
- (2) Welche verkehrsplanerischen Anforderungen gibt es an die Verkehrsnachfragemodellierung und welche Modelle sind geeignet?
- (3) Existieren Ansätze für die integrierte Verkehrsnachfrage- und Nutzenberechnung und können diese als Grundlage dienen?
- (4) Ist ein integriertes Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodell ableitbar?
- (5) Genügt das in der Arbeit entwickelte integrierte Modell den mikroökonomischen und verkehrsplanerischen Anforderungen?

**Ad (1):**

Die mikroökonomische Konsumtheorie beschreibt einen Modellansatz zur Ableitung von Nachfragemengen eines Individuums. Grundannahme dabei ist das Postulat der individuellen Nutzenmaximierung unter Beachtung des Einkommensbudgets, der Güterpreise und der individuellen Präferenzen bzgl. der Güter. Mit den sich ergebenden Nachfragemengen erreicht das Individuum das unter den gegebenen Umständen maximal mögliche Nutzenniveau. Das monetäre Äquivalent dieses maximalen Nutzens stellt die Konsumentenrente dar, der bei der integrierten Verkehrsnachfrage- und Nutzenberechnung eine zentrale Rolle zukommt. Die Beleuchtung der mikroökonomischen Zusammenhänge und Anforderungen soll den Rahmen der Theoriekonformität für verkehrsnachfragespezifische Annahmen aufzeigen.

**Ad (2):**

Zentrales Anliegen der Verkehrsnachfragemodellierung ist die realistische Abbildung des Verkehrsgeschehens und dessen Prognose. Dabei sollten die Modelle multimodal sein und alle verkehrsrelevanten Entscheidungen abbilden. Ein solches Modell stellt das von LOHSE entwickelte EVA-Modell dar, das im Zentrum der Betrachtungen der Verkehrsnachfragemodellierung steht. Das EVA-Modell zeichnet sich im Besonderen durch die Einhaltung unterschiedlicher Randsummenbedingungen und die Modellierung nichtlinearer Bewertungspräferenzen der Verkehrsteilnehmer aus. Weiterhin ist auch das Logit-Modell von großer Bedeutung, da es zum einen den theoretischen Ursprung in der Mikroökonomie hat



und aus der Zufallsnutzenmaximierung abgeleitet ist, zum anderen eine leichte Berechnung der Verkehrsnachfrage ermöglicht.

**Ad (3):**

Es ist zu recherchieren, ob und welche Ansätze zur integrierten Verkehrsnachfrage- und Nutzenberechnung existieren und ob diese den mikroökonomischen Anforderungen genügen. Von Bedeutung dabei ist im Besonderen die Integrierbarkeit des Verkehrsnachfragemodells.

**Ad (4):**

Ziel dieses Schrittes ist die Entwicklung des EVA-Logit-Modells, das die gewünschten Eigenschaften des EVA-Modells (Randsummenbedingungen, Nichtlinearitäten) mit denen des Logit-Modells (mikroökonomische Kompatibilität) verbindet, wodurch sowohl die verkehrsplanerischen als auch die mikroökonomischen Anforderungen erfüllt werden. Durch die Integration des Modells soll die Änderung der Konsumentenrente als monetäres Nutzenmaß bestimmbar sein. Das Ziel ist somit die Verzahnung der Verkehrsnachfragemodellierung und der Nutzenberechnung unter dem Blickwinkel beider Wissenschaftsgebiete.

**Ad (5):**

Es ist zu klären, ob das EVA-Logit-Modell den notwendigen Anforderungen genügt und konsistent ist. Hierfür muss es zum einen die gleichen Verkehrsnachfrageergebnisse liefern wie das EVA-Modell, zum anderen sind die mikroökonomischen Restriktionen mittels geeigneter Prüfmethode nachzuweisen.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Die nach der Einleitung folgenden Kapitel 2 bis 5 orientieren sich im Wesentlichen an den oben aufgeworfenen Fragen, wobei in Kapitel 2 die Vorstellung für die Arbeit relevanter mikroökonomischer Grundlagen erfolgt. Das daran anschließende Kapitel beschreibt die Grundlagen der Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung. Im Zentrum der Betrachtungen stehen das EVA-Modell und die stochastische diskrete Wahltheorie, deren bedeutendster Vertreter das Logit-Modell darstellt. Ein weiterer wichtiger Punkt in dem Kapitel ist die Gleichgewichtsmodellierung zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage mit Bezügen zum ökonomischen Marktmodell. Außerdem wird ein besonderes Augenmerk auf den induzierten Verkehr gelegt, da dieser im Rahmen der Nutzenquantifizierung eine große Bedeutung besitzt.

In Kapitel 4 werden bestehende Bewertungskonzepte zur Ermittlung der Nutzenänderungen der Verkehrsteilnehmer vorgestellt. Das Kapitel umfasst dabei zunächst die

---

Betrachtung theoretischer Zusammenhänge hinsichtlich der mikroökonomischen Kompatibilität von Zufallsnutzenmodellen. Anschließend werden darauf aufbauend konkrete theoriekonsistente Ansätze zur Bestimmung der Nutzenänderungen aufgezeigt und diskutiert und abschließend die Nutzenermittlung der Verkehrsteilnehmer in standardisierten Bewertungsverfahren vorgestellt.

Im fünften Kapitel erfolgt die Ableitung des EVA-Logit-Modells und dessen Prüfung auf verkehrsplanerische und mikroökonomische Anforderungen. Darüber hinaus wird ein Bewertungsmodul entwickelt, welches die Bestimmung der Änderung der Konsumentenrente durch die Integration des EVA-Logit-Modells umfasst. In Kapitel 6 wird das entwickelte integrierte Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodell anhand eines praktischen Beispiels getestet. Mit der Zusammenfassung und dem Ausblick schließt die Arbeit ab.

## 2 Mikroökonomische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit notwendigen mikroökonomischen Grundlagen vorgestellt. Hierbei stehen die Aspekte individueller Entscheidungsprozess, mikroökonomische Nachfragetheorie und Bewertung im Mittelpunkt.

### 2.1 Der individuelle Entscheidungsprozess

Jeder bewusst durchgeführten Handlung liegt ein Entscheidungsprozess zugrunde. Zur modelltheoretischen Abbildung solcher Handlungen sind Annahmen über die Determinanten dieses Prozesses notwendig. Der individuelle Entscheidungsprozess ist universal und stellt nicht nur die Grundlage zur Strukturierung, Klassifizierung und Modellierung von ökonomischen Entscheidungen dar, sondern auch aller anderen Modelle, die das menschliche Verhalten abbilden.

Ein Individuum durchläuft bei einer Auswahlentscheidung unterschiedliche Phasen, wodurch der Entscheidungsprozess als Abfolge nachstehender sequentieller Schritte betrachtet werden kann (vgl. BEN-AKIVA/LERMAN [14] S. 31 f.):

- Definition des Entscheidungsproblems,
- Generierung von Alternativen,
- Bewertung der Attribute der Alternativen,
- Auswahl einer Alternative und
- Umsetzung.

Kernpunkt ist die Bewertung der Alternativen, da sie die Grundlage für die Auswahlentscheidung darstellt (vgl. EGGERT [45] S. 30). Eine spezifische Entscheidungstheorie<sup>1</sup>, die den obigen Ablauf des individuellen Entscheidungsprozesses unterstellt, weist folgende Elemente auf (vgl. BEN-AKIVA/LERMAN [14] S. 32):

- Entscheidungsträger,
- Auswahlalternativen,

---

<sup>1</sup> Nicht jede reale Auswahlentscheidung weist ein solches exaktes Schema auf. Zum Beispiel kann ein Individuum auch nach Intuition oder Gewohnheit entscheiden. Stehen diese Entscheidungssituationen im Mittelpunkt, sind andere Entscheidungsmodelle zu verwenden.

- messbare Attribute der Alternativen und
- eine Entscheidungsregel.

Der **Entscheidungsträger** kann ein Individuum oder auch eine Gruppe von Personen (z. B. Haushalt, Organisation) sein.

Jeder Auswahlentscheidung liegt per definitionem eine nichtleere Menge von **Alternativen** zugrunde. Die Menge der Alternativen, mit denen der Entscheidungsträger konfrontiert wird, sind jene Alternativen, die für ihn realisierbar sind. Diese Realisierbarkeit hängt von verschiedenen Nebenbedingungen ab, z. B. von der physischen Verfügbarkeit und dem Einkommen. In der klassischen Konsumtheorie (siehe Kapitel 2.2) werden unter Alternativen i. Allg. Güterbündel verstanden, die sich der Konsument leisten kann.

Hinsichtlich der **Attribute der Alternativen** ist zu unterscheiden, ob sich die zu vergleichenden Güterbündel aus jeweils homogenen oder heterogenen Gütern zusammensetzen. Homogene Güter sind völlig gleichartig. Sie werden im Güterbündel lediglich durch ihre Quantität unterschieden. Heterogene Güter differieren in mehr Eigenschaften als der Menge und müssen dahingehend durch einen Vektor ihrer Attribute im Güterbündel repräsentiert werden. Dies trifft auch für die Güter der Verkehrsnachfrage zu.

Für ein Entscheidungsproblem mit zwei oder mehr Alternativen wird eine **Entscheidungsregel** benötigt. Die Regel muss den „internen Mechanismus“ beschreiben können, der vom Entscheidungsträger angewandt wird, um eine eindeutige Lösung zu finden. Hierbei heben sich insbesondere vier Kategorien heraus (vgl. BEN-AKIVA/LERMAN [14] S. 35 ff.):<sup>2</sup>

- Dominanz,
- Zielerfüllung,
- Lexikographische Regeln und
- Nutzenmaximierung.

Die in der Konsumtheorie bedeutendste und in dieser Arbeit relevante Regel ist die Nutzenmaximierung. Das Nutzenprinzip setzt voraus, dass die Attributwerte einer Alternative so zu einem Skalenwert zusammengefasst werden können, dass ein funktionaler Zusammenhang zwischen Skalenwert und Attributen vorliegt. Der Skalenwert repräsentiert dabei die Attraktivität der Alternative und wird als **Nutzen** bezeichnet, den der Entscheidungsträger versucht durch seine Alternativenauswahl zu maximieren. Die Nutzenfunktion zur Bestimmung des Nutzens ermöglicht den Vergleich der Attribute und deren gegenseitige Kompensation.

---

<sup>2</sup> In der Literatur gibt es zahlreiche unterschiedliche Ansätze für Entscheidungsregeln (siehe hierzu z. B. SLOVIC ET AL. [130] und SVENSON [137]).

## 2.2 Die mikroökonomische Konsumtheorie

Diese Theorie zeigt eine Möglichkeit der konkreten Formulierung des Entscheidungsprozesses auf und gestattet dadurch die Ableitung mikroökonomischer Entscheidungs- und Nachfragemodelle. Als Entscheidungsträger wird ein Haushalt oder der Konsument betrachtet. Ferner gilt die Annahme, dass der Konsument Bündel von mehreren homogenen und beliebig teilbaren Gütern konsumiert. Hierin ist jedes Gut mit einer bestimmten Menge vertreten. Wesentlich komplexer sind die Bestimmungen hinsichtlich der Auswahlalternativen und der Entscheidungsregel. Zwar formuliert VARIAN ([148] S. 19):<sup>3</sup> „Die ökonomische Theorie des Konsumenten ist sehr einfach: Ökonomen nehmen an, dass die Konsumenten das beste Güterbündel wählen, das sie sich leisten können“, die konkrete Gestaltung ist jedoch keineswegs trivial. Zu klären sind im Besonderen, was unter „das Beste“ und „leisten können“ zu verstehen ist.

Bedeutende Elemente der mikroökonomischen Konsumtheorie sind:

- Güterbündel,
- Präferenzen,
- Nutzen und
- Budgetrestriktion.

Das Güterbündel kann formal beschrieben werden durch (vgl. HANUSCH [62] S. 16):

$$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_I). \quad (2.1)$$

Hierbei bezeichnet  $x_i$  ( $i = 1, \dots, I$ ) die konsumierte Menge des Gutes  $i$  und der Vektor  $\mathbf{x}$  steht für das gesamte Güterbündel. Da die betrachteten Güter als homogen angesehen werden, erfolgt keine explizite Attributierung.

Jedem Konsumenten steht nur ein bestimmtes Geldeinkommen (Budget)  $y$  zur Verfügung, welches er maximal für den Konsum der Güter verwenden kann. Die Güter weisen zudem Preise auf, die mit  $p_i$  ( $i = 1, \dots, I$ ) bezeichnet werden. Die entsprechende Einkommensrestriktion bzw. Budgetbeschränkung lautet:

$$y \geq \sum_i p_i \cdot x_i. \quad (2.2)$$

Hieraus folgt, dass der Betrag, der für das gesamte Güterbündel ausgegeben werden kann, nicht größer sein darf als der dafür zur Verfügung stehende Geldbetrag. Durch diese Einschränkung werden alle Güterbündel (Alternativen) eingegrenzt, die sich der Konsument „leisten kann“.

---

<sup>3</sup> Die ökonomische Theorie des Konsumenten bzw. die mikroökonomische Konsumtheorie wird ebenfalls als mikroökonomische Haushaltstheorie bezeichnet.

Die Beantwortung der Frage nach „dem besten“ Güterbündel bedarf einer Entscheidungsregel, die hier auf dem Nutzenkonzept basiert. Der Nutzen wird dabei „[...] lediglich als eine Möglichkeit, die Präferenzen zu beschreiben, angesehen“ (VARIAN [148] S. 52). Es stehen folglich die Präferenzen im Zentrum der Bewertung der Alternativen. In diesem Zusammenhang wird häufig vom „rationalen Verhalten“ der Konsumenten gesprochen. Dieses Verhalten wird hierbei allerdings nicht als Verhalten angesehen, das von einem Beobachter als vernünftig, klug oder weise betrachtet werden muss (vgl. DEMMLER [34] S. 11). Es ist hierunter vielmehr ein Konzept zu verstehen, das den Entscheidungsprozess selbst zu beschreiben versucht, wobei die Ausprägung der Präferenzen der Konsumenten gewissen Regeln folgen muss. Hierdurch wird eine modelltheoretische Beschreibung einer Entscheidung, die eine eindeutige Lösung gestattet, ermöglicht. Der Ansatz ist zunächst unabhängig von einer konkreten Formulierung der Präferenzen. Diese müssen jedoch die Axiome der Vollständigkeit, Reflexivität und Transitivität erfüllen (vgl. BEN-AKIVA/LERMAN [14] S. 38).

Von besonderer Bedeutung ist die Transitivität, da Präferenzen diese Eigenschaft nicht zwingend haben müssen. Sie ist somit eine Hypothese über das Entscheidungsverhalten, die erst die Formulierung der Entscheidungsregel ermöglicht. Die Transitivität sagt aus, wenn ein Güterbündel A einem Güterbündel B vorgezogen wird und B einem Güterbündel C vorgezogen wird, so wird A dem C vorgezogen.

Das Konzept des „rationalen Verhaltens“ wird modelltheoretisch durch den Prozess der „Nutzenmaximierung“ unter Einhaltung der Budgetrestriktion realisiert, wodurch eine „rationale Wahl“ eines Güterbündels erfolgt (individuelles Programm der optimalen Ressourcenallokation). Hierfür ist die Aufstellung einer Nutzenfunktion<sup>4</sup> notwendig, durch die die Präferenzordnung der Konsumenten formal dargestellt werden kann und ein betrachtetes Güterbündel auf einen skalaren „Nutzenwert“ abgebildet wird. Allgemein kann eine solche Funktion geschrieben werden als (vgl. HANUSCH [62] S. 16):

$$u = u(\mathbf{x}) = u(x_1, \dots, x_I), \quad (2.3)$$

wobei  $u$  der Nutzen ist, der dem Konsumenten aus dem Konsum des Güterbündels  $\mathbf{x}$  entsteht. Auf Basis des so formulierten Nutzens lassen sich unterschiedliche Güterbündel miteinander vergleichen. Die Nutzenfunktion hat die Aufgabe, jedem möglichen Güterbündel eine Zahl so zuzuweisen, dass bevorzugte Bündel eine höhere Zahl aufweisen als weniger erwünschte (vgl. VARIAN [148] S. 52). Das individuelle Programm der optimalen Ressourcenallokation entspricht formal einem Maximierungsproblem in Form des folgenden Lagrange-Ansatzes (vgl. VARIAN [147] S. 100):

---

<sup>4</sup> Treffender als der Begriff „Nutzenfunktion“ ist „Präferenzfunktion“, da die Funktion dem Vergleich von Güterbündeln auf Grundlage der Präferenzen der Konsumenten dient. In dieser Arbeit wird jedoch der in der Literatur dominierenden Bezeichnung „Nutzenfunktion“ gefolgt.

$$L = u(x_1, \dots, x_I) - \lambda \cdot \left[ \left( \sum_i p_i \cdot x_i \right) - y \right]. \quad (2.4)$$

Durch Differenzieren der Lagrange-Funktion nach  $x_i$  ergeben sich die Bedingungen erster Ordnung:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(\mathbf{x})}{\partial x_i} - \lambda \cdot p_i &= 0 \quad \text{oder} \\ \lambda &= \frac{\partial u(\mathbf{x})}{\partial x_i} \cdot \frac{1}{p_i} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Der Lagrange-Multiplikator  $\lambda$  kann als Grenznutzen des Einkommens interpretiert werden, d. h.  $\lambda$  liefert eine Aussage, um wie viel der Nutzen des Konsumenten ansteigt, wenn er eine Einheit zusätzliches Einkommen erhält. Er ist im Optimum eine Funktion der konsumierten Gütermengen und folglich von den Preisen (mit Vektor  $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_I)$ ) aller Güter und dem individuellen Einkommen abhängig, d. h.

$$\lambda = \lambda(\mathbf{p}, y). \quad (2.6)$$

Aus den Optimalitätsbedingungen (2.5) und der Budgetbedingung (2.2) lassen sich die optimalen Gütermengen  $x^*$  bestimmen. Hierfür sind alle Güterpreise und das zur Verfügung stehende Budget vorzugeben. Außerdem ergibt sich durch die Optimierung folgende notwendige Bedingung (vgl. VARIAN [148] S. 87 f.):

$$\frac{\frac{\partial u(\mathbf{x})}{\partial x_i}}{\frac{\partial u(\mathbf{x})}{\partial x_j}} = \frac{p_i}{p_j} \quad \text{für } i, j = 1, \dots, I. \quad (2.7)$$

Gleichung (2.7) besagt, dass die Grenzrate der Substitution<sup>5</sup> (MRS) zwischen den Gütern (mit  $\frac{\partial u(\mathbf{x})}{\partial x_i}$  als Grenznutzen der letzten konsumierten Einheit von  $x_i$ ) bei Auswahl des optimalen Güterbündels (linke Seite der Gleichung) gleich ihrem Preisverhältnis ist. Zur Verdeutlichung soll Abbildung 2-1 dienen. Hierin ist der individuelle Optimierungsvorgang für einen Zwei-Güter-Fall dargestellt. Die Kurven in der Abbildung stellen die sogenannten Indifferenzkurven dar, die eine grafische Darstellung der MRS sind. Je höher die Kurve (im Sinne von Entfernung zum Koordinatenursprung) desto höher der Nutzen. Ihre Lage gibt folglich die Nutzenniveaus an. Die dargestellte Gerade entspricht der

---

<sup>5</sup> Unter der Grenzrate der Substitution (marginal rate of substitution; MRS) wird verstanden, wie viel ein Konsument bereit ist von Gut  $j$  aufzugeben, um eine zusätzliche Einheit von Gut  $i$  konsumieren zu können und gerade dasselbe Nutzenniveau zu erreichen. Für weitere Erläuterungen siehe VARIAN [148] S. 47 ff.

Budgetgerade, deren Anstieg genau dem Preisverhältnis entspricht. Das optimale Güterbündel ist jene Kombination, durch die die höchste Indifferenzkurve unter Einhaltung des Budgets erreicht wird. Hieraus ergibt sich, dass das optimale Bündel jenes ist, bei dem die Budgetgerade die Indifferenzkurve tangiert. Genau in diesem Punkt entsprechen sich MRS und das Preisverhältnis (Anstieg der Budgetgeraden) (vgl. VARIAN [147] S. 101).

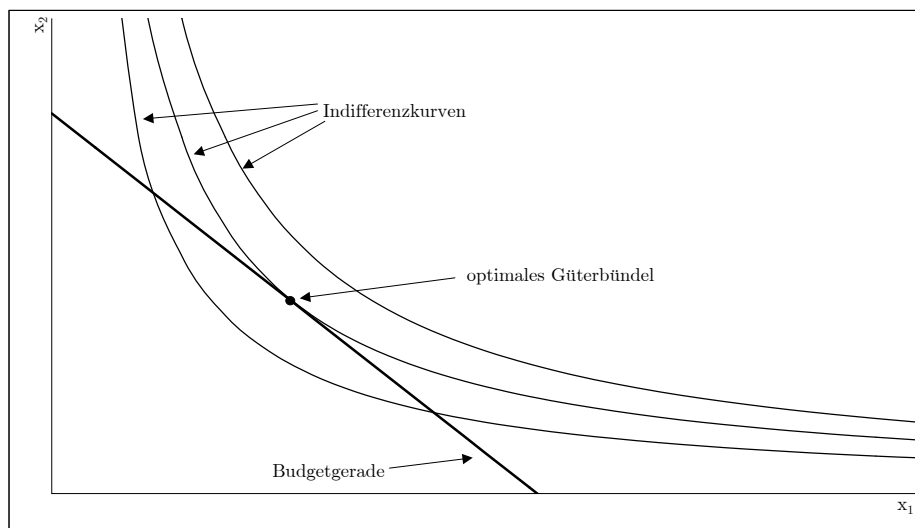


Abbildung 2-1: Individueller Optimierungsvorgang

Die optimalen Gütermengen hängen von allen Güterpreisen  $p_i$  und dem individuellen Geldbudget  $y$  ab:

$$\begin{aligned} x_i &= x_i(p_1, \dots, p_I, y) \\ &= x_i(\mathbf{p}, y) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Wird allein der Preis für Gut  $i$  variiert und alle anderen Preise und das Geldbudget werden konstant gehalten (ceteris-paribus-Nachfragefunktion), resultieren daraus die normalen bzw. MARSHALLSchen Nachfragefunktionen (vgl. HANUSCH [62] S. 26):

$$x_i = x_i(p_i). \quad (2.9)$$

## 2.3 Das ökonomische Marktmodell

In den bisherigen Ausführungen wurde der Entscheidungs- und Nachfrageprozess von Konsumenten beleuchtet, wie er der mikroökonomischen Konsumtheorie zugrunde liegt. Eine wesentliche Bedeutung besitzen dabei die Preise der Güter. Preise sind i. d. R. jedoch keine fixen Größen, sondern Ergebnis des Marktmechanismus, bei dem Angebot und Nachfrage (aller Konsumenten) sich gegenseitig regulieren. Das ökonomische Marktmodell beschreibt die Zusammenhänge und Funktionsmechanismen des freien Marktes.



Der freie Markt ist dadurch charakterisiert, dass sich hier private Anbieter und Nachfrager treffen und Güter gegen Geld tauschen. Die Nachfrager erwerben so viel von einem Gut, wie sie maximal dafür zu zahlen bereit sind, und die Anbieter produzieren jene Menge an Gütern, für die sie ein Gewinnmaximum erzielen. Unter der Annahme der vollkommenen Konkurrenz entsteht hierdurch ein Marktgleichgewicht bei einem bestimmten (Gleichgewichts-)Preis  $p^*$  und einer dazugehörigen Gütermenge  $x^*$ . Bei diesen Zusammenhängen geht die ökonomische Theorie i. d. R. davon aus, dass die Nachfragekurve sinkt und die Angebotskurve steigt.<sup>6</sup> Beide Kurven geben jeweils in Abhängigkeit des Preises an, welche Menge des Gutes nachgefragt bzw. angeboten würde. Der Gleichgewichtspreis, der letztlich realisiert wird, ist durch den Schnittpunkt der Kurven definiert (vgl. VARIAN [148] S. 294 ff.). In Abbildung 2-2 ist der Zusammenhang grafisch dargestellt.

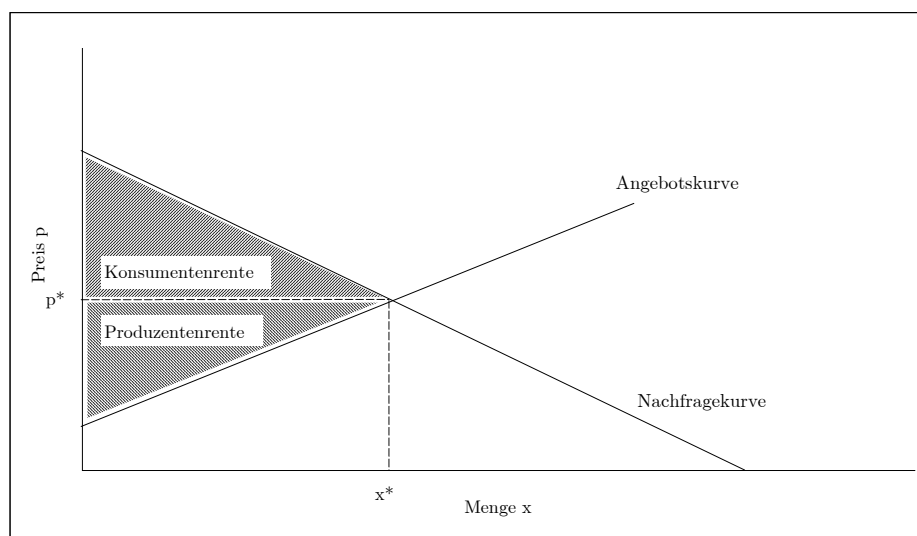


Abbildung 2-2: Das ökonomische Marktmodell<sup>7</sup>

Bei einer fallenden Nachfragekurve wird vorausgesetzt, dass die Konsumenten mehr von einem Gut konsumieren würden, wenn der Preis unterhalb des Gleichgewichtspreises wäre und weniger, wenn er darüber läge. Für die Angebotsseite und die Produzenten lassen sich diese Zusammenhänge übertragen. Eine steigende Angebotskurve besagt, dass der Produzent mit steigendem Preis bereit ist, mehr zu produzieren.

Die fallende Nachfragekurve besagt weiterhin, dass für den größten Teil der konsumierten Güter der gezahlte Gleichgewichtspreis  $p^*$  geringer ist als der maximale Preis, den die Konsumenten hierfür zu zahlen bereit wären. Es ergibt sich somit für diese Güter (links

<sup>6</sup> Hierbei handelt es sich um ein sogenanntes normales Gut. Ein gegenteiliger Zusammenhang ergibt sich bei GIFFEN-Gütern. Weitere Informationen hierzu siehe z. B. VARIAN [148].

<sup>7</sup> Wie in der ökonomischen Literatur üblich, werden auch hier vereinfachend lineare Nachfrage- und Angebotskurven dargestellt. In der Realität und im Verkehr treten i. d. R. nichtlineare Zusammenhänge auf.

vom Schnittpunkt) eine positive Differenz zwischen maximaler Zahlungsbereitschaft<sup>8</sup> und zu zahlendem Preis  $p^*$ . Diese Differenz wird „Konsumentenrente“ genannt und in Kapitel 2.5 vorgestellt. Auch hier gilt wieder eine äquivalente Aussage für die Angebotsseite – die Produzentenrente. Unter der Annahme nutzenmaximierenden Verhaltens der Konsumenten und gewinnmaximierenden Verhaltens der Produzenten ergibt sich das Marktgleichgewicht, wenn die Summe aus Konsumentenrente und Produzentenrente maximal ist. Bei jedem anderen Preis, der nicht dem Gleichgewichtspreis entspricht, gibt es einen Anreiz für einige Akteure, ihr Verhalten zu verändern (vgl. VARIAN [148] S. 295).

Das in Abbildung 2-2 dargestellte Marktmodell beinhaltet die Marktnachfragekurve, die eine Aggregation aller individuellen Nachfragekurven darstellt. Die Beschreibung und Analyse des Nachfrageverhaltens erfolgt jedoch in der Mikroökonomie auf Basis einzelner Konsumenten, eine Aggregation erfolgt nur zur Beschreibung des Marktgeschehens.

Die voranstehenden kurzen theoretischen Erläuterungen zum ökonomischen Marktmodell stellen nur einen sehr kleinen Einblick in die Thematik dar. Für weitergehende Informationen wird auf die gängige mikroökonomische Literatur verwiesen (siehe hierzu z. B. VARIAN [147] und [148] oder FEHL/OBERENDER [48]). Die für diese Arbeit notwendigen weiteren Marktbetrachtungen erfolgen an den entsprechenden Stellen.

## 2.4 Prinzipien der ökonomischen Gesamtbewertung

Die bisherigen Überlegungen in diesem Kapitel umfassten reine ökonomische Nachfrage- und Marktbetrachtungen. Anhand von Abbildung 2-2 wird jedoch deutlich, dass es einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen Nachfrage und Nutzenermittlung in Form der Konsumentenrente gibt. Bevor dahingehende analytische Betrachtungen angestellt werden, erfolgt zunächst die Vorstellung der grundsätzlichen Prinzipien der ökonomischen Gesamtbewertung, um die konkreten Ansätze zur Ermittlung der Nutzenmaße in den Gesamtkontext einordnen zu können. Hierdurch wird jedoch kein vollständiger Überblick über die Nutzen-Kosten-Analyse (NKA) gegeben. Detaillierte Darstellungen hierzu finden sich z. B. in HANUSCH [62] oder MÜHLENKAMP [109].

Der Nutzen, der den Verkehrsteilnehmern infolge der Realisierung eines Verkehrsprojektes zugutekommt, findet als wesentlicher Bestandteil Eingang in die NKA. Deren Annahmen und Prinzipien muss auch die Bestimmung der Nutzen der Verkehrsteilnehmer genügen. Es ist aus diesem Grund notwendig, die wesentlichen Prinzipien der ökonomischen Gesamtbewertung mittels NKA, auch wenn diese nicht unmittelbar Gegenstand der Dissertation sind, hier kurz darzulegen.

---

<sup>8</sup> Die Zahlungsbereitschaftskurve entspricht der inversen Nachfragekurve, deren Verlauf der Nachfragekurve entspricht. Es erfolgt lediglich das formale Vertauschen des Funktionsarguments und des Funktionswertes.

Die NKA stellt ein Bewertungsverfahren für den öffentlichen Sektor dar und ist das wahrscheinlich bekannteste wirtschaftlichkeitsanalytische Verfahren in diesem Bereich (vgl. HANUSCH [62] S. 1). Sie ist ein Verfahren der Projektselektion mit dem Ziel der Ermittlung der sozialen Nettonutzen alternativer Investitionsprojekte (ABAY [1] S. 1). Gerade auf dem Gebiet öffentlicher Projekte, wozu Verkehrsinvestitionen gehören, hat die NKA ihr Haupteinsatzgebiet, da hier i. d. R. sehr große Kosten und zum Teil irreversible Folgen entstehen.

Das Hauptziel einer Investitionsmaßnahme ist oft die Verbilligung von Gütern (z. B. eine Fahrt im Pkw). Es kann jedoch infolge der Realisierung auch zu nicht bezweckten Preiserhöhungen kommen. Von beidem können Individuen und/oder private Unternehmen, die Mitglieder der Gesellschaft darstellen, betroffen sein. Die Investitionsmaßnahme führt bei einer Preisreduzierung unmittelbar zu einer Nutzenerhöhung für die Individuen und mittelbar, durch eine investitionsinduzierte Kostenersparnis im Herstellungsprozess der Unternehmen, zu einer Anhebung der individuellen Konsummöglichkeiten. In der ökonomischen Beurteilung mittels NKA soll jede projektinduzierte Änderung der Konsummöglichkeiten (unmittelbar als auch mittelbar) berücksichtigt werden. Als Endzweck des wirtschaftlichen Handelns wird jedoch nicht der Konsum sondern das Befriedigen individueller Bedürfnisse betrachtet. Der Beitrag, den der Konsum eines Güterbündels impliziert, wird i. Allg. in der Ökonomie – und so auch in der NKA – nach dem Nutzen bemessen. Das Bewertungsmaß der NKA stellen folglich individuelle Nutzenniveaus dar (vgl. HANUSCH [62] S. 2).

Der monetären Bewertung der Projektwirkungen liegen darüber hinaus folgende zwei grundsätzliche Postulate zugrunde (vgl. ABAY [1] S. 3):

- Die Summe der individuellen Wertschätzungen (Nutzen), die jedes Individuum der Gesellschaft dem Projekt beimisst, entspricht dem sozialen Wert des Projektes.
- Der Wert, den ein einzelnes Individuum einem Projekt beimisst, ist mit seiner Zahlungsbereitschaft für das Projekt identisch.

Es folgt aus diesen Forderungen, dass die NKA „[...] konsequent vom *individualistischen Paradigma* [...]“ (HANUSCH [62] S. 2) ausgeht, da jedes Individuum am besten über das eigene Wohlfahrtsniveau urteilen kann. Die NKA verlangt, dass die gesamtwirtschaftliche Bewertung allein auf der Grundlage der Präferenzen der Individuen zu erfolgen habe.

Die Durchführung eines Projektes, wie z. B. der Bau einer Straße, ist jedoch nicht nur mit Nutzenänderungen der Individuen verbunden, sondern verlangt den Einsatz von (knappen) Ressourcen, die auch alternativ an anderer Stelle eingesetzt werden könnten. Somit führt die Realisierung eines Projektes auch zu unmittelbaren negativen Folgen für die Volkswirtschaft, da die einzusetzenden Mittel an anderer Stelle fehlen und dort Produktionseinschränkungen erfordern, woraus wiederum ein Konsumverzicht resultiert. Diese

Kosten werden als Opportunitätskosten bezeichnet und im Rahmen der NKA dem sozialen Wert eines Projektes, in Form der aggregierten Nutzen der Individuen, gegenübergestellt. Gefordert wird, dass solche Projekte realisiert werden, deren Differenz von aggregierten Nutzen und Opportunitätskosten positiv ist (Nettonutzen des Projekts) (vgl. HANUSCH [62] S. 2 f.).<sup>9</sup>

Schwierig bei der Durchführung der NKA ist die Ermittlung der Zahlungsbereitschaften der Individuen für ein Projekt und damit die Bestimmung seines sozialen Wertes. Zum einen wäre der Aufwand der Befragung aller betroffenen Individuen oftmals praktisch nicht möglich, zum anderen besteht die Gefahr der Verschleierung der wirklichen Zahlungsbereitschaften, gerade wenn sie positiv sind (vgl. ABAY [1] S. 3).<sup>10</sup> Da die Möglichkeit der direkten Erhebung der Zahlungsbereitschaften nicht erfolversprechend ist, werden die individuellen Zahlungsbereitschaften der an einem Markt beobachtbaren Projektwirkungen bestimmt. Aus deren Preis- und Mengenänderungen kann auf die aggregierten Zahlungsbereitschaften geschlossen werden.<sup>11</sup>

Die Bestimmung der Zahlungsbereitschaften aus den Marktpreis- und Mengenänderungen beobachtbarer Projektwirkungen ist wiederum nur möglich, wenn ein Marktpreis existiert und dieser dem sozialen Wert entspricht. Dies ist jedoch oftmals – und gerade im Verkehrssektor – problematisch, da für zahlreiche Projektwirkungen kein Markt existiert. Liegen keine Marktpreise vor, so müssen entsprechende Opportunitätskosten (Schattenpreise) bestimmt werden, die dem Nutzen einer alternativen Verwendung entsprechen (vgl. BAUM ET AL. [11] S. 47). Im Rahmen der vorliegenden Dissertation spielt vor allem der Schattenpreis für die Reisezeit – zumindest für den nichtgewerblichen Verkehr – eine wichtige Rolle. Die Bedeutung der Reisezeit(-einsparungen) bei Investitionen im Verkehrswesen ist außerordentlich hoch.

Schattenpreise sind ebenfalls zur Bewertung externer Effekte (nichtkompensierte Vor- oder Nachteile Dritter) zu bestimmen. Die Berücksichtigung externer Effekte ist ein wesentlicher Aspekt der NKA, der allerdings nicht Gegenstand dieser Arbeit ist.<sup>12</sup> Dies nicht aus dem Grund, dass sie vernachlässigbar wären, sondern dass sich deren Bewertung einer Harmonisierung mit der Bewertung innerhalb der Verkehrsnachfrage, der nur die

---

<sup>9</sup> Es können noch verschiedene andere Kennwerte gebildet werden. Vor allem ist noch das Nutzen-Kosten-Verhältnis von Bedeutung.

<sup>10</sup> Es handelt sich hierbei um das sogenannte „free rider“- oder Trittbrettfahrerphänomen.

<sup>11</sup> Grundlage der NKA bildet das Verhalten der Nachfrager und Anbieter auf einzelnen Märkten, weshalb in diesem Rahmen die Aussagen der Markttheorie (vgl. Kapitel 2.3) gelten.

<sup>12</sup> Die Diskussion und mögliche Bewertung externer Effekte des Verkehrs wurde und wird vielfach anderweitig erforscht. Siehe hierzu z. B. INFRAS [74] oder BECKER ET AL. [13].

durch die Verkehrsteilnehmer wahrgenommenen und aufzubringenden Aufwände zugrunde liegen, entziehen.<sup>13</sup>

Die NKA basiert auf dem Mit-und-Ohnefall-Prinzip. Zur Bewertung eines Projektes dürfen nur jene Wirkungen berücksichtigt werden, die tatsächlich durch das Bewertungsobjekt hervorgerufen werden. Auswirkungen, die auch ohne die Realisierung auftreten, dürfen nicht in die Bewertung einbezogen werden. Zur Einhaltung dieser Bedingung werden zwei Fälle für den Bereich der Investitionen im Verkehrssektor definiert:

### 1. Ohnefall

Der Ohnefall stellt den Planungsfall ohne das Investitionsvorhaben dar. Er basiert auf dem gegebenen und vollständig modellierten Ist-Zustand und ist aus diesem abzuleiten. Dieser Fall berücksichtigt ebenfalls alle vorhersehbaren Änderungen des Verkehrsangebotes und der Verkehrsnachfrage bis zum Planungshorizont, die ohne die Realisierung des Investitionsvorhabens auftreten würden. Der Ohnefall dient als Vergleichsfall für den Mitfall.

### 2. Mitfall

Damit ist der eigentliche Planungsfall, der das Investitionsvorhaben enthält, zu verstehen. Dieser Fall wird aus dem Ohnefall einschließlich des Investitionsvorhabens abgeleitet, d. h. inklusive aller sich daraus ergebenden Konsequenzen bezüglich des Verkehrsangebotes und der Verkehrsnachfrage. Existieren mehrere Planungsalternativen (Mitfälle), so sind alle mit demselben Ohnefall zu vergleichen (vgl. LOHSE [88] S. 403).

## 2.5 Änderung der Konsumentenrente

### 2.5.1 Ursprung

Die Konsumentenrente als monetäres Nutzenmaß geht auf DUPUIT zurück, der in einer 1844 veröffentlichten Arbeit Kritik an der zur damaligen Zeit vorherrschenden kostenorientierten Vorstellung über den Nutzen eines Gutes äußerte und ein alternatives Maß definierte (vgl. DUPUIT [43]).<sup>14</sup> DUPUIT ging in seinen Überlegungen von einer fallenden Gesamtnachfragekurve für das öffentliche Gut (Überfahrt über eine Brücke) aus. Der Kern der Argumentation liegt darin, dass keinesfalls der Wert des Gutes allein daran gemessen werden kann, welcher marktmäßige Erlös (Kosten für eine Überfahrt

---

<sup>13</sup> Eine mögliche Internalisierung externer Effekte stellt ein verkehrspolitisches Diskussionsfeld dar und wird hier nicht betrachtet.

<sup>14</sup> Bemerkenswert ist, dass DUPUIT Ingenieur mit ökonomischem Interesse war und das Konzept der Konsumentenrente erstmalig für die Ermittlung einer optimalen Maut für eine Brücke einsetzte. Es handelt sich somit um ein (Verkehrs-)Ingenieurskonzept, welches erst später von Ökonomen übernommen und weiterentwickelt wurde.

multipliziert mit der Anzahl der Überfahrten) erzielt wird. Dieser Betrag stellt nur jenen Wert dar, den die zum Zuge kommenden Nachfrager **mindestens** bereit sind zu zahlen, um das Gut zu erhalten. Unter der Annahme einer fallenden Nachfragekurve ist es jedoch offensichtlich, dass ein Teil der Nachfrager einen – zum Teil erheblichen – höheren Betrag zu zahlen bereit wären. Der Ansatz ist auf die individuelle Ebene übertragbar (die Gesamtnachfragekurve des Marktes ergibt sich durch die horizontale Addition der individuellen Nachfragekurven) und soll nachfolgend anhand eines Beispiels aus der Dissertation von ABAY (vgl. [1] S. 8 f.) erläutert werden.

In Abbildung 2-3 ist eine individuelle Nachfragekurve für ein beliebiges Gut  $x$  dargestellt, wobei der Preis des Gutes  $p_0$  ( $= 60$  Euro) ist und der Konsument  $x_0$  ( $= 8$ ) Einheiten in einer bestimmten Zeiteinheit konsumiert. Die Kurve zeigt, dass der Konsument bei einem Preis von 130 Euro gerade eine Einheit des Gutes kaufen würde. Seine (maximale) Zahlungsbereitschaft für die erste Einheit beträgt folglich genau 130 Euro. Er muss jedoch nur  $p_0$  ( $= 60$  Euro) zahlen, weshalb sein Nettonutzen für diese erste Einheit 70 Euro ( $130 - 60$ ) beträgt. Analog ergeben sich die Nettonutzen für alle weiteren Einheiten. Für die achte Einheit entspricht die Grenzbewertung (Zahlungsbereitschaft) genau dem Preis  $p_0$  und der hierfür resultierende Nettonutzen ist Null. Der Konsument stellt mit dieser Einheit seinen Konsum ein. Der gesamte Nettonutzen ergibt sich als Summe der schraffierten Flächen. Wird unterstellt, dass das Gut in unendlich kleinen Einheiten käuflich erwerbbar ist, so ergibt die Fläche  $p_0AB$  die **Konsumentenrente** des Konsumenten, d. h. den gesamten individuellen Nettonutzen. Diese Fläche entspricht wiederum der Differenz der gesamten Zahlungsbereitschaft bzw. des Bruttonutzens (Fläche  $0ABx_0$ ) und der Gesamtausgaben (Fläche  $0p_0Bx_0$ ).

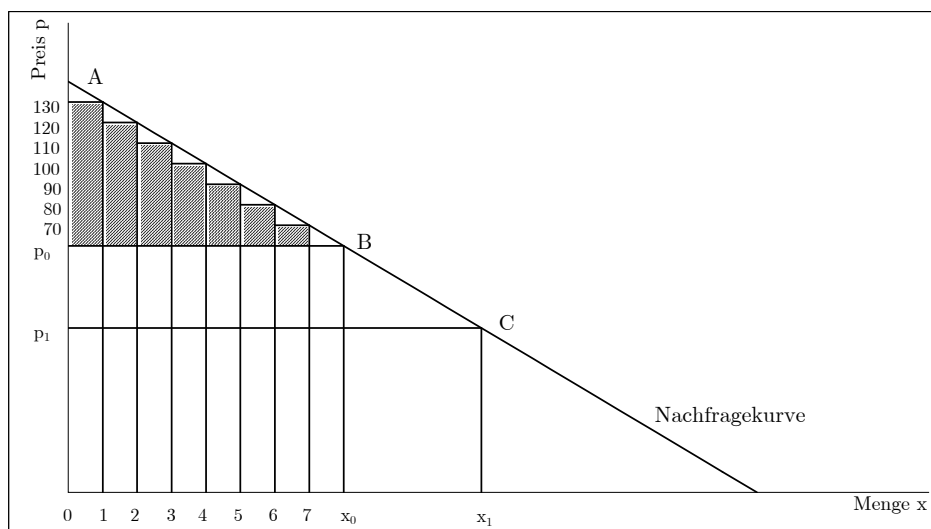


Abbildung 2-3: Konsumentenrente eines Konsumenten (Quelle: ABAY [1] S. 8)

In vielen Anwendungsfällen ist die Konsumentenrente nicht von unmittelbarem Interesse, sondern vielmehr deren **Änderung**. Diese beschreibt den Nettonutzengewinn, wenn

das betrachtete nachgefragte Gut bereits vorher konsumiert wurde. Die Änderung der Konsumentenrente dient im Allgemeinen zur Bewertung von Investitionsmaßnahmen, die eine Zustandsänderung (vom Ohne- zum Mitfall) hervorrufen. Es sei hierfür angenommen, dass der Preis des Gutes  $x$  in Abbildung 2-3 infolge einer Investition von  $p_0$  auf  $p_1$  fällt und es zu einer Nachfrageausdehnung auf  $x_1$  kommt. Der Nutzenzuwachs ergibt sich folglich als Fläche  $p_1 p_0 BC$ .

## 2.5.2 Vertiefende Betrachtungen

Die vorangegangenen Erläuterungen beschränkten sich zur Einführung auf das Grundprinzip der Konsumentenrente bzw. deren Änderung. Die folgenden Ausführungen geben einen Einblick in die Einbettung und Begründung dieses Ansatzes in die mikroökonomische Konsumtheorie und orientieren sich im Wesentlichen an der derzeit aktuellen ökonomischen Grundlagenliteratur zu diesem Thema (z. B. VARIAN [147] und [148], MÜHLENKAMP [109], HANUSCH [62] und AHLHEIM/ROSE [3]).

In Kapitel 2.2 wurden die Grundlagen der Konsumtheorie und deren Nachfragebestimmung vorgestellt, an die an dieser Stelle angeknüpft werden soll. Unter Verwendung der allgemeinen Formulierung der Nachfragefunktionen aus Gleichung (2.8):

$$\begin{aligned} x_i &= x_i(p_1, \dots, p_I, y) \\ &= x_i(\mathbf{p}, y) \end{aligned}$$

können die optimalen Gütermengen in die Nutzenfunktion (2.3):

$$u = u(\mathbf{x}) = u(x_1, \dots, x_I)$$

eingesetzt werden, woraus die indirekte Nutzenfunktion  $\Phi$  resultiert. Es gilt:

$$\Phi(\mathbf{p}, y) = u[x_1(\mathbf{p}, y), \dots, x_I(\mathbf{p}, y)]. \quad (2.10)$$

Die indirekte Nutzenfunktion gibt das unter den gegebenen Präferenzen, Preisvektor  $\mathbf{p}$  und Budgetrestriktion  $y$  maximale Nutzenniveau an, welches das Individuum erzielen kann.

Die indirekte Nutzenfunktion spielt bei der Nutzenermittlung in Form der Änderung der Konsumentenrente eine entscheidende Rolle. Kommt es infolge einer Projektrealisierung zu einer Preisreduzierung, ändert sich auch das gewählte Güterbündel und das damit einhergehende Nutzenniveau. Für die Änderung des Nutzenniveaus gilt:

$$d\Phi = \sum_i \frac{\partial \Phi(\mathbf{p}, y)}{\partial p_i} dp_i + \frac{\partial \Phi(\mathbf{p}, y)}{\partial y} dy. \quad (2.11)$$

Die partiellen Ableitungen lauten (zur Ableitung siehe z. B. VARIAN [147] S. 107 ff.):

$$\frac{\partial \Phi(\mathbf{p}, y)}{\partial p_i} = -\lambda \cdot x_i(\mathbf{p}, y) \quad (2.12)$$

und

$$\frac{\partial \Phi(\mathbf{p}, y)}{\partial y} = \lambda. \quad (2.13)$$

Durch Einsetzen in Gleichung (2.11) ergibt sich:

$$d\Phi = -\lambda \cdot \sum_i x_i(\mathbf{p}, y) dp_i + \lambda dy. \quad (2.14)$$

Eine Nutzenänderung kann durch eine Preis- und/oder Einkommensänderung erfolgen. Eine Einkommensänderung ist im Rahmen der Bewertung von Investitionsmaßnahmen im Verkehrswesen i. d. R. nicht relevant, d. h. das Einkommen ist konstant ( $dy = 0$ ) und kann im Folgenden vernachlässigt werden. Es gilt:

$$d\Phi = -\lambda \cdot \sum_i x_i(\mathbf{p}, y) dp_i \quad (2.15)$$

und es ergibt sich die Nutzenänderung vom Ohnefall  $O$  zum Mitfall  $M$  durch:

$$\Delta\Phi = \Phi(\mathbf{p}^M, y) - \Phi(\mathbf{p}^O, y) = \int_{PF} d\Phi = - \int_{PF} \lambda(\mathbf{p}, y) \cdot \sum_i x_i(\mathbf{p}, y) dp_i. \quad (2.16)$$

Das Konzept stößt an dieser Stelle auf zwei grundlegende – in der Mikroökonomie bekannte und viel diskutierte – Probleme, die der eindeutigen Nutzenberechnung entgegenstehen. Zum einen beschreibt das obige Integral ein Linienintegral, dessen Wert vom Integrationsweg  $PF$  abhängt – das sogenannte Pfadabhängigkeitsproblem. Zum anderen hängt der Grenznutzen des Einkommens (bzw. des Geldes)  $\lambda$  neben dem Einkommen selbst auch von den Preisen  $p$  ab.

Zunächst sei die Problematik des Grenznutzens des Einkommens erläutert. Eine Preisänderung führt zu zwei Effekten – den **Substitutionseffekt** und den **Einkommenseffekt**. Der Substitutionseffekt beschreibt, dass Preisänderungen zu einer relativen Vorteilhaftigkeit (bei Verbilligung) eines Gutes  $x$  gegenüber den anderen Gütern führen und sich eine Nachfrageänderung zugunsten des Gutes  $x$  (bei substitutiven Gütern) einstellt. Maßgebend ist die relative Änderung der Preise. Demgegenüber steht der Einkommenseffekt, der besagt, dass Preisänderungen die Kaufkraft beeinflussen. Erfolgt eine Preissenkung für ein Gut  $x$ , so steigt bei gleichem Einkommen die Kaufkraft und es können mehr Güter(mengen) erworben werden. Preiserhöhungen reduzieren die Kaufkraft.



Der Einkommenseffekt führt zu einer bedeutenden Einschränkung des Konsumentenrentenkonzepts. Die Konsumentenrente bzw. deren Änderung ergibt sich als Fläche unterhalb der MARSHALLSchen Nachfragekurve unter der *ceteris paribus* Bedingung, d. h. weder die Preise anderer Güter noch das Einkommen ändern sich. Hierbei kann unmittelbar aus dem beobachteten Geldeinsatz für das konsumierte Gut auf den (unbeobachteten) Nutzen geschlossen werden (vgl. MISHAN [107] S. 9). Der Einkommenseffekt führt jedoch zu einer Ausdehnung der Nachfrage, die nicht nur durch die Preisreduzierung für die bisher nicht konsumierten Gütermengen induziert ist, sondern zusätzlich durch die Einsparung der bereits vorher konsumierten Gütermengen hervorgerufen wird. Das Konzept der Konsumentenrente basiert jedoch auf Zahlungsbereitschaften je Gütermenge, die bei unverändertem Einkommen realisiert werden. Hieraus folgt, dass das durch die Einsparungen (bei den bereits vorher konsumierten und nun verbilligten Gütermengen) freigewordene Einkommen so gering sein muss, dass es keinen Einfluss auf die neukonsumierte Gütermenge hat. Zur Eindeutigkeit der Konsumentenrente als Fläche unter der MARSHALLSchen Nachfragekurve ist ein Einkommenseffekt von Null erforderlich. Die Unabhängigkeit des Grenznutzens des Einkommens von den Preisen  $p_i$  stellt hierfür eine notwendige Bedingung dar. Es muss gelten:

$$\frac{\partial \lambda(\mathbf{p}, y)}{\partial p_i} = 0, \quad (2.17)$$

woraus

$$\lambda(\mathbf{p}, y) = \lambda(y) \quad (2.18)$$

folgt. Bezogen auf Gleichung (2.16) dient  $\lambda$  gewissermaßen als Umrechnungsfaktor zwischen der Nutzenänderung und der Änderung der (monetären) Konsumentenrente. Auch hierbei wird deutlich, dass zur eindeutigen Lösung des Integrals  $\lambda$  konstant sein muss, da nur dann  $\lambda$  aus dem Integral herausgezogen werden kann. MISHAN zeigt jedoch, dass die Konstanz des Grenznutzens des Einkommens zwar eine notwendige, jedoch keine hinreichende Bedingung zum Ausschluss von Einkommenseffekten darstellt (vgl. MISHAN [107] S. 21). Es kann aber gezeigt werden (vgl. z. B. HANUSCH [62] S. 32), dass wenn:

$$\frac{\partial x_i}{\partial y} \cdot \frac{y}{x_i} = 1 \quad (2.19)$$

gilt, d. h. die Einkommenselastizitäten aller Güter den Wert Eins besitzen, kein Einkommenseffekt auftritt.<sup>15</sup> Die Nachfrage nach den einzelnen Gütern verläuft somit proportional zum Einkommen.

---

<sup>15</sup> Erfüllt wird dies nur durch Nachfragefunktionen, denen eine homothetische Nutzenfunktion zugrunde liegt. Für nähere Erläuterungen siehe z. B. DEMMLER [34] S. 53 ff.

Für Nachfragefunktionen, die diese Restriktionen einhalten, folgt daraus (zur Herleitung siehe z. B. MISHAN [107] S. 18 ff.):

$$\frac{\partial x_i}{\partial p_j} = \frac{\partial x_j}{\partial p_i}. \quad (2.20)$$

Diese Bedingung wird als „symmetrische Kreuzpreisableitungen“ bezeichnet und impliziert eine Symmetrie des Substitutionseffektes. Nachfragefunktionen, die diese Bedingung erfüllen, weisen stets einen konstanten Grenznutzen des Einkommens auf.

Treten keine Einkommenseffekte auf, liefert die Änderung der Konsumentenrente bei einer Änderung des Preises des betrachteten Gutes  $x_i$  stets die korrekte monetäre Nutzenänderung. Das gilt auch, wenn beispielsweise infolge einer Preisreduzierung von  $x_i$  ein substitutives Gut  $x_j$  (mit konstantem Preis) eine Reduktion der Nachfrage erfährt. Zwar resultiert hieraus eine Verringerung der Konsumentenrente bei  $x_j$ , da die Nachfragekurve nach links verschoben wird, allerdings darf diese Verringerung nicht mit der Konsumentenrente bei  $x_i$  verrechnet werden. Der Grund hierfür ist der konstante Preis für  $x_j$ , wodurch der Konsument bzgl. dieses Gutes nicht schlechter gestellt wird. Werden Gütermengen  $x_j$  durch  $x_i$  substituiert, so erfolgt das zum Vorteil des Konsumenten, der wiederum durch den Flächenzuwachs unter der Nachfragekurve von  $x_i$  richtig angegeben wird (vgl. z. B. VAN SUNTUM [136] S. 58 f. oder ABAY [1] S. 17).

Treten infolge der Projektrealisierung auch Preisänderungen bei einem oder mehreren anderen Gütern auf, so stimmt das Konsumentenrentenkonzept nicht mehr. Aus diesem Grund entwickelte HOTELLING das Konzept weiter, wobei er den Fall der simultanen Preisänderung mehrerer Alternativen infolge einer Projektrealisierung im Verkehrsbereich betrachtete (vgl. HOTELLING [72]). HOTELLING formulierte das in Gleichung (2.16) definierte Linienintegral, für das mit konstantem Grenznutzen des Einkommens gilt:

$$\Delta\Phi = \Phi(\mathbf{p}^M, y) - \Phi(\mathbf{p}^O, y) = \int_{PF} d\Phi = -\lambda(y) \cdot \int_{PF} \sum_i x_i(\mathbf{p}) dp_i \quad (2.21)$$

und die Lösung des Integrals vom Integrationsweg abhängt. Die Berechnung der Konsumentenrente bzw. deren Änderung infolge einer Projektrealisierung, die zu multiplen Preisänderungen führt, sind nur exakt, wenn Pfadunabhängigkeit gilt. HOTELLING zeigte, dass die Pfadunabhängigkeit dann gewährleistet ist, wenn die Nachfragefunktionen symmetrische Kreuzpreisableitungen besitzen. Dies ist garantiert, wenn Gleichung (2.20) gilt.

Es kann geschlussfolgert werden, dass ohne Einkommenseffekte die Änderung der Konsumentenrente ein exaktes Nutzenmaß darstellt und die Bedingung für symmetrische Kreuzpreisableitungen hierfür hinreichend ist. Die eindeutige und allgemeine Lösung lautet dann:

$$\Delta KR = \frac{\Delta \Phi}{\lambda} = - \sum_i \int_{p_i^O}^{p_i^M} x_i(\mathbf{p}) dp_i. \quad (2.22)$$

Die Änderung der Konsumentenrente  $\Delta KR$  entspricht hierbei dem monetären Äquivalent von  $\Delta \Phi$ .

Das Konzept der (Änderung der) Konsumentenrente ist exakt, wenn infolge einer Projektrealisierung keine Einkommenseffekte auftreten. Für den gegenteiligen Fall sind aus theoretischer Sicht die von HICKS [70] entwickelten alternativen Maße „Kompensationsvariation“ (CV) und „Äquivalenzvariation“ (EV) vorzuziehen, die auch bei Einkommenseffekten exakte Nutzenmaße liefern. Die Vorteile der Variationsmaße gegenüber der Konsumentenrente stehen dem Nachteil gegenüber, dass sie als Fläche unterhalb sogenannter kompensierter Nachfragekurven definiert sind. Problematisch dabei ist, dass diese (um den Einkommenseffekt kompensierte) Nachfragekurven nicht direkt beobachtbar sind. Vergleichende Untersuchungen von WILLIG ergaben jedoch, dass die Unterschiede bei geringen Einkommenseffekten zwischen der Änderung der Konsumentenrente, der Äquivalenz- und Kompensationsvariation sehr klein sind (vgl. WILLIG [157] S. 589).<sup>16</sup> HANUSCH kommt zu dem Schluss, dass die Wahl des Nutzenmaßes „[...] letztlich dem Analytiker überlassen [...]“ ist, da die Nachfragebestimmung, auf der jede NKA basiert, mit erheblich größeren Fehlern behaftet ist ([62] S. 54).

### 2.5.3 Aggregation und soziale Wohlfahrtsfunktion

Das vorgestellte Konzept der Änderung der Konsumentenrente umfasst die monetäre Nutzenänderung eines Individuums. Um jedoch zu einer gesamtwirtschaftlichen Bewertung zu gelangen, ist die Aggregation aller projektinduzierten individuellen veränderten Konsumentenrenten notwendig. Zu diesem Zweck ist eine **soziale Wohlfahrtsfunktion**  $W$  aufzustellen (vgl. z. B. HANUSCH [62] S. 32):

$$W = W(\Phi_1, \dots, \Phi_N). \quad (2.23)$$

$n=1\dots N$       Laufindex Individuum

Die Wohlfahrt der Gesellschaft basiert hierbei auf den Nutzenniveaus der Individuen, die wiederum von den Preisen  $p_i$  und dem individuellen Einkommen  $y$  abhängig sind. Die Wohlfahrtsänderung der Gesellschaft wird durch das vollständige Differential der Wohlfahrtsfunktion  $W$  bestimmt:

$$dW = \sum_n \frac{\partial W}{\partial \Phi_n} \cdot d\Phi_n = \sum_n \alpha_n \cdot d\Phi_n. \quad (2.24)$$

---

<sup>16</sup> Treten keine Einkommenseffekte auf, so gilt  $\Delta KR = CV = EV$ .

Die individuellen Nutzenänderungen  $d\Phi_n$  lassen sich durch Gleichung (2.15) beschreiben.<sup>17</sup> Werden die veränderten Nutzenniveaus in (2.24) eingesetzt, so ergibt sich:

$$dW = \sum_n \alpha_n \cdot \lambda_n \cdot \left( - \sum_i x_{in}(\mathbf{p}, y_n) dp_i \right). \quad (2.25)$$

Der Faktor  $\lambda_n$  repräsentiert den individuellen Grenznutzen des Einkommens, der eine subjektive Größe darstellt. Demgegenüber steht  $\alpha_n$  für das soziale „Gewicht“, mit dem der Nutzen des Individuums  $n$  in die Gesamtwohlfahrt einfließt. Der Term hängt einerseits von der funktionalen Form der Wohlfahrtsfunktion ab (z. B. RAWLSche Wohlfahrtsfunktion), andererseits sind, bei der hier betrachteten BERNOULLI-NASH-Wohlfahrtsfunktion, die Wertungen bzgl. der verschiedenen individuellen Nutzen Aufgabe der politischen Entscheidungsträger (vgl. GÁLVEZ/JARA-DÍAZ [58] S. 208).<sup>18</sup>

Während der individuelle Gewichtungsfaktor  $\lambda_n$  die Präferenzen der Individuen entsprechend ihrem Verhalten angeben soll und damit zur Nachfragemodellierung gehört, ist die soziale Gewichtung Aufgabe des politischen Verantwortungsbereichs.<sup>19</sup> Dabei ist die Frage zu beantworten, ob

- die soziale Wohlfahrt durch die Veränderungen der individuellen Nutzenniveaus gleichgewichtig beeinflusst wird, d. h.  $\alpha_n = 1$  für alle  $n$  oder
- niedrige oder hohe Nutzenniveaus stärker gewichtet werden (vgl. HANUSCH [62] S. 34).

Häufig wird – auch vor dem Hintergrund der Vermeidung einer politischen sozialen Gewichtung – ein einheitlicher sozialer Grenznutzen des Einkommens  $\lambda_s$  für alle Individuen angenommen:

$$\alpha_1 \cdot \lambda_1 = \dots = \alpha_n \cdot \lambda_n = \lambda_s. \quad (2.26)$$

Hieraus resultiert:

$$\alpha_n \cdot \frac{\lambda_n}{\lambda_s} = 1. \quad (2.27)$$

---

<sup>17</sup> Es soll auch hier gelten:  $dy = 0$ .

<sup>18</sup> Das soziale „Gewicht“ darf keinesfalls durch den Analytiker vergeben werden. Ob jedoch politische Entscheidungsträger tatsächlich eine solche Gewichtung vornehmen würden, ist fraglich.

<sup>19</sup> Aus theoretischer Sicht ist grundsätzlich für die Bestimmung einer sozialen Wohlfahrtsfunktion die interpersonelle Vergleichbarkeit der Nutzen notwendig (siehe hierzu z. B. HANUSCH [62] S. 33).

Mittels des sozialen Grenznutzens des Einkommens  $\lambda_s$  erfolgt die Bestimmung der gesamten monetären Wohlfahrtsänderung:

$$\begin{aligned} \frac{dW}{\lambda_s} &= \frac{1}{\lambda_s} \cdot \sum_n \alpha_n \cdot \lambda_n \cdot \left( -\sum_i x_{in}(\mathbf{p}, y_n) dp_i \right) \\ &= \sum_n \alpha_n \cdot \frac{\lambda_n}{\lambda_s} \cdot \left( -\sum_i x_{in}(\mathbf{p}, y_n) dp_i \right) \quad . \\ &= \sum_n \left( -\sum_i x_{in}(\mathbf{p}, y_n) dp_i \right) \end{aligned} \quad (2.28)$$

Durch diesen Ansatz werden alle Veränderungen der individuellen Nutzen mittels eines für alle Individuen gleichen sozialen Grenznutzens des Einkommens:

$$\alpha_n \cdot \lambda_n = \lambda_s \quad (2.29)$$

monetarisiert. Daraus resultiert jedoch, dass das soziale Gewicht mit dem Einkommen steigt, da (vgl. Gleichung (2.27)):

$$\alpha_n = \frac{\lambda_s}{\lambda_n} \quad (2.30)$$

gilt und der Grenznutzen des Einkommens des Individuums  $n$  mit zunehmendem Einkommen sinkt (vgl. GÁLVEZ/JARA-DÍAZ [58] S. 209).

Die Änderung der gesamtwirtschaftlichen Wohlfahrt zwischen Ohne- und Mitfall ergibt sich schließlich durch:

$$\frac{\Delta W}{\lambda_s} = \frac{W^M}{\lambda_s} - \frac{W^O}{\lambda_s} \quad (2.31)$$

Durch das Integrieren des obigen Differentials resultiert die monetäre Wohlfahrtsänderung (vgl. Gleichung (2.22)):

$$\frac{\Delta W}{\lambda_s} = \int_{\mathbf{p}^O}^{\mathbf{p}^M} \frac{dW}{\lambda_s} = -\sum_n \sum_i \int_{p_i^O}^{p_i^M} x_{in}(\mathbf{p}, y_n) dp_i \quad (2.32)$$

Die Thematik der Aggregation der Konsumentenrenten und der sozialen Wohlfahrtsfunktion soll an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden. Deren Probleme hinsichtlich einer gesellschaftlich akzeptablen Gewichtung sind jedoch offensichtlich. Im Rahmen dieser Arbeit wird das soziale Gewicht  $\alpha_n$  explizit betrachtet.

## 3 Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung

In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit relevanten Ansätze der Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung vorgestellt. Da dies nicht alle existierenden Modelle umfasst, sei auf die entsprechende Fachliteratur wie z. B. LOHSE [88] und [92], STEIERWALD ET AL. [135], ORTÚZAR/WILLUMSEN [115] und HENSHER/BUTTON [68] verwiesen. Außerdem erfolgt im letzten Unterkapitel eine gesonderte Betrachtung des induzierten Verkehrs.

### 3.1 Verkehrsangebotsmodellierung

Zur Durchführung von Ortsveränderungen wird ein entsprechendes Angebot benötigt. Im Fachgebiet der Verkehrsplanung kann unter dem Begriff **Verkehrsangebot** die gesamte verkehrstechnische und verkehrsorganisatorische Ausgestaltung der Strecken und Knoten einschließlich der Abbiegebeziehungen im Verkehrsnetz verstanden werden. Hierzu zählen neben den infrastrukturellen Einrichtungen, wie z. B. Anzahl der Fahrstreifen, auch die Angebotsmerkmale des ÖPV (Öffentlicher Personenverkehr) beispielsweise in Form von der Gestaltung des Liniennetzes oder den Zugfolgezeiten. Die wichtigsten Determinanten des Verkehrsangebots und seiner Auslastung sind die für die Durchführung von Ortsveränderungen zu erbringenden **Aufwände**<sup>20</sup>, denen als Schnittstelle zwischen Angebot und Nachfrage eine zentrale Bedeutung zukommt. Sie dienen als Grundlage der in der Verkehrsnachfrageberechnung abgebildeten Wahlentscheidungen für Ziele, Verkehrsmittel und Routen.

Zur Ermittlung der benötigten Aufwände bedarf es eines Verkehrsangebotsmodells, in dem die konkret vorhandenen Verkehrsnetze und alle relevanten Eigenschaften der Verkehrsarten integriert werden müssen. Da es sich um ein Modell handelt erfolgt dies vereinfacht und schematisiert, jedoch in einem so hinreichend genauen Detaillierungsgrad, wie es für den jeweiligen Planungsgegenstand notwendig ist und sich daraus ergebende Wirkungen ableiten lassen können.

---

<sup>20</sup> In der Literatur wird auch häufig der Begriff „Widerstände“ verwendet.

### 3.1.1 Verkehrsnetzmodellierung

Die realen Verkehrsnetze der Verkehrsarten mit ihrer Vielzahl von Kreuzungen und Strecken müssen im Verkehrsmodell durch ihre wesentliche Netzgestalt nachgebildet werden. Zur konkreten Umsetzung dient die Graphentheorie<sup>21</sup>, die das mathematische Werkzeug zur Beschreibung von Verkehrsnetzen darstellt. Im Allgemeinen erfolgt die Darstellung des Verkehrsnetzes durch Strecken und Knoten. Die Strecken werden dabei durch Knoten begrenzt und in drei Gruppen eingeteilt:

- freie Strecken, entsprechen Straßenabschnitten zwischen zwei Straßenknoten,
- Knotenstrecken, symbolisieren Abbiegevorgänge innerhalb eines Straßenknotens und
- Füllstrecken, die die Einspeisung des Verkehrs abbilden.

Eine besondere Bedeutung kommt den Füllknoten und Füllstrecken zu. Die Füllknoten repräsentieren im Verkehrsangebotsmodell die (sichtbaren) Quellen und Ziele, in denen alle Fahrten beginnen und enden, die abgebildet bzw. umgelegt werden. Die Füllstrecken symbolisieren die Einspeisung des Verkehrs von der tatsächlichen (Verkehrs-)Quelle (Verkehrsbezirksschwerpunkt<sup>22</sup>) zum Füllknoten und vom Füllknoten zum tatsächlichen (Verkehrs-)Ziel (vgl. LOHSE [88] S. 269).

### 3.1.2 Ermittlung bewertungsrelevanter Aufwände

Auf Basis des Verkehrsangebotsmodells erfolgt die Quantifizierung bewertungsrelevanter Aufwände zur räumlichen Überwindung der Netzelemente. Diese wichtigen Kriterien für die Wahlentscheidungen setzen sich aus den Aufwänden aller genutzten Netzelemente zusammen. Grundsätzlich ist es möglich, dass ein Verkehrsteilnehmer unterschiedliche Netzelemente kombiniert und diese Kombinationen mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit annimmt. Aus diesem Grund ist es notwendig, alle Netzelemente durch die Zuordnung der entsprechenden Aufwände zu charakterisieren (vgl. LOHSE [88] S. 274). Die einflussreichste Aufwandsgröße stellt die Reisezeit<sup>23</sup> dar. Darüber hinaus können auch weitere relevante und quantifizierbare Größen Eingang finden, die miteinander verknüpft und gewichtet werden.

Die Bestimmung der Aufwände erfolgt auf verkehrstechnischen Grundlagen, wobei grundsätzlich nach Verfahren mit konstanten und variablen Aufwänden unterschieden

---

<sup>21</sup> Einen ausführlichen Überblick über die Theorie geben z. B. DIESTEL [39] und DOMSCHKE [41].

<sup>22</sup> Innerhalb der Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung erfolgt eine Aufteilung des Untersuchungsgebietes in Verkehrsbezirke. Dies ist aus dem planungsmethodischen Grund der eindeutigen Zuordnung der Quellen und Ziele zu bestimmten regionalen Einheiten notwendig. Hierbei heißt der Verkehrsbezirk, in dem die Ortsveränderung beginnt, Verkehrsquelle, während der Verkehrsbezirk, in dem die Ortsveränderung endet, als Verkehrsziel bezeichnet wird. Für nähere Erläuterungen siehe z. B. LOHSE [88] S. 88 ff.

<sup>23</sup> Die Reisezeit setzt sich i. Allg. aus verschiedenen Zeitaufwänden einer Reise zusammen. Hierbei sind die Fahrzeit auf der freien Strecke und die Wartezeiten am Knotenpunkt von besonderer Bedeutung.

werden kann (vgl. LOHSE [88] S. 275 ff.). Realistischer und daher von größerer Bedeutung sind Verfahren zur Bestimmung variabler Aufwände. Dabei ändern sich die Aufwände im Verlauf der Berechnungen und der real existierende Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und Aufwand ist modelltheoretisch abbildbar. Notwendig wird die Berücksichtigung dieser Zusammenhänge, da in vorhandenen komplexen Verkehrsnetzen „Engpässe“, in Form von Kapazitätsbeschränkungen, vorkommen und sich auf die Fahr- bzw. Wartezeiten auswirken. Alternative Routen können in unterschiedlichem Maße davon betroffen sein, wodurch sich abweichende Routenaufwände ergeben. Verkehrsteilnehmer versuchen, größere Aufwände zu vermeiden, weshalb sie als Reaktion auf Routen mit geringeren Aufwänden ausweichen.

Zur Modellierung variabler Aufwände – im Speziellen Fahr- und Wartezeiten<sup>24</sup> – werden sogenannte **CR-Funktionen** (Capacity Restraint) verwendet. Mittels dieser Funktionen werden Fahr- bzw. Wartezeiten  $TM$  in Abhängigkeit der Verkehrsstärke  $M$  und der Kapazität  $C$  beschrieben. Als Anforderung für die funktionale Form der CR-Funktion gilt, dass sie realitätsnahe Zeiten im normalen Verkehrsstärkenbereich  $0 \leq M \leq C$  und ebenfalls noch für die anwachsenden Zeiten im Bereich  $M \approx C$  bzw.  $M > C$  liefern soll. In der Praxis wird oft ein BPR-Ansatz (vgl. BUREAU OF PUBLIC ROADS in [71]) verwendet. In Gleichung (3.1) ist die BPR1-Funktion formal dargestellt.

$$TM = t_0 \cdot \left( 1 + a \cdot \left( \frac{M}{C} \right)^b \right) \quad (3.1)$$

$t_0$       Fahrzeit bei  $M = 0$   
 $a, b$       Parameter

Der Ansatz führt allerdings bei hohen Auslastungsgraden zu unrealistisch hohen Aufwänden, d. h. der Anstieg nimmt nichtlinear zu. Verkehrstechnische Untersuchungen zeigten jedoch, dass die tatsächlichen Fahr- und Wartezeiten ab einem Sättigungsgrad  $SG$  ( $SG = M/C$ ) von ca. 1,2 weitgehend linear verlaufen (vgl. SCHNABEL [125] S. 248). Der Grund für die Linearisierung des Anstiegs liegt in der zeitlich endlichen Dauer der überlasteten Verkehrszustände, bei denen der Zufluss (Verkehrsstärke) über der Kapazität liegt. Vor diesem Hintergrund entwickelte LOHSE die BPR1-Funktion dahingehend weiter zu (vgl. Lohse [89]):

---

<sup>24</sup> Fahr- und Wartezeiten sind jene Aufwandsgrößen die offensichtlich mit der Verkehrsstärke variieren. Für andere Aufwände, die mit diesen Größen korrelieren, ist dies grundsätzlich ebenfalls möglich.



$$TM = \begin{cases} t_0 \cdot \left( 1 + a \cdot \left( \frac{M}{C} \right)^b \right) & \text{wenn } \left( \frac{M}{C} \right) \leq F \\ t_0 \cdot \left( 1 + a \cdot F^b \right) + \left( a \cdot b \cdot t_0 \cdot \frac{F^{b-1}}{C} \right) \cdot (M - F \cdot C) & \text{wenn } \left( \frac{M}{C} \right) > F \end{cases} \quad (3.2)$$

$F$  Beginn des linearen Anstiegs

Ab dem frei wählbaren Punkt  $SG = F$  wird bei dieser Funktion der Grundtyp der BPR1-Funktion (gilt für  $M/C \leq F$ ) mit dem in diesem Punkt vorhandenen Anstieg linear weitergeführt. In Abbildung 3-1 ist die Funktion grafisch dargestellt.

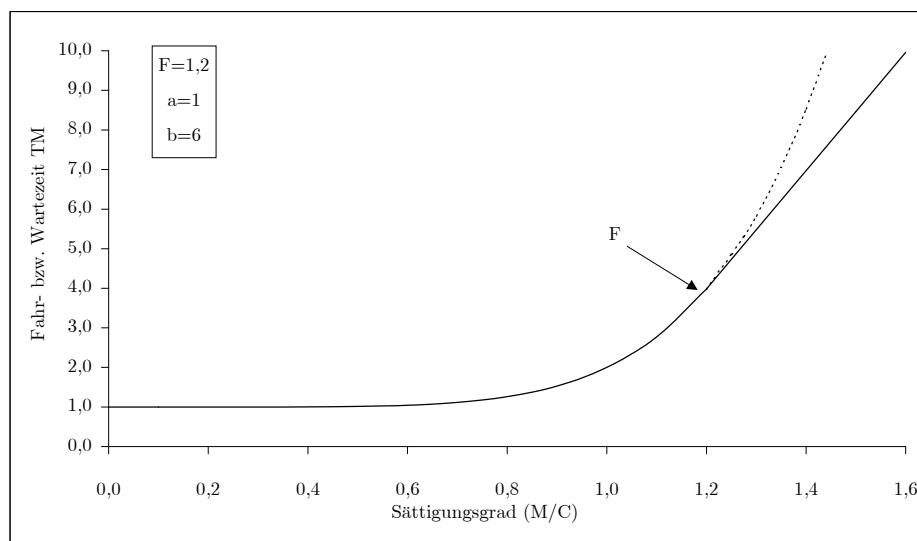


Abbildung 3-1: CR-Funktion nach LOHSE

Neben den beiden hier vorgestellten CR-Funktionen gibt es noch eine Vielzahl weiterer Funktionen, die für spezielle Anwendungen entwickelt wurden. Ein Überblick über verschiedene CR-Funktionstypen findet sich z. B. in ORTÚZAR/WILLUMSEN [115] und PTV [120]. Alle CR-Funktionen bestimmen die  $TM$ -Zeiten auf Basis von  $t_0$ , deren Größe sich unmittelbar aus der Länge und der freien bzw. zulässigen Geschwindigkeit der einzelnen Streckenabschnitte ableitet. Die zulässige Geschwindigkeit unterliegt wiederum dem Ausbauzustand und den verkehrsorganisatorischen Rahmenbedingungen.

Im Verkehrsangebotsmodell erfolgt die Bestimmung der Aufwände von Routen. Die meisten Verkehrsnachfragemodelle benötigen jedoch einen Wert über alle verwendeten Routen einer Quelle-Ziel-Relation. Hierfür wird häufig ein mit den Verkehrsstärken der gefundenen Routen gewogener arithmetischer Mittelwert als Aufwandsgröße verwendet.

## 3.2 Verkehrsnachfragemodellierung

Im Zentrum dieser Arbeit steht der private Personenverkehr sowie dessen Modellierung und Bewertung.<sup>25</sup> Personenverkehr wird von KÖHLER ET AL. ganz allgemein definiert als ([81] S. 43): „[...] Summe von Ortsveränderungen einzelner Personen, die das Ergebnis eines Prozesses sind, dessen Ursprung in den Bedürfnissen der betreffenden Person liegt.“

Die Kausalkette dieses Prozesses, der zur Verkehrsnachfrage führt, lautet (vgl. KÖHLER ET AL. [81] S. 44): Bedürfnisse – Aktivitätenbedarf – Aktivitätennachfrage – Ortsveränderungen. Die Ortsveränderung selbst stellt i. d. R. nicht die eigentliche Aktivität dar und ist damit lediglich „Mittel zum Zweck“. Es gibt folglich kein planungsrelevantes „Verkehrsbedürfnis“, sondern nur den Aktivitätenbedarf (z. B. Wohnen, Arbeiten, Einkaufen), der zur Aktivitätennachfrage führt, welche die Verkehrsnachfrage hervorruft.

Die Verkehrsnachfrage dient somit der Befriedigung des mittelbaren Bedürfnisses Ortsveränderung, die durch die räumliche Trennung der verschiedenen Aktivitätenbedürfnisse entsteht. Zur Quantifizierung wird die von SCHILLER in [124] vorgeschlagene Differenzierung der Verkehrsnachfrage für den Personenverkehr übernommen. Dabei gilt, dass die Verkehrsnachfrage die Anzahl von Subjekten (Personen) oder Objekten (z. B. Fahrzeuge)

- einer verhaltenshomogenen Gruppe  $c$   $c$ ,
- die eine Ortsveränderung  $OV$   $OV_c$
- von einer Quelle  $i$   $OV_{ic}$
- zu einem Ziel  $j$   $OV_{jc}$

ist. Die Summe über alle Ortsveränderungen  $OV$  einer aktivitätenhomogenen Gruppe  $c$

- von einer Quelle  $OV_{ic}$  ergibt das Quellverkehrsaufkommen  $Q_{ic}$ ,
- zu einem Ziel  $OV_{jc}$  ergibt das Zielverkehrsaufkommen  $Z_{jc}$ .

Das Quellverkehrsaufkommen  $Q_{ic}$  und das Zielverkehrsaufkommen  $Z_{jc}$  einer aktivitätenhomogenen Gruppe  $c$  lässt zwischen den Quellen  $i$  und den Zielen  $j$  wiederum

- den Verkehrsstrom  $v$   $v_{ijc}$ ,
- mit einem Verkehrsmittel  $k$   $v_{ijkc}$ ,
- über eine Route  $r$   $v_{ijkrc}$ ,
- zu einem Zeitpunkt  $t$   $v_{ijkrtc}$

entstehen (vgl. SCHILLER [124] S. 48). Die Verkehrsaufkommen und die unterschiedlich ausgeprägten Verkehrsströme repräsentieren hierbei verschiedene Dimensionen der Verkehrsnachfrage (vgl. OPPENHEIM [114] S. 10). Sie unterscheiden sich in der jeweiligen Aggregationsstufe.

---

<sup>25</sup> Da im Rahmen dieser Arbeit Bewertungsansätze des privaten Personenverkehrs betrachtet werden erfolgt nachfolgend keine Vorstellung des Wirtschaftsverkehrs. Einen umfangreichen Überblick über diese Thematik gibt beispielsweise WERMUTH in [135].

Zur Abbildung der Verkehrsnachfrage in einem Raum werden **Verkehrsnachfragemodelle** verwendet, durch die „[...] die Ortsveränderungen bezüglich der Aktivitätenwahl (Verkehrserzeugungsmodelle), der Verkehrszielwahl (Verkehrsverteilungsmodelle), der Verkehrsmittelwahl (Verkehrsaufteilungsmodelle) und der Routenwahl (Verkehrsumlegungsmodelle) beschrieben“ werden (LOHSE in [6] S. 1220). Der Anwendungsbereich dieser Modelle umfasst primär die Erfassung und Darstellung der Wirkungen verkehrsinfrastruktureller, betrieblicher und organisatorischer Maßnahmen auf die Verkehrsnachfrage. Ein wesentlicher Anspruch an Verkehrsnachfragemodelle ist somit die Prognosefähigkeit.

In den folgenden Unterkapiteln wird die Verkehrsnachfragemodellierung im Detail behandelt. Dabei soll das von LOHSE Anfang der 70er Jahre des letzten Jahrhunderts entwickelte makroskopische Verkehrsnachfragemodell EVA<sup>26</sup> (kurz: EVA-Modell) als Grundlage dienen. Das Modell ist in verschiedenen Forschungsberichten (z. B. LOHSE [87] und [88], LOHSE ET AL. [90] und [91], SCHILLER [123] und [124] und DUGGE [42]) ausführlich beschrieben. Für die Darstellungen der Kapitel 3.2.1 sowie 3.2.2.1 wird im Wesentlichen auf diese Veröffentlichungen zurückgegriffen.

### 3.2.1 Verkehrserzeugung

Gegenstand der Verkehrserzeugung ist die Bestimmung der Quell- und Zielverkehrsaufkommen aller Verkehrsbezirke sowie des Gesamtverkehrsaufkommens des Untersuchungsgebietes für einen bestimmten Zeitraum. Hierfür fließen in die Berechnung charakteristische Raumstrukturpotentiale und die Lagegunst der einzelnen Verkehrsbezirke ein. Zur quantitativen Erfassung des Zusammenhangs zwischen Raumstrukturpotentialen und Verkehrsaufkommen dienen empirisch erhobene Produktions- und Attraktionsraten. Die konkrete Verwendung spezieller Daten ist vom jeweiligen Modelltyp und der Verfügbarkeit der Daten abhängig.

Das im EVA-Modell zugrunde gelegte Verkehrserzeugungsmodell ist das **Kennwertmodell**. Es beruht auf einer differenzierten Untersuchung der Entstehungsursachen von Ortsveränderungen bzw. Fahrten. Das Kennwertmodell stellt ein disaggregiertes Modell dar, das auf der Betrachtung aktivitätenhomogener Schichten (Quelle-Ziel-Gruppen) basiert. Diese entsprechen einer Einteilung der Ortsveränderungen des Personenverkehrs in Abhängigkeit bestimmter realisierter Aktivitäten von maßgebenden Bezugspersonen und Strukturgrößen, die mit den Ortsveränderungen in Zusammenhang stehen. Hierdurch wird versucht, elementare stochastische Zusammenhänge, die durch Kennwerte erklärt werden können, abzubilden (vgl. LOHSE [88] S. 161).

---

<sup>26</sup> EVA steht für **E**rzeugung, **V**erteilung und **A**ufteilung.

### 3.2.1.1 Quelle-Ziel-Gruppen

Ausgangspunkt für die Beschreibung von Quelle-Ziel-Gruppen (QZG) sind sogenannte Aktivitätenketten. Diese stellen eine Folge von Aktivitäten dar, deren Reihenfolge den Tagesablauf einer Person beschreibt. Die Häufigkeiten solcher Aktivitätenketten werden im Rahmen von Verkehrsbefragungen erhoben. Quelle-Ziel-Gruppen werden aus erhobenen Aktivitätenketten gebildet, indem disaggregierte verhaltenshomogene Verkehrsnachfrageklassen herausgelöst werden. So ergeben sich beispielsweise aus einer Aktivitätenkette: **Wohnen-Arbeiten-Sonstiges-Wohnen** (W-A-S-W) die entsprechenden Quelle-Ziel-Gruppen: W-A, A-S und S-W. Durch die räumliche Trennung der Aktivitäten werden zu deren Durchführung Ortsveränderungen notwendig, denen im Rahmen des QZG-Systems je eine Quellkategorie (z. B. W) und eine Zielkategorie (z. B. A) zugeordnet werden. Hieraus resultiert wiederum eine eindeutige Zuordnung der Ortsveränderung zu einer Quelle-Ziel-Gruppe (z. B. W-A). Durch die Disaggregation der Aktivitätenkette und den damit verbundenen Ortsveränderungen (Wege) geht jedoch deren Zusammenhang zur gesamten Wegekette verloren (vgl. WERMUTH in [135] S. 259). Auswertungen von DUGGE (vgl. [42] S. 11 f.) zeigen aber, dass über 75 % aller ausgewerteten Wegeketten kurz sind und ausschließlich heimgebundene Ortsveränderungen aufweisen, wodurch kein Informationsverlust bei Anwendung der Quelle-Ziel-Gruppen resultiert. Für einen Großteil der weiteren Wegeketten, die z. T. sehr komplex sind, können i. d. R. keine empirisch repräsentativen Kennwerte ermittelt werden.

Der Personengruppenbezug bei Quelle-Ziel-Gruppen wird durch die Zuordnung mindestens einer maßgebenden Bezugsperson auf der Produktionsseite hergestellt. Demgegenüber muss der Attraktionsseite mindestens eine Strukturgröße zugeordnet werden. Für die Quelle-Ziel-Gruppe W-A gilt beispielsweise, dass der Produktionsseite (Quelle) die Bezugsperson „Erwerbstätige“ zugewiesen wird und der Attraktionsseite (Ziel) die Anzahl der Arbeitsplätze.

In Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden empirischen Daten (Bezugspersonen, Strukturgrößen, Produktions- und Attraktionsraten) und dem angestrebten Detaillierungsgrad der Verkehrsnachfragemodellierung können unterschiedliche Quelle-Ziel-Gruppen-Einteilungen verwendet werden. Häufig verwendete Einteilungen sind z. B. die 13er, 17er oder 21er Einteilung. In Abbildung 3-2 ist die 17er Einteilung dargestellt.

Die Berechnung der Verkehrserzeugung auf Basis von Quelle-Ziel-Gruppen erfordert den Bezug der Quellen und Ziele zu einem „Heimatstandort“. Hieraus ergeben sich folgende drei QZG-Typen (vgl. LOHSE ET AL. [92] S. 10 f.):

- QZG-Typ 1: Beginn (Quelle) der Ortsveränderung am „Heimatstandort“
- QZG-Typ 2: Ende (Ziel) der Ortsveränderung am „Heimatstandort“
- QZG-Typ 3: Beginn und Ende der Ortsveränderung nicht am „Heimatstandort“.

Hierbei können sowohl die Wohnung (1. Priorität) als auch die Arbeitsstätte (2. Priorität) der Heimatstandort sein.

von	nach	Wohnen	Arbeiten	Kinder- einrichtung	Bildung	Dienstliche Erledigung	Einkaufen	Freizeit	Sonstiges
Wohnen	-	WA (1)	WK (1)	WB (1)	WD (1)	WE (1)	WF (1)	WS (1)	
Arbeiten	AW (2)	-	AS (1)						
Kindereinrichtung	KW (2)	SA (2)	SS (3)						
Bildung	BW (2)								
Dienstliche Erledigung	DW (2)								
Einkaufen	EW (2)								
Freizeit	FW (2)								
Sonstiges	SW (2)								

Abbildung 3-2: Quelle-Ziel-Gruppen-Einteilung mit 17 Gruppen (Klammerwert = QZG-Typ)

### 3.2.1.2 Ermittlung der Kennwerte

Zur Anwendung des Kennwertmodells werden Verhaltenskennwerte zur Berechnung der Quell-, Ziel- und Gesamtverkehrsaufkommen benötigt. Diese Kennwerte umfassen die Produktionsraten (spezifische Verkehrsaufkommen), Attraktionsraten (Erzeugungsraten) und die Binnenverkehrsanteile.

#### Produktionsraten

Die Produktionsrate ist durch LOHSE ET AL. ([92] S. 23) definiert „[...] als mittlere Anzahl von Ortsveränderungen pro Person und Tag [...]“. Sie wird für jede Bezugsperson in jeder Quelle-Ziel-Gruppe benötigt. Zur Ermittlung von Produktionsraten ist die Erhebung umfangreicher empirischer Daten hinsichtlich des Mobilitätsverhaltens der Bevölkerung des Untersuchungsgebiets notwendig. Entsprechende regelmäßige Erhebungen in Deutschland sind z. B. „System repräsentativer Verkehrsbefragungen (SrV)“ oder „Mobilität in Deutschland (MiD)“. Ausgangsbasis für die Ableitung der Produktionsraten aus den empirischen Daten bilden die bereits oben erwähnten Aktivitätenketten bzw. die Häufigkeit ihrer Durchführung je Bezugspersonengruppe.

Die Produktionsrate ist stets das Verbindungselement zwischen der Anzahl der Bezugspersonen und den realisierten Ortsveränderungen. Die Bezugspersonengruppen umfassen jeweils alle Personen des Untersuchungsgebiets, die hinsichtlich der Merkmale Alter, Berufstätigkeit und Pkw-Verfügbarkeit homogen sind. Dennoch ist es möglich und teilweise auch nötig, weitere Unterteilungen vorzunehmen. Gründe hierfür sind signifikante Verhaltensunterschiede, die sich in einer unterschiedlichen Produktionsrate abbilden lassen. Beispielsweise können bei entsprechend vorliegenden Daten Produktionsraten in Abhängigkeit der Lage des Verkehrsbezirks bestimmt werden und in das Kennwertmodell einfließen. Ein möglicher Ansatz hierfür findet sich in LOHSE [89]. Eine empirische Untersuchung hinsichtlich des Einflusses des speziellen Raumtyps und damit der Lage liefert WITTWER [161]. WITTWER kommt jedoch zum Ergebnis, „[...] dass der Raumtypeneinfluss gegenüber anderen verhaltensbestimmenden Merkmalen gering ist [...]“ ([161]

S.213 f.). Allerdings wird auf eine Restunsicherheit hingewiesen, da die ausgewerteten Daten teilweise widersprüchlich sind. Es ist offensichtlich, dass an dieser Stelle weiterer Forschungsbedarf besteht.

### **Attraktionsraten**

Aktivitäten an unterschiedlichen Orten sind Grund für die Durchführung von Ortsveränderungen. Die Realisierung der Aktivität ist abhängig von den hierfür notwendigen Strukturgrößen. Diese Strukturgrößen (z. B. Arbeitsplätze) sind i. d. R., ähnlich den Bezugspersonen, aus statistischen Daten zu erheben. Analog der Zuweisung der Produktionsraten zu den Bezugspersonen, sind den Strukturgrößen Attraktionsraten zuzuweisen, die „[...] als Anzahl der Ortsveränderungen pro Tag und Einheit der Strukturgröße [...] festzulegen bzw. zu schätzen“ sind (LOHSE ET AL. [92] S. 25). Die Bestimmung dieser Attraktionsraten ist jedoch deutlich unsicherer als die Ermittlung der Produktionsraten, da hierfür gesicherte empirische Untersuchungen nicht vorliegen (vgl. LOHSE [89] S. 98).

### **Binnenverkehrsanteile**

Durch die Angabe von Binnenverkehrsanteilen werden nur jene Ortsveränderungen der Bevölkerung des Untersuchungsgebietes berechnet, die vollständig im Untersuchungsgebiet realisiert werden. Grenzüberschreitende Ortsveränderungen und solche, die vollständig außerhalb des Untersuchungsgebietes realisiert werden, gehen nicht in die Berechnung ein. Die Binnenverkehrsanteile sind sowohl für die Berechnung des Quell- als auch des Zielverkehrs abzuschätzen.

### **3.2.1.3 Randsummenbedingungen**

Die realen Verkehrsaufkommen unterliegen verschiedenen Abhängigkeiten. Während das Gesamtverkehrsaufkommen und die Verkehrsaufkommen an den Heimatstandorten durch die Anzahl der Bezugspersonen und die entsprechenden Produktionsraten eindeutig bestimmt werden können, haben die Raumstrukturgrößen sowie das Verkehrsangebot und dessen Bewertung in Form der Lagegunst einen zusätzlichen Einfluss auf einige Quell- und Zielverkehrsaufkommen (abhängig vom QZG-Typ). Für die Bestimmung der Quell- und Zielverkehrsaufkommen können grundsätzlich drei Abhängigkeiten formuliert werden:

- ausschließliche Wirkung der Raumstrukturgrößen und deren Kapazitäten,
- Wirkung der Raumstrukturgrößen, deren Kapazitäten und der Lagegunst und
- nur Lagegunstwirkung.

Der Einfluss der Lagegunst kann jedoch erst durch die simultane Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung berücksichtigt werden. Die mathematische Beschreibung der genannten Abhängigkeiten erfolgt durch die Randsummenbedingungen, die den

ermittelten (vorläufigen) Verkehrsaufkommen der Verkehrserzeugung entsprechen.<sup>27</sup> Die Randsummenbedingungen können hierbei in verschiedener Art – und je nach Anwendungsfall – formuliert werden und in das EVA-Modell einfließen.

### Unelastische Randsummenbedingungen

Bei diesen Randsummenbedingungen ergeben sich die Erwartungswerte der Verkehrsaufkommen ausschließlich aus den maßgebenden Strukturgrößen. Dies ist bei der Betrachtung von Quelle-Ziel-Gruppen der Fall, die räumlich nicht substituierbare Aktivitäten (z. B. Arbeiten, Bildung) zum Gegenstand haben. Hieraus folgt, dass die Lagegunst der Verkehrsbezirke keinen Einfluss auf die entsprechenden Quell- und Zielverkehrsaufkommen hat. Darüber hinaus werden im Rahmen der simultanen Verkehrsverteilung und -aufteilung die Verkehrsmittelaufkommen ebenfalls als unelastische Randsummenbedingungen vorgegeben. Für diesen dreidimensionalen Anwendungsfall lautet die mathematische Formulierung der unelastischen Randsummenbedingungen:

$$\begin{aligned} \sum_j \sum_k v_{ijkc} &= Q_{ic} \\ \sum_i \sum_k v_{ijkc} &= Z_{jc} \\ \sum_i \sum_j v_{ijkc} &= A_{kc} \end{aligned} \quad (3.3)$$

A	Verkehrsmittelaufkommen	$i=1\dots I$	Laufindex Quellverkehrsbezirk
Q	Quellverkehrsaufkommen	$j=1\dots J$	Laufindex Zielverkehrsbezirk
Z	Zielverkehrsaufkommen	$k=1\dots K$	Laufindex Verkehrsmittel
v	Verkehrstrom	$c=1\dots C$	Laufindex Quelle-Ziel-Gruppe

Es gilt allgemein:

$$A_{kc} = V_c \cdot MS_{kc} \quad (3.4)$$

$MS_{kc}$	Verkehrsmittelanteil (Modal-Split-Anteil) des Verkehrsmittels $k$ in der Quelle-Ziel-Gruppe $c$
$V_c$	Gesamtverkehrsaufkommen der Quelle-Ziel-Gruppe $c$

### Elastische Randsummenbedingungen

Die Anwendung dieser Randsummenbedingungen erfolgt, wenn sich die Erwartungswerte der Verkehrsaufkommen nicht allein aus den maßgebenden Strukturgrößen ergeben, sondern die unterschiedliche Lagegunst der Verkehrsbezirke eine Bedeutung besitzt. Dies gilt im Besonderen für substituierbare Aktivitäten wie z. B. Einkaufen und Freizeit. Die tatsächlichen Verkehrsaufkommen sind somit auch von der Lagegunst der Verkehrsbezirke abhängig. Zum Beispiel besitzt ein Einkaufszentrum, das verkehrlich sehr gut erschlossen ist und damit eine gute Lagegunst aufweist, gegenüber einem äquivalenten

---

<sup>27</sup> Die Randsummenbedingungen per se sind Elemente der simultanen Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung. Die quantitative Ermittlung der Randsummenbedingungen steht jedoch im engen Zusammenhang mit der Verkehrserzeugung, weshalb sie bereits an dieser Stelle vorgestellt wird.

Einkaufszentrum, welches jedoch eine schlechtere Lagegunst besitzt, einen Wettbewerbs- bzw. Konkurrenzvorteil. Solange keine Überlastung (in Form von Auslastung durch andere Verkehrsteilnehmer) des günstiger gelegenen Einkaufszentrums eintritt<sup>28</sup> werden die Verkehrsteilnehmer dieses mit einer höheren Wahrscheinlichkeit aufsuchen.<sup>29</sup>

Aufgrund der Lagegunstabhängigkeit der Quell- und Zielverkehrsaufkommen bei Anwendung elastischer Randsummenbedingungen ergeben sich die entsprechenden tatsächlich eintretenden Verkehrsaufkommen erst im Rahmen der Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung. In der Verkehrserzeugung werden hingegen lediglich minimale und maximale Verkehrsaufkommen bestimmt. Hierbei repräsentieren die maximalen Verkehrsaufkommen die Obergrenze, d. h. die maximale Aufnahmefähigkeit des Verkehrsbezirks. Die minimalen Verkehrsaufkommen entsprechen zwingend zu realisierenden Verkehrsaufkommen, die selbst bei äußerst schlechter Lagegunst durchgeführt bzw. modelliert werden müssen (vgl. SCHILLER [124] S. 73 ff.).

Mathematisch lassen sich diese Zusammenhänge für den dreidimensionalen Fall wie folgt darstellen:

$$\begin{aligned}
 Q_{ic}^{\min} &\leq \sum_j \sum_k v_{ijkc} = Q_{ic} \leq Q_{ic}^{\max} & Q_{ic}^{\min} &< Q_{ic}^{\max} \\
 Z_{jc}^{\min} &\leq \sum_i \sum_k v_{ijkc} = Z_{jc} \leq Z_{jc}^{\max} & Z_{jc}^{\min} &< Z_{jc}^{\max} . \\
 \sum_i \sum_j v_{ijkc} &= A_{kc}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Grundsätzlich einzuhaltende Nebenbedingung – unabhängig von der Art der Randsummenbedingung – ist:

$$\sum_i \sum_j \sum_k v_{ijkc} = V_c . \tag{3.6}$$

Damit wird gewährleistet, dass das produzierte Gesamtverkehrsaufkommen stets eingehalten bzw. realisiert wird. Für tieferegreifende Diskussionen bzgl. verschiedener Randsummenbedingungen, deren Gegenüberstellung und Zusammenführung sei auf LOHSE [88], LOHSE ET AL. [92] und SCHILLER [124] verwiesen.

In der Berechnungsvorschrift des einfachen Kennwertmodells (Anhang A) findet sich der sogenannte Randsummenausgleich. Hintergrund dieses Berechnungsschrittes ist die

---

<sup>28</sup> Bei der Anwendung elastischer Randsummenbedingungen muss im Untersuchungsgebiet eine ausreichende Gesamtkapazität der Strukturgrößen zur Aufnahme der Verkehrsaufkommen gewährleistet sein.

<sup>29</sup> Es sind noch zusätzliche Nebenbedingungen in Form auslastungsabhängiger Attraktivitäten bzw. Lagegunst formulierbar, die eine Reduzierung der Attraktivität infolge der Erhöhung der Auslastung, beispielsweise eines Einkaufszentrums, berücksichtigen. Weiterführende Darstellungen hierzu finden sich z. B. in LOHSE ET AL. [92] und SCHILLER [124].



Feststellung, dass in der Realität bestimmte Aktivitätenketten häufiger auftreten als andere und damit Asymmetrien bei bestimmten Quelle-Ziel-Gruppen auftreten. Beispielsweise treten i. d. R. die Ortsveränderungen der Quelle-Ziel-Gruppen W-A, A-E und E-W häufiger auf als W-E, E-A und A-W, was sich ebenfalls in empirisch erhobenen Produktionsraten widerspiegelt (vgl. LOHSE ET AL. [92] S. 32). Die Asymmetrien führen dazu, dass bei der Summation über alle Quell-Ziel-Gruppen i. Allg. gilt:

$$\sum_c Q_{ic} \neq \sum_c Z_{ic}. \quad (3.7)$$

$i=1\dots I$     Laufindex Verkehrsbezirk ( $i=j$ )  
 $c=1\dots C$     Laufindex über alle Quelle-Ziel-Gruppen

Hieraus ergäbe sich ein „Füllen“ oder „Leeren“ der einzelnen Verkehrsbezirke, was im Kontrast zur beobachtbaren Realität steht, dass innerhalb eines „verkehrlich geschlossenen“ Zeitraumes eine weitgehende Gleichheit der Quell- und Zielverkehrsaufkommen der Verkehrsbezirke herrscht. Im Rahmen der Verkehrsnachfragemodellierung kann daher die sinnvolle Annahme gelten:

$$\sum_c Q_{ic} = \sum_c Z_{ic}. \quad (3.8)$$

Zur Einhaltung dieser Bilanzbedingung erfolgt eine Ausgleichsrechnung im QZG-Typ 3. Da hierfür alle Verkehrsaufkommen bekannt sein müssen, erfolgt der Randsummenausgleich erst nach der Berechnung der Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung (vgl. LOHSE ET AL. [92] S. 32 ff.). Hieraus wird deutlich, dass Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung beim EVA-Modell keine unabhängigen und sequentiellen Berechnungsmodule darstellen, sondern durch sinnvolle Rückkopplungen verknüpft sind.

### 3.2.2 Ziel- und Verkehrsmittelwahl

Bevor die simultane Ziel- und Verkehrsmittelwahl vorgestellt wird, sollen beide Ansätze getrennt betrachtet werden. Hierdurch werden unterschiedliche Restriktionen und Modellphilosophien neuerer simultaner Berechnungsansätze deutlich, deren Beachtung für die weiterführenden Überlegungen notwendig ist.

Für die **Zielwahl** finden Modelle der Verkehrsverteilung Anwendung. Diese „[...] dienen der Ermittlung der Verkehrsströme  $v_{ij}$  zwischen allen möglichen Quellen  $i$  und Zielen  $j$ , also der Aufspaltung der Quellverkehrsaufkommen  $Q_i$  auf die Ziele  $j$  bzw. der Zielverkehrsaufkommen  $Z_j$  auf die Quellen  $i$ “ (LOHSE [89] S. 110). Das Ergebnis sind die Elemente der zweidimensionalen Verkehrsstrommatrix (vgl. Abbildung 3-3). Im Rahmen der Zielwahl besitzen die Randsummenbedingungen, aufgrund des räumlichen Bezugs, eine hohe Bedeutung.

nach j von i	1	...	j	...	J	$\Sigma$
1	$v_{11}$					$Q_1$
...		...				...
i			$v_{ij}$			$Q_i$
...				...		...
I					$v_{IJ}$	$Q_I$
$\Sigma$	$Z_1$	...	$Z_j$	...	$Z_J$	V

Abbildung 3-3: Kurzschreibweise einer zweidimensionalen Verkehrsstrommatrix

Ein weit verbreitetes Verkehrsverteilungsmodell ist das sogenannte Gravitationsmodell, welches in seiner formalen Struktur eine Analogie zum NEWTONschen Gravitationsgesetz aufweist und danach benannt wurde (vgl. BATES in [68] S. 26 f.). Das Modell ist im Besonderen hinsichtlich der Bewertungsfunktion (Potenzfunktion; vgl. Kapitel 3.2.2.3.1) und der Einhaltung von Randsummenbedingungen eingeschränkt. Aus diesem Grund erfolgten in der Vergangenheit Weiterentwicklungen, wovon im Besonderen der Ansatz der Entropiemaximierung von WILSON ([158] und [159]) von Bedeutung ist. WILSON fasste die Entropiemaximierung als einen theoretischen Erklärungsansatz zur Begründung der bereits vorher erfolgten Modellerweiterungen zur Einhaltung verschiedener Randsummenbedingungen und der Verwendung einer Exponentialfunktion als Bewertungsfunktion auf. Die für die Ableitung dieses Ansatzes notwendige vorzugebende Systembedingung, die den Gesamtaufwand über alle realisierten Ortsveränderungen umfasst, rief allerdings Kritik hervor, da hierdurch aus einer Systemgröße individuelle Nutzerbewertungen abgeleitet werden (vgl. BRÖCKER [23] S. 94 f. und LOHSE ET AL. [92] S. 54 f.). Darüber hinaus gibt es zahlreiche weitere alternative Bewertungsfunktionen, die zur Erreichung besserer Modellierungsergebnisse dienen sollen (siehe z. B. MÄCKE/HÖLSKEN [95], MÄCKE/RUSKE [96], LOHSE ET AL. [92] und WERMUTH in [135]).

Die **Verkehrsmittelwahl** wird mit Hilfe von Verkehrsaufteilungsmodellen realisiert, mit denen die Wahl eines zur Verfügung stehenden Verkehrsmittels erfolgt. Es kann dabei grundsätzlich in die Trip-End- und Trip-Interchange-Modelle unterschieden werden (vgl. LOHSE [88] S. 234 ff.). Bei Trip-End-Modellen erfolgt unmittelbar nach der Verkehrserzeugung die Verkehrsmittelwahl auf Basis empirischer Grundlagen. Im Rahmen der Trip-Interchange-Modelle erfolgt die Verkehrsmittelwahl nach der Zielwahl. Hierfür werden i. d. R. Modelle der stochastischen diskreten Wahltheorie angewendet. Randsummenbedingungen sind dabei nicht Bestandteile der Modelle.

Sowohl die sequentielle und unabhängige Berechnung der Ziel- und Verkehrsmittelwahl als auch deren methodisch unterschiedliche Modellierungsansätze sind kritikwürdig. Die Unabhängigkeit der Berechnungen ist abzulehnen, da davon auszugehen ist, dass Ziel- und Verkehrsmittelwahl in vielen Fällen von den Verkehrsteilnehmern nicht unabhängig

voneinander getroffen werden. Die sequentielle Berechnung führt außerdem zu dem Problem, dass im Rahmen der Zielwahl bei Trip-Interchange-Modellen keine nach Verkehrsmitteln differenzierten Aufwandsgrößen herangezogen werden können. Somit muss für die Zielwahl eine Aufwandsgröße bestimmt werden, die für alle Verkehrsmittel als gleich angenommen werden kann (z. B. Luftlinienentfernung).

Aus den oben genannten Gründen wurden in der Vergangenheit Modelle entwickelt, die eine **simultane Ziel- und Verkehrsmittelwahl** berechnen. Die verschiedenen Ableitungsmöglichkeiten dieser Modelle erfolgen jeweils auf der Annahme eines gemeinsamen theoretischen Entscheidungsaxioms der Ziel- und Verkehrsmittelwahl, wobei der Erklärungsansatz auf die zusätzliche Dimension übertragen wird (siehe Abbildung 3-4).

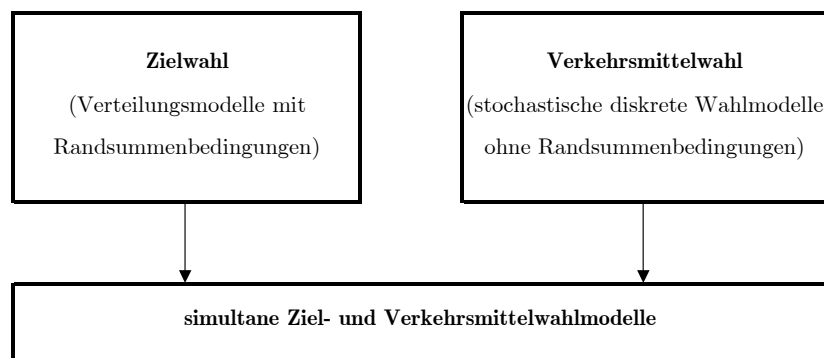


Abbildung 3-4: Ableitungsansätze simultaner Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodelle

Im folgenden Kapitel wird das EVA-Grundmodell<sup>30</sup> vorgestellt, das seinen Modellursprung in der Zielwahl hat und Randsummenbedingungen umfasst. Daran anschließend erfolgt die Vorstellung der stochastischen diskreten Wahltheorie als zweite wesentliche Grundlage simultaner Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodelle. Sie ist mikroökonomisch begründet und für weitere Überlegungen von Bedeutung.

### 3.2.2.1 EVA-Grundmodell

#### 3.2.2.1.1 Überblick

Das EVA-Grundmodell hat seinen Ursprung in der Verkehrsverteilung. Aufbauend auf deren Modellierungsanforderungen und -ansätzen wurde die Verkehrsverteilung um eine weitere Dimension (Verkehrsmittel) erweitert. Die in der Verkehrsverteilung verankerten Randsummenbedingungen besitzen auch hier eine bedeutende Rolle und werden auf die Verkehrsmittelwahl ausgedehnt.

<sup>30</sup> Das EVA-Grundmodell beschreibt nur die tri-lineare Modellierung der Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung. Im Gegensatz dazu enthält das gesamte EVA-Modell auch die Erzeugung mit Randsummenausgleich.

Ausgangspunkt ist ein bilineares Verteilungsmodell mit unelastischen Randsummenbedingungen. In seiner allgemeinsten Form lautet es:<sup>31</sup>

$$\begin{array}{l}
 v_{ij} = B_{ij} \cdot fq_i \cdot fz_j \\
 \left. \begin{array}{l}
 \sum_j v_{ij} = Q_i \\
 \sum_i v_{ij} = Z_j
 \end{array} \right\} \text{Randsummenbedingungen}
 \end{array} \quad (3.9)$$

$B_{ij}$  Aufwandsbewertung der Quelle-Ziel-Relation  $ij$  mittels einer Bewertungsfunktion  
 $fq_i, fz_j$  Faktoren zur Einhaltung der quell- und zieleseitigen Randsummenbedingungen

Das darauf aufbauende EVA-Grundmodell der simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahl mit unelastischen Randsummenbedingungen ist in der Kurzschreibweise in Formel (3.10) dargestellt.

$$\begin{array}{l}
 v_{ijk} = B_{ijk} \cdot fq_i \cdot fz_j \cdot fa_k \\
 \left. \begin{array}{l}
 \sum_j \sum_k v_{ijk} = Q_i \\
 \sum_i \sum_k v_{ijk} = Z_j \\
 \sum_i \sum_j v_{ijk} = A_k
 \end{array} \right\} \text{Randsummenbedingungen}
 \end{array} \quad (3.10)$$

$B_{ijk}$  Aufwandsbewertung der Quelle-Ziel-Relation  $ij$  des Verkehrsmittels  $k$  mittels einer Bewertungsfunktion  
 $fa_k$  Faktor zur Einhaltung der Randsummenbedingung des Verkehrsmittelaufkommens  $A_k$

Die simultane Ziel- und Verkehrsmittelwahl erfolgt hierbei simultan für alle Quelle-Ziel-Gruppen  $c$ . Die Anzahl der zu berechnenden Verkehrsstrommatrizen ist gegeben durch das Produkt aus der Anzahl der Quelle-Ziel-Gruppen und der betrachteten Verkehrsmittel. Abschließend sind die QZG-feinen Verkehrsstrommatrizen je Verkehrsmittel durch den Besetzungsgrad zu dividieren und anschließend je Verkehrsmittel über alle Quelle-Ziel-Gruppen zu aggregieren.

Den Aufwandsbewertungen  $B_{ijk}$  kommt eine herausragende Rolle hinsichtlich der Modellierungsqualität zu. Hierbei kann bzw. muss im Sinne einer Bewertung entsprechend der Präferenzen der Verkehrsteilnehmer eine Bewertungsfunktion definiert werden (siehe Kapitel 3.2.2.3.1). Die mittels der Bewertungsfunktion bestimmten Bewertungen je Alternative stellen a-priori-Bewertungen in einem offenen Entscheidungsraum dar.

---

<sup>31</sup> Auf die Indizierung der Quelle-Ziel-Gruppen wird im Folgenden bei der Vorstellung des EVA-Grundmodells verzichtet.

Entsprechend der wahrscheinlichkeitstheoretischen Ableitung des EVA-Grundmodells (vgl. Kapitel 3.2.2.1.2) gilt die Einschränkung:  $0 \leq B_{ijk} \leq 1$ .

Im tatsächlichen Verkehrsgeschehen treten jedoch neben den Aufwänden, die unmittelbar in die Bewertung  $B_{ijk}$  einfließen, weitere „Raumrestriktionen“ auf, die durch die Vorgabe in Form der Randsummenbedingungen beachtet werden. Die simultane Ziel- und Verkehrsmittelwahl mittels des EVA-Grundmodells unter Einhaltung von Randsummenbedingungen ermittelt hierbei die möglichst geringste Abweichung von der (a-priori-)Bewertung  $B_{ijk}$ .

### Lösungsverfahren

Die Lösung der Gleichung (3.10) erfolgt mittels eines sukzessiven approximativen Iterationsverfahrens. Hierbei entspricht die Lösungsmatrix  $v_{ijk}$  einer Lineartransformation der a-priori-Bewertungsmatrix  $B_{ijk}$ . Zur Eindeutigkeit der Lösung muss neben der Beachtung von  $B_{ijk}$  und der Randsummenbedingungen ebenfalls die Minimierung des Informationsgewinns (siehe Kapitel 3.2.2.1.3) gewährleistet sein. Als Lösungsverfahren finden beispielsweise das FURNESS- (FURNESS [57]) und das MULTI-Verfahren (LOHSE in [126]) Anwendung. Das FURNESS-Verfahren ist das bekannteste und meist angewandte Iterationsverfahren zur Lösung bilinearer Gleichungssysteme. Es kann jedoch auch auf ein trilineares System übertragen werden. Das MULTI-Verfahren wurde speziell für die Lösung des EVA-Grundmodells entwickelt und hat die Eigenschaft, dass es i. d. R. schneller iteriert. Ausführliche Beschreibungen hinsichtlich der Lösungsverfahren bei unterschiedlichen Randsummenbedingungen finden sich z. B. in LOHSE ET AL. [90] und SCHILLER [124].

### Potentiale

Neben den Bewertungen  $B_{ijk}$  und den Randsummenbedingungen können bzw. müssen für eine adäquate Modellierung Potentiale der Verkehrsbezirke in der simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahl berücksichtigt werden. Die Potentiale stellen durch die Verkehrsteilnehmer wahrgenommene und bewertete Eigenschaften der Ziele bzw. Quellen der Verkehrsbezirke dar. Größere Potentiale besitzen ein höheres Anziehungsgewicht als kleinere Potentiale, da davon ausgegangen werden kann, dass größere Potentiale einen höheren Bekanntheitsgrad besitzen. Die Potentiale gehen als ein zusätzliches Gewicht des betreffenden Verkehrsbezirks in die simultane Ziel- und Verkehrsmittelwahl ein.

Bei unelastischen Randsummenbedingungen sind die Quell- und Zielverkehrsaufkommen bereits im Rahmen der Verkehrserzeugung eindeutig determiniert, weshalb eine Berücksichtigung von Quell- und Zielverkehrspotentialen in der simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahl keinen Einfluss auf die berechneten Verkehrsströme besitzt. Im Gegensatz dazu werden bei elastischen Randsummenbedingungen lediglich Ober- und Untergrenzen der Verkehrsaufkommen durch die Verkehrserzeugung festgelegt. Die Verkehrsbezirke „konkurrieren“ in diesen Grenzen um die Verkehrsaufkommen, wobei die Potentiale (neben der Lagegunst) der Verkehrsbezirke einen Einfluss haben. Hierbei sind

die drei unterschiedlichen QZG-Typen zu beachten. Beim Typ 1 finden nur Zielverkehrspotentiale, beim Typ 2 nur Quellverkehrspotentiale und beim Typ 3 sowohl Ziel- als auch Quellverkehrspotentiale Eingang. Das EVA-Grundmodell mit Berücksichtigung von Zielverkehrspotentialen (Typ 1) lautet (vgl. z. B. LOHSE ET AL. [92] S. 118):

$$\begin{aligned}
 v_{ijk} &= B_{ijk} \cdot Z_j^P \cdot fq_i \cdot fz_j \cdot fa_k \\
 \sum_j \sum_k v_{ijk} &= Q_i \\
 Z_j^{min} &\leq \sum_i \sum_k v_{ijk} = Z_j \leq Z_j^{max} \quad Z_j^{min} < Z_j^{max} \\
 \sum_i \sum_j v_{ijk} &= A_k
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

$Z_j^P$  Zielverkehrspotential

Zur Bestimmung der Potentiale sind verschiedene Ansätze denkbar, wobei der allgemeinste Fall die Gleichsetzung der maximalen Verkehrsaufkommen (Obergrenze der Verkehrsaufkommen) mit den Potentialen darstellt.<sup>32</sup> Für die Quell- und Zielverkehrspotentiale folgt daraus:

$$\begin{aligned}
 Q_i^P &= Q_i^{max} \\
 Z_j^P &= Z_j^{max}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

### Prognosefähigkeit

Die Prognosefähigkeit ist ein Qualitätsmerkmal eines Verkehrsnachfragemodells. Für die Verkehrserzeugung und Zielwahl wird die Prognosefähigkeit modelltheoretisch problemlos gewährleistet, da Veränderungen in den Strukturgrößen und Produktions- und Attraktionsraten ohne Weiteres in das Prognosemodell integriert werden können. Dies ist zwar grundsätzlich auch für die Verkehrsmittelwahl möglich, jedoch fehlt i. d. R. die Kenntnis über den Modal Split für den Prognosefall.

Das EVA-Grundmodell in der bisher vorgestellten Form entspricht dem Ansatz mit externer Vorgabe des Modal Splits aus empirischen Erhebungen, womit die Verkehrsmittelaufkommen  $A_k$  bestimmt und in Form von Randsummenbedingungen eingehalten werden können. Da diese Informationen für den Prognosefall nicht vorliegen, sind für die entsprechende Verkehrsmittelwahl äquivalente Erklärungsgrößen, die aus der Analysefallberechnung bestimmbar sind, notwendig.

---

<sup>32</sup> Ein noch allgemeinerer Fall, der alle möglichen Varianten enthält, basiert auf elastischen Randsummenbedingungen mit auslastungsabhängiger Attraktivität (siehe LOHSE ET AL. [92]).

Der Verkehrsmittelanteil an einem Verkehrsstrom  $y_{ijk}$  für den Analysefall lautet:

$$y_{ijk} = \frac{v_{ijk}}{\sum_{k'} v_{ijk'}} = \frac{fa_k \cdot B_{ijk}}{\sum_{k'} fa_{k'} \cdot B_{ijk'}}. \quad (3.13)$$

Die Bewertungen  $B_{ijk}$  sind hierbei von subjektiven (Präferenzen) und objektiven (Aufwände, Potentiale) Einflüssen abhängig und sollen das menschliche Verhalten möglichst genau abbilden. Sie allein vermögen jedoch i. d. R. nicht den realen Modal Split, der sich als Reaktion auf ein reales Verkehrsangebot in Abhängigkeit der Präferenzen der Verkehrsteilnehmer ergibt, im Modell abzubilden. Deshalb geht der Modal Split als ein reales beobachtbares Produkt der subjektiven und objektiven Kriterien als externe Größe in das Modell ein. Die  $fa_k$ -Faktoren gewährleisten für jede Quelle-Ziel-Gruppe die Einhaltung der QZG-feinen Verkehrsmittelaufkommen.

Für die Prognoseberechnung werden aus diesen Faktoren die Verkehrsmittelkonstanten  $C_k$ , die **normierten** Verkehrsmittelgewichten entsprechen, wie folgt gebildet:

$$C_k = \frac{fa_k}{\sum_{k'} fa_{k'}}. \quad (3.14)$$

Der Berechnungsansatz für die Prognose ist ein bi-linearer Modellansatz mit der Vorgabe der konstanten Faktoren  $C_k$ . Für den Fall unelastischer Randsummenbedingungen lautet der Ansatz:

$$\begin{aligned} v_{ijk}^P &= B_{ijk} \cdot C_k \cdot fq_i \cdot fz_j \\ \sum_j \sum_k v_{ijk} &= Q_i \\ \sum_i \sum_k v_{ijk} &= Z_j \end{aligned} \quad (3.15)$$

Die Faktoren  $C_k$  sind für jede Quelle-Ziel-Gruppe aus der Analyse zu bestimmen und für die Prognose vorzugeben. Die Faktoren  $fq_i$  und  $fz_j$  sind analog dem Analysefall iterativ zu bestimmen. Es ergeben sich somit die prognostizierten Verkehrsströme unter Beachtung veränderter Raum- und Verkehrsangebotsstruktur und unter unveränderten Verkehrsmittelgewichten. Aufgrund der Veränderungen ergibt sich auch ein neuer Modal Split.

### Modellerweiterungen

Das EVA-Grundmodell ist das „Urmodell“ für weitere Modellentwicklungen. Hierzu zählen Modellerweiterungen zur Berücksichtigung polarer und bipolarer Einzugsgebiete (vgl. LOHSE ET AL. [92] S. 62 f. und S. 92 ff.). Diese Gebiete repräsentieren in Abhängigkeit der „Pole“ Wohnstätte (polar) und Arbeitsstätte (bipolar) den räumlichen Bereich, in denen die Ortsveränderungen durchgeführt werden. Dadurch wird gewährleistet, dass Quellen

und Ziele in größerer Entfernung von der Wohnstätte und der Arbeitsstätte seltener aufgesucht werden als im Nahbereich. Andere Modellerweiterungen entwickelten SCHILLER [123] (Berücksichtigung des ruhenden Verkehrs) und DUGGE [42] (Erweiterung der Simultanrechnung um die Routenwahl).

In den bisherigen Ausführungen wurde das EVA-Grundmodell kurz vorgestellt und charakterisiert. Im Rahmen dieser Arbeit sind darüber hinaus Untersuchungen hinsichtlich des Erklärungsansatzes und der Interpretationsmöglichkeiten notwendig. Daher werden in den nächsten Kapiteln die modelltheoretischen Ableitungen des Modells vorgestellt.

### 3.2.2.1.2 EVA-Grundmodell auf Basis des BAYESSchen Axioms

Die Ableitung des EVA-Grundmodells ist auf Basis der Wahrscheinlichkeitstheorie möglich (siehe LOHSE ET AL. [92]). Diesen Überlegungen liegt die Annahme über das Verkehrsgeschehen als Massenerscheinung mit Zufallscharakter zugrunde. Hierzu wird eine Grundgesamtheit potentieller Verkehrsteilnehmer, die eine Quelle  $i$ , ein Ziel  $j$  und ein Verkehrsmittel  $k$  zufällig auswählen, betrachtet. Die Verkehrsteilnehmer bewerten den Aufwand der ausgewählten Alternative und realisieren die Ortsveränderung  $ijk$  (Annahme oder Ablehnung) in Abhängigkeit der Bewertungswahrscheinlichkeit  $B_{ijk}$ .

Folgende zufällige Ereignisse – als Teilmenge eines abstrakten Wahrscheinlichkeitsraumes  $\Omega$  – werden zur mathematischen Beschreibung der potentiellen Ortsveränderungen eingeführt:

- $A_i$  potentiell mögliche Ortsveränderung beginnt in  $i$  ( $i = 1, \dots, I$ ),
- $E_j$  potentiell mögliche Ortsveränderung endet in  $j$  ( $j = 1, \dots, J$ ),
- $M_k$  potentiell mögliche Ortsveränderung wird mit Verkehrsmittel  $k$  durchgeführt ( $k = 1, \dots, K$ ),
- $W$  potentiell mögliche Ortsveränderung wird angenommen und durchgeführt,
- $\overline{W}$  potentiell mögliche Ortsveränderung wird abgelehnt und nicht durchgeführt.

Durch Anwendung der Mengenoperationen Vereinigung und Durchschnitt ergibt sich das Ereignisfeld  $F$  in  $\Omega$ . Das Ereignisfeld besitzt als kleinste Ereignisse:

$$\left(A_i \cap E_j \cap M_k\right) \cap W \quad \text{bzw.} \quad \left(A_i \cap E_j \cap M_k\right) \cap \overline{W}. \quad (3.16)$$

Die Annahme bzw. Ablehnung des jeweiligen Ereignisses erfolgt in Abhängigkeit der durch die Verkehrsteilnehmer vorgenommenen Bewertung der Aufwände. Für das auf dem Ereignisfeld zu definierende Wahrscheinlichkeitsmaß  $P$  werden folgende Annahmen getroffen:

- die Ereignisse  $A_i$ ,  $E_j$  und  $M_k$  sind unabhängig und es gilt folglich:

$$P\left(A_i \cap E_j \cap M_k\right) = P\left(A_i\right) \cdot P\left(E_j\right) \cdot P\left(M_k\right), \quad (3.17)$$



- die bedingten (Bewertungs-)Wahrscheinlichkeiten  $B_{ijk}$  zur Realisierung der potentiell möglichen Ortsveränderung  $ijk$  bezüglich der Bewertung des Aufwandes sind bekannt:

$$B_{ijk} = P\left(W \mid \left(A_i \cap E_j \cap M_k\right)\right), \quad (3.18)$$

- die Verkehrsströme  $v_{ijk}$  werden proportional zu den bedingten (Auswahl-)Wahrscheinlichkeiten  $P\left(\left(A_i \cap E_j \cap M_k\right) \mid W\right)$  angenommen:

$$v_{ijk} = P\left(\left(A_i \cap E_j \cap M_k\right) \mid W\right) \cdot V. \quad (3.19)$$

Der Verkehrsstrom  $v_{ijk}$  ergibt sich somit aus der Wahrscheinlichkeit der Auswahl der Ortsveränderung  $ijk$  aus der Grundgesamtheit aller realisierten Ortsveränderungen multipliziert mit dem Gesamtverkehrsaufkommen  $V$ . Die bedingten (Auswahl-)Wahrscheinlichkeiten sind jedoch nicht bekannt. Zur Ermittlung kann die Formel von BAYES herangezogen werden (siehe z. B. MERZIGER ET AL. [106] S. 196).

Für die Ermittlung der a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten  $P\left(\left(A_i \cap E_j \cap M_k\right) \mid W\right)$  werden die a-priori-Wahrscheinlichkeiten  $P\left(W \mid \left(A_i \cap E_j \cap M_k\right)\right)$ ,  $P\left(A_i\right)$ ,  $P\left(E_j\right)$  und  $P\left(M_k\right)$  als bekannt vorausgesetzt. Mittels der Formel von BAYES ergibt sich dann:

$$\begin{aligned} P\left(\left(A_i \cap E_j \cap M_k\right) \mid W\right) &= \frac{P\left(W \mid \left(A_i \cap E_j \cap M_k\right)\right) \cdot P\left(A_i \cap E_j \cap M_k\right)}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} P\left(W \mid \left(A_{i'} \cap E_{j'} \cap M_{k'}\right)\right) \cdot P\left(A_{i'} \cap E_{j'} \cap M_{k'}\right)} \\ &= \frac{B_{ijk} \cdot P\left(A_i\right) \cdot P\left(E_j\right) \cdot P\left(M_k\right)}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} B_{i'j'k'} \cdot P\left(A_{i'}\right) \cdot P\left(E_{j'}\right) \cdot P\left(M_{k'}\right)} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Werden die unbedingten a-priori-Wahrscheinlichkeiten  $P\left(A_i\right)$ ,  $P\left(E_j\right)$  und  $P\left(M_k\right)$  über gegebene Quell-, Ziel- und Verkehrsmittelpotentiale bestimmt und keine weiteren Restriktionen in Form von Randsummenbedingungen beachtet, ergibt sich das EVA-Grundmodell ohne bzw. mit „offenen“ Randsummenbedingungen, die einen Grenzfall der elastischen Randsummenbedingungen darstellen.

Randsummenbedingungen stellen in der Verkehrsnachfragemodellierung ein bedeutendes Instrument dar, weshalb eine explizite wahrscheinlichkeitstheoretische Betrachtung notwendig ist und hier für unelastische Randsummenbedingungen erfolgt. Für diesen Fall können die Wahrscheinlichkeiten  $P\left(A_i\right)$ ,  $P\left(E_j\right)$  und  $P\left(M_k\right)$  nicht als bekannt vorausgesetzt werden, weshalb die bedingten a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten  $P\left(A_i \mid W\right)$ ,

$P(E_j|W)$  und  $P(M_k|W)$  für die Berechnung herangezogen werden. Diese Wahrscheinlichkeiten sind durch die Verkehrserzeugung festgelegt und es gilt:

$$P(A_i|W) = \frac{Q_i}{V}, \quad P(E_j|W) = \frac{Z_j}{V}, \quad P(M_k|W) = \frac{A_k}{V}. \quad (3.21)$$

Werden die unbedingten und bedingten Wahrscheinlichkeiten ins Verhältnis gesetzt, resultieren sogenannte Lagefaktoren:

$$q_i = \frac{P(A_i)}{P(A_i|W)}, \quad z_j = \frac{P(E_j)}{P(E_j|W)} \quad \text{sowie} \quad a_k = \frac{P(M_k)}{P(M_k|W)}. \quad (3.22)$$

Durch Umstellung ergibt sich:

$$P(A_i) = P(A_i|W) \cdot q_i, \quad P(E_j) = P(E_j|W) \cdot z_j, \quad P(M_k) = P(M_k|W) \cdot a_k. \quad (3.23)$$

Somit ergeben sich durch Einsetzen in (3.20) die a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten zur Durchführung der Ortsveränderungen:

$$P\left(\left(A_i \cap E_j \cap M_k\right) \middle| W\right) = \frac{\left(B_{ijk} \cdot P(A_i|W) \cdot q_i \cdot P(E_j|W) \cdot z_j \cdot P(M_k|W) \cdot a_k\right)}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} \left( B_{i'j'k'} \cdot P(A_{i'}|W) \cdot q_{i'} \cdot P(E_{j'}|W) \cdot z_{j'} \cdot P(M_{k'}|W) \cdot a_{k'} \right)} \quad (3.24)$$

und folglich das EVA-Grundmodell mit unelastischen Randsummenbedingungen:

$$\begin{aligned} v_{ijk} &= \frac{B_{ijk} \cdot P(A_i|W) \cdot q_i \cdot P(E_j|W) \cdot z_j \cdot P(M_k|W) \cdot a_k}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} B_{i'j'k'} \cdot P(A_{i'}|W) \cdot q_{i'} \cdot P(E_{j'}|W) \cdot z_{j'} \cdot P(M_{k'}|W) \cdot a_{k'}} \cdot V \\ &= \frac{B_{ijk} \cdot \frac{Q_i}{V} \cdot q_i \cdot \frac{Z_j}{V} \cdot z_j \cdot \frac{A_k}{V} \cdot a_k}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} B_{i'j'k'} \cdot \frac{Q_{i'}}{V} \cdot q_{i'} \cdot \frac{Z_{j'}}{V} \cdot z_{j'} \cdot \frac{A_{k'}}{V} \cdot a_{k'}} \cdot V \end{aligned} \quad (3.25)$$

Dies kann umformuliert werden zu:

$$v_{ijk} = B_{ijk} \cdot \frac{Q_i}{V} \cdot q_i \cdot \frac{Z_j}{V} \cdot z_j \cdot \frac{A_k}{V} \cdot a_k \cdot f, \quad (3.26)$$

woraus sich die allgemeine Kurzschreibweise des EVA-Grundmodells (vgl. Gleichung (3.10)) durch Zusammenfassen ergibt:

$$\begin{aligned}
v_{ijk} &= B_{ijk} \cdot fq_i \cdot fz_j \cdot fa_k \\
\sum_j \sum_k v_{ijk} &= Q_i \\
\sum_i \sum_k v_{ijk} &= Z_j \\
\sum_i \sum_j v_{ijk} &= A_k
\end{aligned}$$

Durch die Lösung des trilinearen Gleichungssystems unter Einhaltung der Randsummenbedingungen und Minimierung des Informationsgewinns ergeben sich die Lösungsfaktoren  $fq_i$ ,  $fz_j$  und  $fa_k$ . Erst durch diese Faktoren lassen sich die unbedingten Wahrscheinlichkeiten  $P(A_i)$ ,  $P(E_j)$  und  $P(M_k)$  bestimmen.

### 3.2.2.1.3 EVA-Grundmodell auf Basis der Informationsgewinnminimierung

Eine weitere Ableitung des EVA-Grundmodells ist (unmittelbar) über den Ansatz der Minimierung des Informationsgewinns (siehe hierzu LOHSE ET AL. [92]) möglich und formal dem theoretischen Ansatz der Entropiemaximierung von WILSON ähnlich, jedoch allgemeiner. Analog zum vorangegangenen Kapitel erfolgt auch hier die Ableitung des EVA-Grundmodells mit unelastischen Randsummenbedingungen. Entsprechende Ansätze für elastische Randsummenbedingungen sind deutlich komplexer und sollen daher an dieser Stelle nicht aufgezeigt werden (siehe hierzu LOHSE ET AL. [92], LOHSE [89] und SCHILLER [123]).

Wie bereits in Kapitel 3.2.2.1 beschrieben, stellt die a-priori-Bewertungsmatrix  $B_{ijk}$  den Ausgangspunkt der Überlegungen dar. Die Bewertung erfolgt auf Basis der Präferenzen der Verkehrsteilnehmer, wodurch davon auszugehen ist, dass die sich ergebende „Matrixordnung“ einem gewünschten Zustand der Verkehrsteilnehmer entspricht.<sup>33</sup> Neben dieser originären, auf den Präferenzen der Verkehrsteilnehmer beruhenden Verteilung, wirken jedoch zusätzliche Raumrestriktionen, die der Verwirklichung dieser Wunschverteilung entgegen stehen. Diese Restriktionen fließen in Form der Randsummenbedingungen in das Modell ein.

Die unter den gegebenen Bewertungen und Restriktionen realisierte Verkehrsnachfrage der Verkehrsteilnehmer kann durch den Ansatz der **Minimierung des Informationsgewinns** (siehe SHANNON [127], BREGMAN [21], LOHSE ET AL. [92]) beschrieben werden. Der Berechnungsansatz zur Ermittlung des Informationsgewinns für das EVA-Grundmodell lautet:

---

<sup>33</sup> Es werden hier bewusst nicht die Begriffe „Nutzen“ oder „Nutzenmaximierung“ verwendet, da in dieser Arbeit der Begriff „Nutzen“ unter der strengen Definition des in der Mikroökonomie verwendeten Nutzenprinzips Anwendung finden soll (vgl. Kapitel 2 und 3.2.2.2). Es ist dennoch grundsätzlich möglich, dass die Bewertungen  $B_{ijk}$  der Nutzenmaximierung im ökonomischen Sinne genügen.

$$I = \sum_i \sum_j \sum_k \left[ v_{ijk} \cdot \ln \left( \frac{v_{ijk}}{B_{ijk}} \right) \right]. \quad (3.27)$$

Ziel des Ansatzes der Informationsgewinnminimierung ist es jene Verkehrsstrommatrix  $v_{ijk}$  zu finden, welche unter Einhaltung der Randsummenbedingungen die geringste Abweichung von der Ausgangsmatrix aufweist. Es handelt sich folglich um ein Extremwertproblem mit Nebenbedingungen. Zur Bestimmung des Informationsgewinnminimums kann eine von BREGMAN entwickelte Relaxationsmethode zur Lösung konvexer Optimierungsaufgaben (vgl. BREGMAN [21] S. 147 ff.) Anwendung finden. Es gilt hierbei, dass zu einer gegebenen Bewertungsmatrix  $B_{ijk}$  und unter Berücksichtigung affin-linearer Nebenbedingungen der Form:

$$\begin{aligned} \sum_j \sum_k v_{ijk} &= Q_i \\ \sum_i \sum_k v_{ijk} &= Z_j \\ \sum_i \sum_j v_{ijk} &= A_k \end{aligned}$$

die gesuchten Verkehrsströme:

$$v_{ijk} = B_{ijk} \cdot fq_i \cdot fz_j \cdot fa_k$$

als Lösung des konvexen Optimierungsproblems:<sup>34</sup>

$$I \left( v_{ijk} \parallel B_{ijk} \right) = \sum_i \sum_j \sum_k \left[ v_{ijk} \cdot \ln \left( \frac{v_{ijk}}{B_{ijk}} \right) - v_{ijk} \right] \rightarrow Min! \quad (3.28)$$

beschrieben werden können. Zusätzlich gilt:

- der Ausdruck  $(0 \cdot \ln 0)$  wird als Null interpretiert,
- die Summation erstreckt sich über alle Tripel  $(i, j, k)$  der Menge  $M = \{(i, j, k) = B_{ijk} > 0\}$  und
- der gültige Bereich wird von allen Matrizen  $v_{ijk} > 0$  mit  $(i, j, k) \in M$  und  $v_{ijk} = 0$  mit  $(i, j, k) \notin M$  gebildet.

---

<sup>34</sup> Die zusätzliche Subtraktion des Gesamtverkehrsaufkommens  $(\sum_i \sum_j \sum_k v_{ijk})$  ermöglicht eine wesentlich einfachere mathematische Handhabung ohne eine Beeinflussung des Ergebnisses.

Durch Anwendung der Multiplikatorenmethode von LAGRANGE auf das Optimierungsproblem (3.28) mit den oben stehenden Nebenbedingungen ergibt sich folgende LAGRANGE-Funktion:

$$F = \sum_i \sum_j \sum_k \left[ v_{ijk} \cdot \ln \left( \frac{v_{ijk}}{B_{ijk}} \right) - v_{ijk} \right] + \sum_i \xi_i \cdot \left( \sum_j \sum_k v_{ijk} - Q_i \right) + \sum_j o_j \cdot \left( \sum_i \sum_k v_{ijk} - Z_j \right) + \sum_k \pi_k \cdot \left( \sum_i \sum_j v_{ijk} - A_k \right) \quad (3.29)$$

Wenn das System wenigstens eine zulässige Lösung besitzt, dann existiert ebenfalls eine eindeutig bestimmte optimale Lösung, welche den Nebenbedingungen und den Gleichungen:

$$\frac{\partial F}{\partial v_{ijk}} = \ln \left( \frac{v_{ijk}}{B_{ijk}} \right) + \xi_i + o_j + \pi_k = 0 \quad (i, j, k) \in M \quad (3.30)$$

genügt. Hieraus folgt die optimale Lösung:

$$v_{ijk} = B_{ijk} \cdot e^{-\xi_i} \cdot e^{-o_j} \cdot e^{-\pi_k} \quad (i, j, k) \in M, \\ = B_{ijk} \cdot fq_i \cdot fz_j \cdot fa_k \quad (3.31)$$

mit  $fq_i = e^{-\xi_i}$ ,  $fz_j = e^{-o_j}$  und  $fa_k = e^{-\pi_k}$ , wobei  $\xi_i$ ,  $o_j$  und  $\pi_k$  die LAGRANGE-Faktoren darstellen.

Die optimale Lösung des Ansatzes entspricht dem EVA-Grundmodell mit unelastischen Randsummenbedingungen. Im Unterschied zur wahrscheinlichkeitstheoretischen Ableitung ist eine Interpretation bzw. Transformation der Bewertungen als Wahrscheinlichkeitsmaß nicht notwendig (aber möglich), weshalb dieser Ansatz im Vergleich (noch) weniger restriktiv ist. Für die Bewertungen  $B_{ijk}$  gilt jedoch die praktisch gegebene Einschränkung:  $B_{ijk} \geq 0$ .

### 3.2.2.2 Stochastische diskrete Wahltheorie

#### 3.2.2.2.1 Hintergrund

Ausgangspunkt dieser Theorie sind mikroökonomische Problemstellungen diskreter Natur an deren Lösung die klassische mikroökonomische Konsumtheorie scheitert. Werden diskrete Gütermengen nachgefragt, so ist die Annahme beliebig teilbarer Gütermengen verletzt. Dies trifft auch bei der Formulierung von Verkehrsnachfragemodellen auf mikroökonomischer Basis zu, da stets nur ein Gut, d. h. eine Fahrt realisiert werden kann.

Der Lösungsansatz findet sich auf dem Gebiet der Verhaltenswissenschaften.<sup>35</sup> Hier wurden im Rahmen psychologischer Experimente (vgl. THURSTONE [141]) anscheinend zufällige Reaktionen von Probanden auf einen gegebenen Stimulus festgestellt, die mit deterministischen Ansätzen nicht befriedigend erklärt werden konnten. Daher wurden zur Erklärung des Verhaltens teilstochastische Entscheidungsmodelle entwickelt, die im Gegensatz zu rein deterministischen Modellen auch eine stochastische Modellkomponente besitzen. Die Übertragung auf mikroökonomische Fragestellungen gelang, indem ein beobachtbarer Nutzen als messbarer Stimulus aufgefasst wurde, woraus eine ökonomische stochastische Wahltheorie resultiert.

Die Problematik der diskreten Wahl kann folglich mittels Modellen der stochastischen Wahltheorie gelöst werden. Hierbei lassen sich grundsätzlich zwei Ansätze unterscheiden (vgl. BEN-AKIVA/LERMAN [14] S. 48 ff.):

- stochastische Wahltheorie mit konstantem (deterministischen) Nutzen und
- stochastische Wahltheorie mit stochastischem Nutzen (Zufallsnutzentheorie).

Die beiden Ansätze unterscheiden sich hinsichtlich der Berücksichtigung der stochastischen Komponente. Modelle mit konstantem Nutzen weisen eine stochastische Entscheidungsregel auf, während Modelle mit stochastischem Nutzen eine deterministische Entscheidungsregel besitzen. In Hinblick auf ökonomische Untersuchungen und Interpretationen ist die zweite Modellklasse von wesentlich größerer Bedeutung, da sie im Grundgedanken der mikroökonomischen Konsumtheorie wesentlich ähnlicher und mit der Annahme rationalen Verhaltens der Entscheidungsträger vereinbar ist. Aufgrund dieser Bedeutung wird in der Literatur im Zusammenhang mit der (stochastischen) diskreten Wahltheorie (discrete choice theory) zumeist die Zufallsnutzentheorie (random utility theory) unterstellt.

Im Folgenden wird der Ansatz der stochastischen diskreten Wahltheorie auf Grundlage der Zufallsnutzentheorie vorgestellt. Da die Thematik sehr umfangreich ist und hier nur in den für diese Arbeit relevanten Punkten erläutert wird, sei für weiterführende Darstellungen beispielsweise auf DOMENCICH/MCFADDEN [40], MANSKI/MCFADDEN [102], BEN-AKIVA/LERMAN [14], TRAIN [143] und MAIER/WEISS [100] verwiesen, auf denen auch die folgenden Ausführungen weitestgehend beruhen.

---

<sup>35</sup> Einen historischen Abriss über die Entwicklung der diskreten Wahltheorie gibt MCFADDEN in [105].

### 3.2.2.2 Allgemeiner Ansatz

Zunächst ist für die Darstellung des allgemeinen Ansatzes der Modelle diskreter Wahlentscheidungen die Alternativenmenge  $A_n$  der einzelnen Entscheidungsträger (Choice Set), die zwischen den Individuen variieren kann<sup>36</sup>, zu definieren:

$$A_n = \{a_{1n}, a_{2n}, \dots, a_{B_n n}\}. \quad (3.32)$$

$a$	Elemente der Alternativenmenge
$n=1\dots N$	Laufindex Entscheidungsträger
$b=1\dots B_n$	Laufindex Elemente der Alternativenmenge

Eine inhaltliche Spezifikation erhalten die Alternativen durch die Beschreibung ihrer Charakteristika in Anlehnung an den Ansatz von LANCASTER [85], der eine Erweiterung der mikroökonomischen Konsumtheorie darstellt. Die Bewertung und der Vergleich der Alternativen erfolgt auf Basis des Nutzens. Hierfür ist eine Nutzenfunktion  $u$  aufzustellen, die neben den durch ihre Charakteristika beschriebenen Alternativen ebenfalls sozioökonomische Charakteristika der Entscheidungsträger beinhaltet. Der alternativenspezifische Nutzen kann ausgedrückt werden als:

$$u_b(a_{bn}) = u(\mathbf{C}_{bn}, \mathbf{S}_n). \quad (3.33)$$

$\mathbf{C}$	Vektor der Alternativencharakteristika
$\mathbf{S}$	Vektor der sozioökonomischen Charakteristika des Entscheidungsträgers

Die in Gleichung (3.33) beschriebene Nutzenfunktion ist vollständig deterministischer Natur. Da dies im Rahmen diskreter Auswahlentscheidungen zu keinen realistischen Ergebnissen führt, erfolgt die Formulierung im Rahmen der Zufallsnutzentheorie (vgl. MANSKI [101]), wobei die Nutzenfunktion neben der deterministischen ebenfalls eine stochastische Komponente umfasst.<sup>37</sup> Es gilt somit:

$$u_{bn} = u(a_{bn}) = \bar{u}(\mathbf{C}_{bn}, \mathbf{S}_n) + \varepsilon(\mathbf{C}_{bn}, \mathbf{S}_n) = \bar{u}_{bn} + \varepsilon_{bn}. \quad (3.34)$$

Die Funktion  $\bar{u}$  stellt hierbei die deterministische Nutzenkomponente dar und beschreibt die Beziehung der beobachtbaren Charakteristika der Alternativen und der sozioökonomischen Charakteristika der Individuen und dem deterministischen Nutzen. Die stochastische Nutzenkomponente  $\varepsilon$  – auch Störgröße oder Störterm genannt – repräsentiert hingegen einen vom Modellierer nicht erfassbaren Einfluss, der als Differenz zwischen dem

<sup>36</sup> Zum Beispiel hat eine Person ohne Führerschein im Rahmen der Verkehrsmittelwahl nicht die Alternative des Fahrens eines Pkw. Die Gesamtheit über alle überhaupt verfügbaren Alternativen wird als „universelle Alternativenmenge“ bezeichnet.

<sup>37</sup> Durch diese additive Zusammenfassung zweier Nutzenkomponenten weist der Nutzen kardinale Eigenschaften auf. Dies steht zwar im Widerspruch zur vorherrschenden ordinalen Nutzentheorie innerhalb der Mikroökonomie, BATLEY zeigt jedoch in [10], dass der kardinale Nutzen in Modellen der Zufallsnutzenmaximierung als „Repräsentant“ des ordinalen Nutzens aufgefasst werden kann.

wahren Nutzen  $u$  und dem erfassten Nutzen  $\bar{u}$  verstanden werden kann (vgl. TRAIN [143] S. 19). Hierdurch wird der Gesamtnutzen  $u$  als Zufallsgröße beschrieben, wobei  $\bar{u}$  als Erwartungswert und  $\varepsilon$  als Streuung um diesen Wert interpretierbar sind.

Für die Unvollständigkeit der zur Erklärung des beobachteten Entscheidungsverhaltens benötigten Informationen werden in der Fachliteratur folgende vier Hauptgründe aufgezählt (vgl. z. B. BEN-AKIVA/LERMAN [14] S. 56 f.):

- unbeobachtete Charakteristika der Alternativen ( $C_{bn}$  ist unvollständig),
- unbeobachtete sozioökonomische Charakteristika ( $S_n$  ist unvollständig),
- Messfehler und
- Instrumentenvariablen, d. h. Variablen, die nur indirekt beobachtet werden können.

Neben den genannten Gründen, die die Unvollständigkeit der Informationen des Modellierers bezüglich des Entscheidungsverhaltens der Entscheidungsträger umfassen, ist im Rahmen der Verkehrsnachfragemodellierung auch ein subjektiver Schätzfehler der Entscheidungsträger zu beachten. Es ist davon auszugehen, dass der Verkehrsteilnehmer die realen Aufwände nicht exakt kennt bzw. wahrnimmt und die der Entscheidung zugrundeliegenden Aufwände einer Streuung unterliegen. Die Störgröße  $\varepsilon$  umfasst somit sowohl die Unvollständigkeit der Informationen des Modellierers als auch des Entscheidungsträgers.

In der Zufallsnutzentheorie wird – entsprechend dem klassischen Nutzenkonzept – dem Entscheidungsträger rationales Verhalten unterstellt, woraus das Prinzip der **Zufallsnutzenmaximierung** resultiert. Es wird dabei eine Wahrscheinlichkeitsaussage über die Auswahl der Alternative  $a_{bn}$  getroffen, die bei Zugrundelegung der (Zufalls-)Nutzenmaximierung der Wahrscheinlichkeit entspricht, dass diese Alternative den höchsten Nutzen aufweist. Es gilt:

$$\begin{aligned}
 P_{bn} &= \text{Prob}\left(u_{bn} \geq u_{b'n}, \quad b' = 1, \dots, B_n\right) \\
 &= \text{Prob}\left(\bar{u}_{bn} + \varepsilon_{bn} \geq \bar{u}_{b'n} + \varepsilon_{b'n}, \quad b' = 1, \dots, B_n\right) \\
 &= \text{Prob}\left(\bar{u}_{bn} + \varepsilon_{bn} - \bar{u}_{b'n} \geq \varepsilon_{b'n}, \quad b' = 1, \dots, B_n\right) \\
 &= \text{Prob}\left(\bar{u}_{bn} - \bar{u}_{b'n} \geq \varepsilon_{b'n} - \varepsilon_{bn}, \quad b' = 1, \dots, B_n\right)
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

Aus den Gleichungen (3.35) wird deutlich, dass für die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative, aufgrund der additiven Verknüpfung der deterministischen und stochastischen Nutzenkomponente, die Nutzendifferenzen maßgebend sind. Da über die stochastischen Nutzenanteile der Alternativen nichts Genaues bekannt ist, werden diese als zufällig betrachtet. Infolgedessen muss eine Annahme über deren Verteilung erfolgen. Durch die konkrete Annahme und Festlegung dieser Verteilung, der damit ebenfalls die Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $u$  unterliegt, kann die rechte Seite der Gleichungen in (3.35)



berechnet werden. Allgemein kann die gemeinsame Verteilung der Störterme aller Alternativen des Individuums  $n$  angegeben werden als:

$$f_n \left( \varepsilon_{1n}, \varepsilon_{2n}, \dots, \varepsilon_{B_n n} \right). \quad (3.36)$$

Die Funktion  $f$  wird als Dichtefunktion bezeichnet und entspricht einer stetigen Wahrscheinlichkeitsverteilung.<sup>38</sup> Sie sagt jedoch nichts über die Beziehung der alternativen-spezifischen Störterme aus. Diese können grundsätzlich über die Individuen und auch über die Alternativen variieren und miteinander korrelieren. Die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative  $b = 1$  des Individuums  $n$  ergibt sich durch Lösen des folgenden geschachtelten Integrals, wobei alle Wechselwirkungen zwischen den Alternativen berücksichtigt werden:

$$P_{1n} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{\bar{u}_{1n} + \varepsilon_{1n} - \bar{u}_{2n}} \dots \int_{-\infty}^{\bar{u}_{1n} + \varepsilon_{1n} - \bar{u}_{B_n n}} f_n \left( \varepsilon_{1n}, \varepsilon_{2n}, \dots, \varepsilon_{B_n n} \right) d\varepsilon_{B_n n} \dots d\varepsilon_{1n}. \quad (3.37)$$

Die numerische Berechnung von (3.37) ist sehr aufwendig und bei einer größeren Alternativenanzahl kaum praktikabel. Durch die Annahme einer mathematisch günstigen Verteilung von  $\varepsilon$  ist jedoch, wie noch gezeigt wird, die Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeiten in einer geschlossenen Form möglich. Dies ist darüber hinaus noch von der Unabhängigkeit der Zufallskomponente  $\varepsilon$  von den alternativen-spezifischen und sozio-ökonomischen Charakteristika abhängig (vgl. Gleichung (3.34)). Wenn das gewährleistet ist, dann bewirkt eine Änderung eines Charakteristikums (wird in  $\bar{u}$  berücksichtigt) eine Verschiebung, aber keine Veränderung der Verteilung von  $u$ . Diese Eigenschaft wird als **Translationsinvarianz** bezeichnet und führt dazu, dass Nutzendifferenzen unabhängig vom Absolutwert stets zu gleichen Auswahlwahrscheinlichkeiten führen.

### Deterministische Nutzenkomponente

Die deterministische Nutzenkomponente stellt den eindeutig quantifizierbaren Anteil der Nutzenfunktion dar und ist folglich maßgebend für die Bewertung der Alternativen. In der Literatur wird zumeist die deterministische Nutzenkomponente durch eine Nutzenfunktion beschrieben, die linear in den Parametern ist. Diese lautet allgemein:

$$\bar{u}_{bn} = \sum_l \beta_l \cdot X_{bnl} \quad \text{mit} \quad X_{bnl} = h_l \left( \mathbf{C}_{bn}, \mathbf{S}_n \right). \quad (3.38)$$

Hierbei wird  $X_{bnl}$  als  $l$ -te unabhängige erklärende Variable der Nutzenfunktion  $\bar{u}$  bezeichnet. Die Funktion  $h_l$  stellt die Transformation dar, die der Modellierer mit den Rohdaten, d. h. den Werten der Charakteristika der Alternativen und den Werten der sozioökonomischen Charakteristika, durchführt. Die Transformationen dienen der Erhöhung der

---

<sup>38</sup> Daher ist die Wahrscheinlichkeit für  $u_{in} = u_{jn}$  stets Null und es liegt immer eine eindeutige Präferenzordnung vor. Für nähere Erläuterungen siehe z. B. MAIER/WEISS [100] S. 102ff.

Erklärungskraft des Modells, wofür grundsätzlich keine Restriktionen gesetzt und auch nichtlineare Funktionen zulässig sind (siehe Kapitel 3.2.2.3.2). Die Parameter  $\beta_i$  stellen zu schätzende Größen dar, die beispielsweise aus stated-response-Befragungen gewonnen werden können. Die mittels der Funktion  $h_i$  transformierten Variablen lassen sich folgendermaßen klassifizieren (vgl. MAIER/WEISS [100] S. 127 f.):

- Generische Variablen: sind erklärende Variablen, die über alle Alternativen variieren und sich i. Allg. aus  $C_{bn}$  ergeben. Sie können darüber hinaus auch über die Individuen variieren. Beispiel: Reisezeit und Reisekosten.
- Alternativenspezifische Konstanten: repräsentieren i. d. R. qualitative Ausprägungen. Beispiel: Verkehrsmittelkonstante, Quell- und Zielpotentiale.
- Alternativenspezifische sozioökonomische Variablen: weisen ähnliche Merkmale wie die alternativenspezifischen Konstanten auf, variieren allerdings über die Individuen. Beispiel: einkommensabhängige Variable nur für das Verkehrsmittel MIV.

Neben der vorgestellten Form der Nutzenfunktion mit linearen Parametern existieren beliebig viele Möglichkeiten der Spezifikation der deterministischen Nutzenkomponente. Die Beliebtheit der vorgestellten Form liegt in der einfachen Schätzbarkeit der Parameter.

### Stochastische Nutzenkomponente

Im Gegensatz zur deterministischen Nutzenkomponente kann die stochastische Nutzenkomponente nicht durch beobachtbare und messbare Größen quantifiziert werden. Für sie muss eine Annahme über die Verteilungsfunktion der Störterme  $\varepsilon$  getroffen werden, die über grundlegende Eigenschaften des Modells entscheidet. Aufgrund dieser Bedeutung wird die Spezifizierung der Verteilung der Störterme zur Klassifizierung der Zufallsnutzenmodelle herangezogen. Die bedeutendsten Verteilungen der Störterme und die Hauptvertreter der daraus ableitbaren Modelle sind:

- Gumbelverteilung (Logit-Modell),
- Normalverteilung (Probit-Modell) und
- Gleichverteilung der Differenz der Störterme (lineares Wahrscheinlichkeitsmodell).

Im Rahmen der Verkehrsnachfragemodellierung besitzt das Logit-Modell die größte Bedeutung. Dies liegt vor allem an der geschlossenen Modellform zur Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeiten (vgl. Gleichung (3.37)). Das Logit-Modell soll aufgrund seiner Bedeutung nachfolgend vorgestellt werden.

#### 3.2.2.2.3 Logit-Modell

Während die meisten Modelle der Zufallsnutzentheorie für den binären Fall, d. h. die Wahl zwischen zwei Alternativen, noch relativ problemlos angewandt werden können, ist dies für den multinomialen Fall nicht oder nur unter sehr großem rechentechnischen Aufwand möglich. Mit dem multinomialen Logit-Modell allerdings sind die

Auswahlwahrscheinlichkeiten einer beliebig großen Anzahl von Alternativen problemlos berechenbar. Die formale Darstellung lautet:

$$P_{bn} = \frac{e^{\mu \cdot \bar{u}_{bn}}}{\sum_{b'} e^{\mu \cdot \bar{u}_{b'n}}} \quad (3.39)$$

$\mu$  Skalierungsparameter

Die Ableitung des Modells findet sich in Anhang B und beruht auf der Annahme **unabhängig** und **identisch Gumbel-verteilter** Störterme. Der Skalierungsparameter dient der Skalierung des Nutzens und muss zur Identifizierung der Parameter der deterministischen Nutzenkomponente a priori fixiert werden (vgl. MAIER/WEISS [100] S. 139). In der Regel wird dem Parameter der Wert Eins zugewiesen.<sup>39</sup> Das multinomiale Logit-Modell kann folglich auch geschrieben werden als:

$$P_{bn} = \frac{e^{\bar{u}_{bn}}}{\sum_{b'} e^{\bar{u}_{b'n}}} \quad (3.40)$$

Entsprechend der Zufallsnutzentheorie sind alle nachfragebeeinflussenden Faktoren Bestandteil der deterministischen Nutzenfunktion, in der die Präferenzen der Verkehrsteilnehmer Eingang finden. Die formale Struktur des Modells und die Exponentialfunktion sind Resultate aus der Annahme über die Verteilungsfunktion der Störterme.

Die mittels des Logit-Modells bestimmten Auswahlwahrscheinlichkeiten genügen den Axiomen der Wahrscheinlichkeitsrechnung nach KOLMOGOROW (siehe z. B. BAMBERG ET AL. [7] S. 80). Somit gilt:  $0 \leq P_{bn} \leq 1$  und  $\sum_{b'} P_{b'n} = 1$ , wobei die Auswahlwahrscheinlichkeiten von Null und Eins nur im Grenzübergang erreicht werden (vgl. MAIER/WEISS [100] S. 138). Aus diesen Eigenschaften ist ersichtlich, dass trotz der strengen theoretischen Annahmen zur Ableitung des Logit-Modells dieses ebenfalls den allgemeineren wahrscheinlichkeitstheoretischen Anforderungen genügt. Hierdurch ist es möglich, jedes auf Auswahlwahrscheinlichkeiten basierende Modell in Form des Logit-Modells darzustellen (vgl. MAIER/WEISS [100] S. 224). In diesem Zusammenhang wird in der Literatur vom „universalen“ Logit-Modell oder auch „mother logit“ gesprochen. In Anhang C ist das EVA-Grundmodell in Form des universalen Logit-Modells dargestellt.

Eine weitere bedeutende Eigenschaft des Modells ist die sogenannte **IIA-Eigenschaft** (Independence from Irrelevant Alternatives), die besagt, dass das Verhältnis der Auswahlwahrscheinlichkeiten zweier Alternativen unabhängig von der Verfügbarkeit und den

---

<sup>39</sup> Der Parameter hat in bestimmten Logit-Modellvarianten (Nested-Logit-Modell) eine explizite Bedeutung. Die Thematik wird jedoch in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Charakteristika anderer Alternativen ist (vgl. MAIER/WEISS [100] S. 141). Diese Eigenschaften weisen alle Modelle zur Bestimmung von Auswahlwahrscheinlichkeiten auf, die den Axiomen der Wahrscheinlichkeitsrechnung genügen und bei denen nur Eigenschaften der betrachteten Alternative in deren deterministische Nutzenfunktion eingehen (vgl. MAIER/WEISS [100] S. 226).

Das Logit-Modell hat zur Verbesserung der Modelleigenschaften zahlreiche Weiterentwicklungen erfahren. Hierzu zählen z. B. das Nested-Logit-Modell oder das Mixed-Logit-Modell. Das Probit-Modell ist das flexibelste Zufallsnutzenmodell, welches auf die Annahme unabhängig und identisch verteilter Störterme verzichtet, deren Auswahlwahrscheinlichkeiten jedoch nicht in einer mathematisch geschlossenen Form bestimmt werden können. Das von BRILON/DETTE entwickelte Rubit-Modell (vgl. [22]) ist (ähnlich dem Logit-Modell) einfach berechenbar, wird jedoch über die Annahme der multiplikativen Verknüpfung der deterministischen und stochastischen Nutzenkomponente abgeleitet.

Stochastische diskrete Wahlmodelle und das Logit-Modell als deren Hauptvertreter besitzen im Rahmen der Verkehrsnachfragetheorie zwei wesentliche Anwendungsgebiete. Dies sind zum einen die Modellierung der Verkehrsnachfrage, zum anderen die Schätzung der Zahlungsbereitschaften der Verkehrsteilnehmer für die Einsparung einer Zeiteinheit, d. h. zur Ermittlung des Wertes der Zeit, aus Befragungsergebnissen.

Für die Berechnung der Verkehrsnachfrage stellt das Wahlmodell die Verkehrsnachfragefunktion für einen **repräsentativen Verkehrsteilnehmer** einer Personen- und/oder Quelle-Ziel-Gruppe dar. Dabei ist zu beachten, dass zusätzlich bestehende Unterschiede in den sozioökonomischen Charakteristika der Verkehrsteilnehmer einer Gruppe nicht explizit in  $\bar{u}$  eingehen und als Störungseinfluss aufgefasst werden (vgl. MAIER/WEISS [100] S. 199). Die deterministische Nutzenkomponente ist für jeden Verkehrsteilnehmer der Gruppe gleich. Zur Bestimmung der tatsächlich realisierten Nachfrage **aller** Verkehrsteilnehmer der Gruppe ist die Auswahlwahrscheinlichkeit mit dem entsprechenden Verkehrsaufkommen zu multiplizieren. Im Fall der globalen Fixierung des Gesamtverkehrsaufkommens lautet die Verkehrsnachfragefunktion für die simultane Ziel- und Verkehrsmittelwahl einer Quelle-Ziel-Gruppe  $c$  (Joint-Logit-Modell):

$$v_{ijkc} = \frac{e^{\bar{u}_{ijkc}}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} e^{\bar{u}_{i'j'k'c}}} \cdot V_c. \quad (3.41)$$

Die Fixierung kann ebenfalls quell- oder zweiseitig erfolgen, hingegen ist die Einhaltung beidseitiger Randsummenbedingungen nicht möglich.

Der zweite oben genannte Anwendungsfall liefert für zahlreiche Bewertungsverfahren die monetären Zeitwerte für die Monetarisierung von Reisezeiteinsparungen im Rahmen

der ökonomischen Gesamtbewertung von Verkehrsprojekten mittels NKA. Weitere Erläuterungen dazu finden sich in Kapitel 4.5.

### 3.2.2.3 Bewertung von Alternativen

Nahezu jedem Verkehrsnachfragemodell liegt eine Bewertung der Alternativen zugrunde. Bereits in Kapitel 3.1 wurde erwähnt, dass der Aufwand, der der Realisierung der Alternative entgegen wirkt, von zentraler Bedeutung ist. Der Aufwand setzt sich häufig aus mehreren Aufwandskomponenten, wie z. B. Fahrzeit, Zu- und Abgangszeit, Wartezeit und Fahrtkosten, die je nach Anwendungsfall und betrachtetem Verkehrsmittel berücksichtigt werden, zusammen.

Für die Verkehrsnachfrageberechnung ist die Bestimmung einer Gesamtbewertung je Alternative, unabhängig von der Anzahl zu berücksichtigender Aufwände, notwendig. Eine solche wertende Verknüpfung der verschiedenen Aufwände ist grundsätzlich durch die Bewertung der Einzelgrößen mit anschließender multiplikativer Verknüpfung

$$B = \prod_m f_m(a_m) \quad (3.42)$$

$a$  Aufwand  $m=1...M$  Laufindex Aufwandsgröße  
 $f$  Bewertungsfunktion(en)

oder mittels additiver Verknüpfung der Aufwände mit anschließender Bewertung

$$B = f_A \left( \sum_m f_I(a_m) \right) \quad (3.43)$$

möglich.

Beide Ansätze beinhalten Bewertungsfunktionen als zentrales Element. Die Bewertungsfunktion in (3.42) und die Funktion  $f_A$  in (3.43) stellen dabei einen funktionalen Zusammenhang zwischen einer (zusammengefassten) Aufwandsgröße – als maßgebendes Charakteristikum einer Alternative – und der Akzeptanz der Alternative durch den Verkehrsteilnehmer dar. Gleichung (3.43) beinhaltet eine zweistufige Bewertung in Form der inneren Bewertungsfunktionen  $f_I$  und der äußeren Bewertungsfunktion  $f_A$ . Funktion  $f_I$  entspricht dabei einer wertenden Wichtungsfunktion zur Zusammensetzung unterschiedlicher Aufwände.

Hinsichtlich der expliziten Betrachtung der äußeren Bewertungsfunktion ist zwischen den vorgestellten Modellansätzen zu unterscheiden. In verkehrsplanerischen Modellen stellt die funktionale Form der äußeren Bewertungsfunktion eine zentrale Modelleigenschaft dar, die auf die Modellierungsqualität großen Einfluss hat. Die Funktion ist nach der Fähigkeit der adäquaten Abbildung menschlichen Bewertungsverhaltens zu wählen. Demgegenüber erfolgt im Rahmen der Modelle der diskreten Wahl (in der ökonomischen

Fachliteratur) keine unmittelbare Betrachtung der äußeren Bewertungsfunktion, obgleich auch diese Modelle über dieses Element verfügen. In diesem Zusammenhang kann die Exponentialfunktion als äußere Bewertungsfunktion des Logit-Modells verstanden werden.

Die Alternativenbewertungen der in dieser Arbeit relevanten Modelle lassen sich alle mittels der beiden oben gezeigten Ansätze formulieren, wobei Gleichung (3.43) im Folgenden eine größere Bedeutung besitzt. Im nächsten Unterkapitel sollen spezielle (äußere) Bewertungsfunktionen betrachtet und verglichen werden. Daran anschließend erfolgt die Vorstellung mehrerer möglicher Ansätze zur Bildung eines zusammengesetzten Aufwands, d. h. der inneren Bewertungsfunktion.

### 3.2.2.3.1 Bewertungsfunktionen

Bewertungsfunktionen<sup>40</sup> besitzen die Aufgabe, die Akzeptanz der Verkehrsteilnehmer bezüglich eines zu überwindenden (zusammengefassten) Aufwandes möglichst realitätsnah abzubilden. Die Begründung der Auswahl spezieller Funktionstypen erfolgt in Abhängigkeit empirischer Beobachtungen des Verkehrsgeschehens und daraus abgeleiteter Annahmen über das Verhalten der Verkehrsteilnehmer.

Bedeutende Funktionstypen für die Bewertung der Aufwände sind Potenz-, Exponential- sowie EVA-1- und EVA-2-Funktionen. Die Potenzfunktion ergibt sich zum einen unmittelbar aus dem Gravitationsgesetz und ist die ursprüngliche Bewertungsfunktion des Gravitationsmodells der Verkehrsverteilung, zum anderen ist sie Bestandteil des Rubit-Modells (vgl. BRILON/DETTE [22]). Die theoretische Begründung des Gravitationsmodells durch den Ansatz der Entropiemaximierung von WILSON führt zur Exponentialfunktion, die ebenso Teil des Logit-Modells ist. Aufgrund teilweise unzureichender Eigenschaften zur Abbildung menschlichen Bewertungsverhaltens dieser Funktionstypen entwickelte LOHSE (vgl. [87], [88], [89]) die EVA-Funktionen, wobei spezielle psychologische und physiologische Erkenntnisse über die Wahrnehmung von Reizen beim Menschen Berücksichtigung fanden. Auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmer übertragen ergibt sich dabei, dass die Bewertung bzw. Wertschätzung einer Alternative mit zunehmendem absolutem Aufwand sinkt und Aufwandsunterschiede im Nahbereich eher unbedeutend sind und folglich nahezu gleich bewertet werden. Es gibt darüber hinaus noch zahlreiche weitere Ansätze und Kombinationen verschiedener Funktionen (siehe z. B. LOHSE ET AL. [92], WERMUTH in [135] oder ORTÚZAR/WILLUMSEN [115]). Von besonderer Bedeutung sind jedoch die Exponential- und die EVA-2-Funktion<sup>41</sup>, die nachfolgend genauer betrachtet und verglichen werden.

---

<sup>40</sup> Unter Bewertungsfunktion wird in diesem Kapitel sowohl die Bewertungsfunktion in (3.42) als auch die äußere Bewertungsfunktion in (3.43) verstanden.

<sup>41</sup> Die EVA-2-Funktion ist eine Weiterentwicklung der EVA-1-Funktion.

Die monoton fallende (negative) exponentielle Bewertungsfunktion lautet:

$$f_A(a) = e^{-\beta \cdot a} \quad (3.44)$$

$\beta$  Parameter

und die ebenfalls monoton fallende EVA-2-Bewertungsfunktion ist:

$$f_A(a) = \left( 1 + \left( \frac{a}{C} \right)^\beta \right)^{-\alpha} \quad (3.45)$$

$\alpha, \beta$  Exponenten (deren Produkt bestimmt das asymptotische Verhalten für große Aufwandswerte)

$C$  Skalenparameter für die Aufwandswerte (es gilt:  $B(C)=1/2^\alpha$ )

Die grafische Gegenüberstellung beider Funktionen findet sich in Abbildung 3-5. Der Unterschied beider Funktionsverläufe wird im Besonderen im Nahbereich deutlich. Hierbei tendiert der Anstieg der EVA-2-Funktion gegen den Wert Null, woraus eine Halbglockenkurve entsteht. Dies spiegelt das Bewertungsverhalten der Verkehrsteilnehmer deutlich besser wider als der im Nahbereich stark abfallende Verlauf der exponentiellen Bewertungsfunktion.

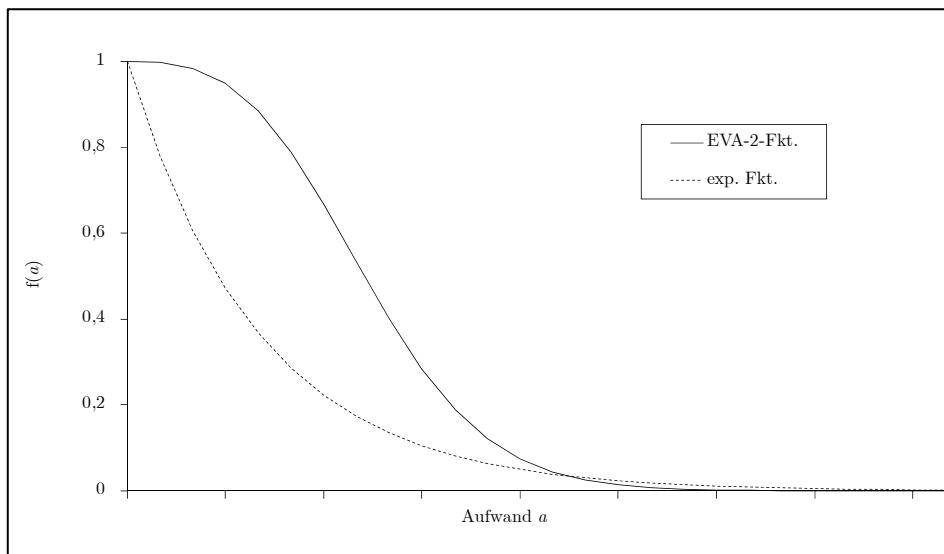


Abbildung 3-5: Vergleich der exponentiellen und der EVA-2-Bewertungsfunktion

Ein weiterer interessanter Aspekt ergibt sich bei der Betrachtung der Elastizitäten der Funktionen. Die Elastizität kann definiert werden als (vgl. z. B. LUH/STADTMÜLLER [94] S. 126):

$$\varepsilon(a) = \frac{\frac{\partial f_A(a)}{\partial a}}{f_A(a)} \cdot a \quad (3.46)$$

und entspricht einer relativen Änderung der Funktion  $f_A$ , wenn eine relative Änderung von  $a$  erfolgt. Sie gibt damit die „Empfindlichkeit“ der Verkehrsteilnehmer gegenüber Aufwandsänderungen an. Für die exponentielle Bewertungsfunktion lautet sie:

$$\varepsilon(a) = -\beta \cdot a, \quad (3.47)$$

für die EVA-2-Bewertungsfunktion:

$$\varepsilon(a) = -\alpha \cdot \beta \cdot \frac{a^\beta}{C^\beta + a^\beta}. \quad (3.48)$$

Beide Verläufe sind grafisch in Abbildung 3-6 gegenübergestellt. Die exponentielle Bewertungsfunktion weist einen linearen Verlauf der Elastizität auf. Hieraus resultiert, dass beispielsweise zwei Minuten Gehzeit von einem Fußgänger deutlich schlechter bewertet werden als eine Minute, was jedoch gerade im Nahbereich das Verhalten der Verkehrsteilnehmer nicht realistisch abbildet. Dieser Tatsache wird hingegen die EVA-2-Bewertungsfunktion gerecht, weshalb im Nahbereich eine nahezu unelastische Reaktion modelliert und eine Absolutschwelle implizit abgebildet wird. Diesem Anfangsbereich schließt sich der mittlere Abschnitt an, der ein wesentlich sensibleres Verhalten und damit eine stärkere Reaktion auf Aufwandsunterschiede unterstellt. Der letzte Bereich weist einen konstanten Elastizitätsverlauf auf. Hierdurch wird berücksichtigt, dass bei hohen Aufwänden die Verkehrsteilnehmer eine relativ konstante Sensibilität gegenüber Aufwandsänderungen besitzen.

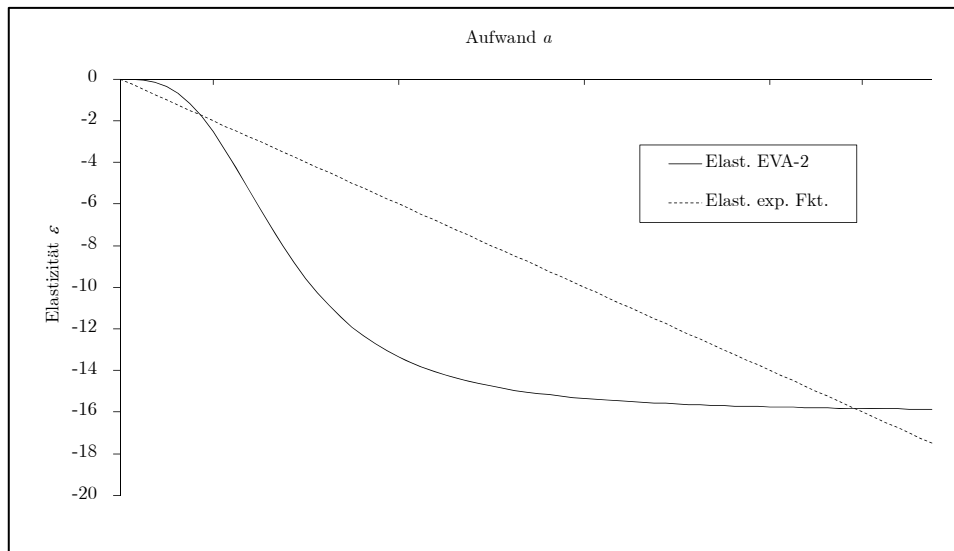


Abbildung 3-6: Vergleich der Elastizitäten der exponentiellen und der EVA-2-Bewertungsfunktion

Durch die hohe Flexibilität der EVA-2-Funktion ist die Anpassung an verschiedene „Bewertungssituationen“ möglich. Sie eignet sich daher sowohl für die Ziel- als auch für die Verkehrsmittelwahl und folglich auch für die Simultanberechnung (vgl. LOHSE [89] S. 30).



Die Vorteile der EVA-2-Bewertungsfunktion gegenüber der exponentiellen Bewertungsfunktion (und auch den meisten anderen) liegen in der besseren Anpassung an das menschliche Verhalten über den **gesamten** Aufwandsbereich. Im Zusammenhang mit der simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahl stellt sich diese Eigenschaft als großer Vorteil dar. Hierbei besteht die Problematik, dass die Bewertungsfunktion (neben den Randsummenbedingungen) z. T. eine sehr große Anzahl an Alternativen in Form von Quelle-Ziel-Beziehungen für alle Verkehrsmittel bewerten bzw. „erklären“ muss. In großen Planungsräumen mit kleinräumiger Verkehrsbezirkseinteilung müssen somit Ortsveränderungen in einem großen Aufwandsbereich abgebildet werden. Bewertungsfunktionen mit nur einem Parameter, die i. d. R. die Bewertung im mittleren Aufwandsbereich hinreichend abbilden, sind hierfür weniger gut geeignet (vgl. SCHILLER [124] S. 69).

Die hohe Anpassungsfähigkeit der EVA-2-Funktion wird durch ihre drei Parameter erreicht. Bestimmt werden die Parameter durch die Modellkalibrierung, deren Ziel die möglichst adäquate Abbildung empirisch erhobener Daten, wie z. B. mittlere Reisezeiten und Reiseweiten und Querschnittverkehrsstärken, im Modell ist. Die Kalibrierung ist durch den Verkehrsplaner iterativ durchzuführen und ist in Abhängigkeit der Genauigkeitsanforderungen und der Anzahl der Parameter sehr aufwandsintensiv. Ein spezieller mathematischer Kalibrierungsalgorithmus zur Reduzierung des Kalibrierungsaufwandes stellt das BFGS-Verfahren (vgl. z. B. LOHSE ET AL. [92] S. 140 ff.) dar.

### 3.2.2.3.2 Verknüpfung von Aufwänden

Bei Anwendung des Ansatzes (3.43) zur Berücksichtigung mehrerer Aufwände ist vor der gemeinsamen (äußeren) Bewertung zunächst eine sinnvolle Aggregation der Einzelgrößen mittels einer inneren Bewertungsfunktion notwendig. Eine solche Funktion wurde bereits in Kapitel 3.2.2.2 in allgemeiner Weise als deterministische Nutzenfunktion diskreter Wahlmodelle vorgestellt. Es gilt (vgl. (3.38)):

$$f_I(\mathbf{X}_{bn}) = \bar{u}_{bn} = \sum_l \beta_{nl} \cdot X_{bnl} \quad \text{mit } X_{bnl} = h_l(\mathbf{C}_{bn}, \mathbf{S}_n)$$

mit  $X_{bnl}$  als  $l$ -te unabhängige erklärende Variable der Nutzenfunktion und  $h_l$  als Transformationsfunktion.

Neben tatsächlichen positiven Nutzen der Alternativen, wie z. B. Zielpotentialen, stellen die Aufwände zur Realisierung der Alternative die quantifizierbaren Charakteristika dar. Erfolgt eine formale Unterteilung in erklärende Variablen der Charakteristika der Aufwände und weitere Charakteristika, dann gilt:

$$\bar{u}_{bn} = \sum_m \beta_{nm} \cdot X_{bnm} + \sum_{l \neq m} \beta_{nl} \cdot X_{bnl} \quad (3.49)$$

$m=1 \dots M$       Laufindex Aufwandsgröße

Die Aufwände stellen einen negativen Nutzen dar, da sie der Realisierung der Alternativen entgegenwirken. Hieraus resultiert, dass die entsprechenden Parameter  $\beta$  ein negatives Vorzeichen aufweisen. Die **positive** additive gewichtete Verknüpfung unterschiedlicher Aufwände wird im Folgenden als **Generalisierter Aufwand**  $ga$  bezeichnet. Die deterministische Nutzenfunktion mit Generalisiertem Aufwand lautet somit:

$$\bar{u}_{bn} = -ga_{bn} + \sum_{l \neq m} \beta_{nl} \cdot X_{bnl}. \quad (3.50)$$

Unter Vernachlässigung alternativenspezifischer Konstanten entspricht folglich die deterministische Nutzenfunktion dem negativen Generalisierten Aufwand.

Der Generalisierte Aufwand repräsentiert hier das zentrale Element der inneren Bewertungsfunktion, für die unterschiedliche funktionale Formen existieren. Grundsätzlich lassen sich die Ansätze nach linearen und nichtlinearen additiven Ansätzen unterteilen.

#### Linearer additiver Ansatz

Ausgehend von den Gleichungen (3.49) und (3.50) ergibt sich die lineare additive Verknüpfung von Aufwänden durch eine Eins-zu-Eins-Beziehung zwischen Aufwänden und erklärenden Variablen zu (unter Vernachlässigung der Indizes  $b$  und  $n$ ):

$$ga = \sum_m \beta_m \cdot a_m \quad \text{mit } X_m = a_m. \quad (3.51)$$

Die Parameter  $\beta$  dienen der Gewichtung der einzelnen Aufwandskomponenten entsprechend dem Empfinden der Verkehrsteilnehmer. Beispielsweise wirken 30 min ÖPV-Zugangszeit unangenehmer als 30 min Beförderungszeit im ÖPV, was durch ein höheres Gewicht der ÖPV-Zugangszeit ausgedrückt wird.

In der Literatur wird der lineare Ansatz häufig als **Generalisierte Kosten** bezeichnet. Dieser Begriff wurde im Verkehrsbereich 1961 von TANNER in [139] eingeführt (zitiert nach GOODWIN [60] S. 2). Zu beachten ist jedoch, dass im Unterschied zur allgemeineren Generalisierten Aufwandsfunktion eine Generalisierte Kostenfunktion einen **monetären** Funktionswert liefert. Daraus resultiert die Notwendigkeit eines Wertes der Zeit, der der Monetarisierung der Zeitkomponenten dient. Die einfachste Form der Generalisierten Kostenfunktion besteht somit aus den Komponenten Geld und Reisezeit sowie dem Wert der Reisezeit (vgl. GOODWIN [60] S. 2).

**Nichtlinearer additiver Ansatz**

Der beschriebene lineare Ansatz kann durch den nichtlinearen additiven Ansatz verallgemeinert werden. Für den Ansatz des Generalisierten Aufwandes gilt (vgl. WINKLER [160] S. 107 ff.):

$$ga = \sum_m \beta_m \cdot H(a_m) \cdot a_m. \quad (3.52)$$

$H$  allgemeine Transformationsfunktion

Der lineare Ansatz ergibt sich unter der Annahme  $H(a_m) = 1$ . Entgegen dem allgemeinen Ansatz (3.52) erfolgt in der Literatur i. d. R. eine Kopplung der Transformationsfunktion  $H$  mit dem Parameter oder der Aufwandsgröße, die jedoch problemlos durch (3.52) darstellbar sind.

Die **Transformation der Aufwände** wird in Anlehnung an (3.38) mit  $h(a)$  bezeichnet. Der entsprechende Ansatz des Generalisierten Aufwandes lautet demnach:

$$ga = \sum_m \beta_m \cdot h(a_m). \quad (3.53)$$

Durch die Funktion  $h$  ist es u. a. möglich, die Aufwandswerte in Abhängigkeit von sich selbst zu höheren oder niedrigeren Werten zu transformieren. Häufig angewandte Funktionen sind die Potenz- und Logarithmusfunktion. Flexiblere Formen werden mittels der **Box-Cox-** und **Box-Tukey-Transformation** erzielt. Der allgemeinere Ansatz ist dabei die Box-Tukey-Transformation, die die Box-Cox-Transformation als Sonderfall enthält (vgl. BEN-AKIVA/LERMAN [14] S. 179). Formal gilt:

$$h(a) = \begin{cases} \ln(a + \alpha) & \text{für } \lambda = 0 \\ \left[ (a + \alpha)^\lambda - 1 \right] / \lambda & \text{für } \lambda > 0 \end{cases}. \quad (3.54)$$

$\alpha, \lambda$  Parameter

Die Box-Cox-Transformation ergibt sich für  $\alpha = 0$ . Der Parameter  $\alpha$  dient der Verschiebung des Graphen gegenüber der Abszisse. Im Allgemeinen wird  $\alpha = 1$  verwendet, wodurch der Graph durch den Koordinatenursprung verläuft. In Abbildung 3-7 sind Box-Tukey-Transformationen mit verschiedenen  $\lambda$ -Werten und  $\alpha = 1$  dargestellt. Die Darstellungen zeigen, dass für  $\lambda > 1$  die transformierten Werte überproportional, für  $\lambda = 1$  proportional und für  $\lambda < 1$  unterproportional gegenüber dem originären Aufwandswert sind. Der Vorteil der höheren Flexibilität und Anpassungsfähigkeit wird durch den zusätzlichen Parameter  $\lambda$  erzielt.

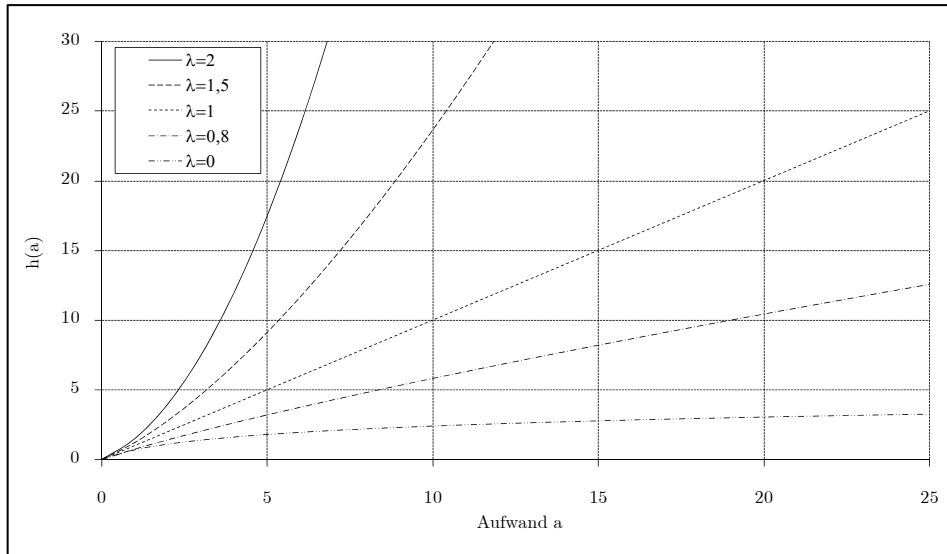


Abbildung 3-7: Box-Tukey-Transformationen der Aufwände

Eine noch variabelere Transformation der Aufwände ist mittels der von LOHSE in [89] entwickelten EVA-2-Transformation möglich. Diese lautet für  $a \geq 0$ :

$$h(a) = a \cdot \left( 1 + \left( \frac{a}{C} \right)^\beta \right)^\alpha \quad \text{mit} \begin{cases} \alpha > 0 & \text{bei Überproportionalität} \\ \alpha = 0 & \text{bei Proportionalität} \\ \alpha < 0 & \text{bei Unterproportionalität} \end{cases} \quad (3.55)$$

$\alpha, \beta, C$  Parameter

In Abbildung 3-8 sind einige **EVA-2-Transformationen** der Aufwandswerte dargestellt. Neben den angegebenen verschiedenen  $\alpha$ -Parametern, gelten für alle abgebildeten Transformationskurven die Parameter  $\beta = 2$  und  $C = 30$ .

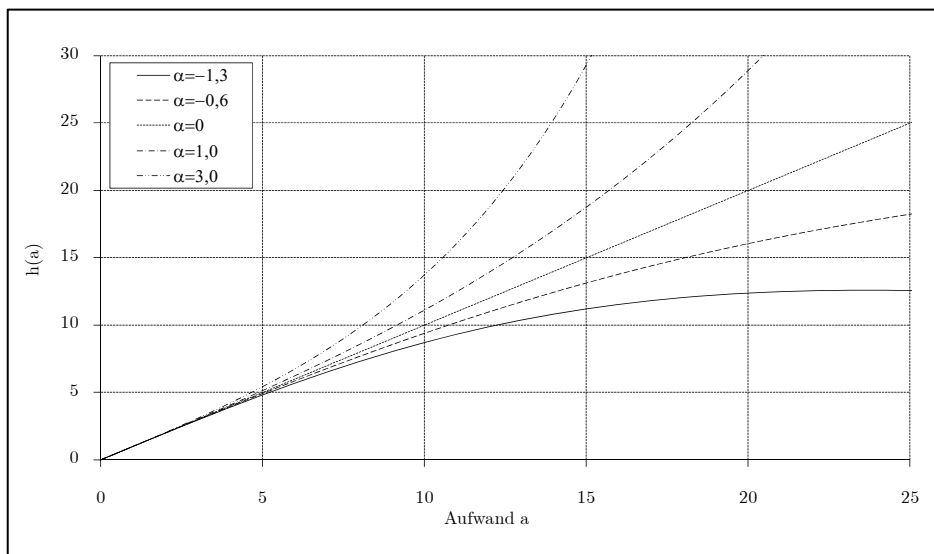


Abbildung 3-8: EVA-2-Transformationen der Aufwände

Neben der Transformation der Aufwände existieren in der verkehrsplanerischen Literatur ebenfalls Ansätze, die eine nichtlineare **Transformation der Parameter** realisieren. Hierbei gehen die Aufwandsgrößen stets originär, d. h. untransformiert, in die Bewertung ein. Die Gewichtung erfolgt entsprechend der Präferenzen der Verkehrsteilnehmer nichtlinear in Abhängigkeit der Aufwände. Der Ansatz zur Bestimmung des Generalisierten Aufwandes lautet:

$$ga = \sum_m \beta(a_m) \cdot a_m. \quad (3.56)$$

Ausführliche Untersuchungen und die Entwicklung eines Ansatzes für ein Verkehrsmittelwahlmodell mit nichtlinearen Parametern führte WALTHER in [152] durch. Hierin wurden für alle relevanten Zeitaufwände entsprechende nichtlineare „Zeitbewertungsfunktionen“, die den nichtlinearen Parametern  $\beta$  entsprechen, entwickelt. Ausgangspunkt für die Entwicklung der Zeitbewertungsfunktionen waren psychologische Studien, die u. a. feststellten, dass ÖPV-Nutzer dem Begriff „Haltestelle“ überwiegend negativ gegenüber eingestellt sind. Dies wird mit einer assoziativen Verknüpfung des Begriffs „Haltestelle“ mit den negativen Begriffen „Warten“ und „Zeitverlust“ begründet. Die Fußwegzeit wird hingegen etwas positiver beurteilt, da damit eine (produktive) Aktivität verbunden ist (vgl. WALTHER [152] S. 9 f.). Als „Referenzaufwand“ dient die Fahrzeit im Fahrzeug, die keiner Transformation unterzogen wird. Der allgemeine Ansatz der Zeitbewertungsfunktion  $\beta$  kann geschrieben werden als:

$$\beta(a) = c + d \cdot e^{(f \cdot a)}. \quad (3.57)$$

$c, d, f$  Parameter

Ähnliche psychologische und verkehrsplanerische Überlegungen liegen dem Ansatz der nichtlinearen Parameter von LOHSE (vgl. [89] S. 36 ff.) zugrunde. Hierbei erfolgt die Definition der EVA-2-transformierten Parameter durch:

$$\beta(a) = KSK + KSV \cdot \left( 1 + \left( \frac{a}{C} \right)^\beta \right)^\alpha. \quad (3.58)$$

$KSK, KSV$  Parameter

Auch diese Transformation genügt – entsprechend der bereits vorgestellten EVA-2-Bewertungsfunktion – den Ansprüchen einer adäquaten Modellierung des Verkehrsverhaltens. Den Ansätzen von WALTHER und LOHSE ist gemein, dass die Parameter mit zunehmendem Aufwand steigen. In Abbildung 3-9 sind EVA-2-Transformationen der Parameter für verschiedene  $\alpha$ -Werte dargestellt. Für die weiteren Parameter gilt:  $KSK = 0$ ,  $KSV = 1$ ,  $\beta = 2$  und  $C = 30$ .

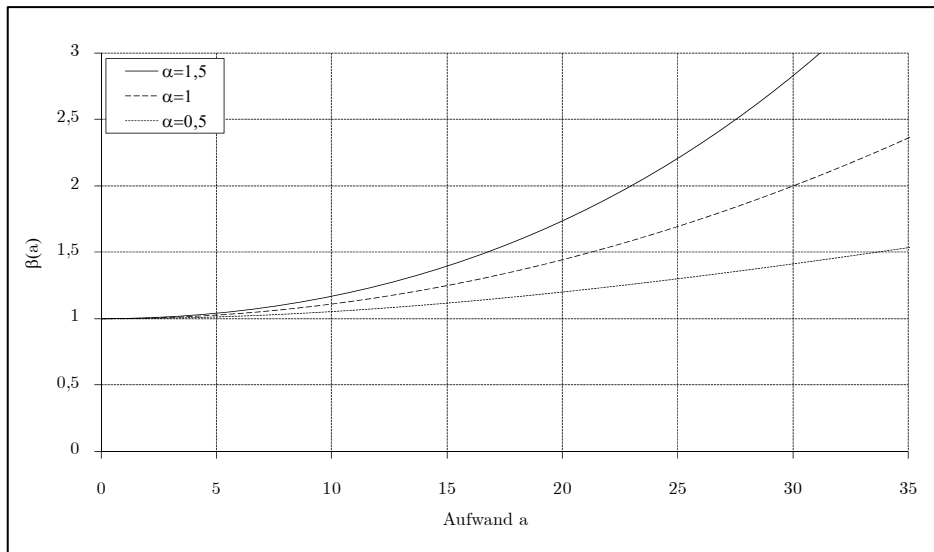


Abbildung 3-9: EVA-2-Transformationen der Parameter

Unabhängig von der Transformation stellt die Bestimmung der Parameter für die praktische Anwendung eine große Herausforderung dar. Dabei ist offensichtlich, dass mit steigender Anzahl zu bestimmender Parameter zwar die Anpassungsfähigkeit, jedoch auch der Aufwand zur Bestimmung der Parameter steigt. Enthalten die Ableitungen der Generalisierten Aufwandsfunktion nach den zu schätzenden  $\beta$ -Parametern selbst keine Parameter, so können Standard-Schätzalgorithmen wie die Maximum-Likelihood-Schätzung herangezogen werden (vgl. MAIER/WEISS [100] S. 126 f.). Hängen die Ableitungen jedoch wiederum selbst von Parametern ab, müssen hierfür komplexere Methoden wie beispielsweise eine bedingte Maximum-Likelihood-Schätzung oder das BFGS-Verfahren Anwendung finden.

### 3.2.3 Routensuch- und Routenwahlverfahren

Die Routensuch- und Routenwahlverfahren sind die wesentlichen Bestandteile der Umlegung. Routensuchverfahren ermitteln hierbei die möglichen Wege bzw. Routen  $r$  zwischen allen Verkehrsbezirken für jedes Verkehrsmittel. Grundlage hierfür stellt das integrierte Verkehrsnetzmodell dar (vgl. Kapitel 3.1.1). Darauf aufbauend bestimmen die Routenwahlmodelle – entsprechend dem Wahlverhalten der Verkehrsteilnehmer – die Aufteilung der berechneten Verkehrsströme  $v_{ijk}$  auf die sinnvollen alternativen Routen  $r$  des Verkehrsnetzes, woraus die Routenströme  $v_{ijk_r}$  resultieren. Aus diesen Routenströmen kann die Verkehrsstärke  $M$  eines Netzelements  $s$  des Verkehrsmittels  $k$  bestimmt werden durch:

$$M_{ks} = \sum_i \sum_j \sum_r v_{ijk_r} \cdot \delta_s \cdot BG_k \quad \delta_s = \begin{cases} 1 & \text{falls } s \in r \\ 0 & \text{falls } s \notin r \end{cases} \quad (3.59)$$

$BG$  Besetzungsgrad der Fahrzeuge

Routensuch- und Routenwahlverfahren stehen nicht unmittelbar im Mittelpunkt dieser Arbeit, weshalb diese Thematik hier nur kurz vorgestellt wird. Umfassende Ausführungen bezüglich dieser Verfahren finden sich beispielsweise in RAMMING [122], DUGGE [42] und VRTIC [149].

### 3.2.3.1 Routensuchverfahren

Routensuchverfahren lassen sich in die beiden Kategorien Bestwegverfahren und Mehrwegverfahren unterteilen (vgl. z. B. LOHSE [88] S. 285 ff.). **Bestwegverfahren** ermitteln dabei aus allen möglichen Routen jene, deren Summe der Aufwände über alle zu überwindenden Netzelemente am geringsten ist. Durchzuführen ist das Verfahren für jede Quelle-Ziel-Relation. Bedeutende mathematische Algorithmen, die diesen Verfahren zugrunde liegen sind z. B. der MOOREsche Algorithmus und das DIJKSTRA-Verfahren.

**Mehrwegverfahren** bestimmen aus der Gesamtheit aller möglichen Routen mehrere alternative Wege, deren Unterscheidungsgrad sehr variabel sein kann. Aus der Menge der gefundenen Wege werden die sinnvollen Routen mittels bestimmter Kriterien, wie z. B. Umweg- und Ähnlichkeitsfaktoren, ausgewählt. Aufgrund der unterschiedlichen Routen ergeben sich zwischen einer Quelle und einem Ziel differierende Aufwände. Für die Ziel- und Verkehrsmittelwahl wird jedoch ein Aufwand für jede Quelle-Ziel-Relation je Verkehrsmittel benötigt. Dieser Einzelwert kann entweder ausschließlich durch die jeweils günstigste Route oder als ein über die Verkehrsanteile aller genutzten Routen gewichteter Mittelwert definiert werden.

### 3.2.3.2 Routenwahlmodelle

Routenwahl- bzw. Verkehrsstromaufteilungsmodelle dienen dem Zweck, den berechneten Verkehrsstrom  $v_{ijk}$  auf die gefundenen Routen sinnvoll aufzuteilen. Hierfür wird in der Literatur häufig in deterministische und stochastische Modellansätze unterschieden. Aufgrund der inkonsistenten Verwendung der Begrifflichkeiten soll hier – SCHILLER in [124] (S. 106 f.) folgend – zwischen deterministischem und stochastischem Modell und dem deterministischen und stochastischen (mathematischen) Algorithmus unterschieden werden.

Der **deterministische Modellansatz** ist gekennzeichnet durch die Annahme, dass alle Verkehrsteilnehmer bezüglich der Routenwahl die vollständige Information über das Verkehrsgeschehen besitzen und alle für die Routenwahl relevanten Routeneigenschaften im Modell Berücksichtigung finden. Dies ist beispielsweise bei der Verwendung der WARDROPschen Axiome der Fall.

**Stochastische Modelle** basieren wie die stochastischen diskreten Wahlmodelle auf der Annahme der unvollständigen Information des Modellierers und des Verkehrsteilnehmers.

Daher werden auch im Rahmen der Routenwahl das Logit-Modell und das universale Wahlmodell in unterschiedlichsten Ausprägungen angewendet.

Von einem **deterministischen Algorithmus** kann gesprochen werden, wenn dessen Nachrechnung mit den gleichen Eingangsgrößen möglich ist und keine Zufallszahlen gezogen werden (formal analytisch). Erfolgt hingegen die Ziehung von Zufallszahlen, so handelt es sich um einen **stochastischen Algorithmus** (zufällige Simulation von Ereignissen).

Derzeit finden sowohl deterministische als auch stochastische Modelle Anwendung, wobei der stochastische Ansatz i. d. R. wesentlich realistischer ist. Hierbei besitzt die bereits in Kapitel 3.2.2.2 vorgestellte IIA-Eigenschaft eine besondere Bedeutung. Bei Missachtung signifikanter Korrelationen zwischen den Alternativen können Fehler auftreten. Aufgrund der Vielzahl von Alternativen bei der Routenwahl ist diese Problematik hier von großer Bedeutung. Daher gibt es zahlreiche spezielle Modellansätze, die mittels Ähnlichkeitsmaßen gemeinsame Routenabschnitte beachten und hierdurch die Auswahlwahrscheinlichkeiten der Routen beeinflussen (siehe hierzu z. B. CASCETTA [26]).

### 3.3 Gleichgewicht zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage

#### 3.3.1 Der Verkehrsmarkt

Das in Kapitel 2.3 kurz erläuterte ökonomische Modell des freien Marktes entspricht dem sogenannten „vollkommenen Markt“ und stellt ein theoretisches Modell dar. Dieses kann nicht ohne Weiteres auf den Verkehrsmarkt übertragen werden, da der Verkehr teilweise Eigenschaften eines öffentlichen Gutes aufweist und hierdurch die Funktionsmechanismen des Marktes gestört werden. Öffentliche Güter sind zum einen gekennzeichnet durch das Fehlen des Marktausschlussprinzips, d. h. zahlungsunwillige Nachfrager kommen dennoch zum Zuge. Zum anderen weisen sie das Nichtrivalitätsaxiom auf, nach dem der Nutzen eines Gutes nicht durch die gleichzeitige Nutzung anderer Konsumenten beeinträchtigt wird.

Die Verkehrsangebotsstruktur ist heterogen, da einerseits die Verkehrsinfrastruktur durch den Staat bereitgestellt wird und allen zugänglich ist und andererseits der Verkehr durch private und öffentliche Anbieter erbracht wird.<sup>42</sup> Für die Verkehrsinfrastruktur besitzt das Fehlen des Marktausschlussprinzips Gültigkeit. Demgegenüber trifft es bei der Realisierung des Verkehrs – zumindest für MIV und ÖPV – nicht zu. Für das

---

<sup>42</sup> Die Verkehrsinfrastruktur und der ÖPV sind durch hohe Fixkosten und ausgeprägte Kostendegression gekennzeichnet, was zu Größenvorteilen bei der Produktion („economies of scale“) führt. Da dies jedoch nicht zur Eigenwirtschaftlichkeit führt, obliegen diese Bereiche i. Allg. der öffentlichen Hand.



Nichtrivalitätsaxiom gilt, dass dieses ebenfalls bei MIV und ÖPV unter Umständen verletzt werden kann. Gerade beim MIV ergeben sich bei hoher Auslastung der Straßen (hoher Sättigungsgrad, vgl. Kapitel 3.1.2) zum Teil starke Wechselwirkungen und die Verkehrsteilnehmer stehen in Konkurrenz. Die Verkehrsnachfrage setzt sich – wie auf dem freien Markt – aus einer Vielzahl von privaten Individuen zusammen, deren Nachfrage auf den zu überwindenden Aufwand wirkt. Der Verkehr ist folglich kein klassisches öffentliches Gut sondern vielmehr eine Mischform (vgl. HELMS [66] S. 24).

Die dargelegten Überlegungen sind vor allem im Zusammenhang mit der Preisbildung im Verkehrssektor und verkehrspolitischen Fragestellungen von Bedeutung (siehe z. B. ABERLE [2]). Dabei spielen z. B. externe Effekte, deren mögliche Internalisierung und auch volkswirtschaftliche Analysen hinsichtlich der Einführung nutzungsabhängiger Straßengebühren eine bedeutende Rolle. Diese Themen sind nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Vielmehr stehen die Wechselwirkungen von Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage, so wie sie tatsächlich auftreten und modelliert werden, im Fokus. Hierbei sind die Analogien zum freien Markt von Interesse, durch die der (modellierte) Verkehrsmarkt hinsichtlich des Gleichgewichts zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage untersucht werden kann.

Der Begriff „Gleichgewicht“ drückt aus, dass ein System ohne äußere Einwirkung in seinem Zustand verharrt. Der Gleichgewichtszustand wird durch die Anpassung von Angebot und Nachfrage erreicht und lässt sich als Schnittpunkt beider Funktionen bestimmen. Hierbei spielt der Aufwand bzw. der Generalisierte Aufwand eine bedeutende Rolle. Die Verkehrsnachfrage wird darüber hinaus von Quell-, Ziel- und Verkehrsmittelpotentialen und Randsummenbedingungen determiniert (siehe Kapitel 3.2). Zur Vereinfachung des Sachverhaltes wird im Folgenden jedoch die Verkehrsnachfrage nur in Abhängigkeit eines Aufwands betrachtet. Unter diesen Umständen ergibt sich das Gleichgewicht formal:

$$v(a) = y(a). \quad (3.60)$$

$a$  Aufwand  $v$  Verkehrsnachfragefunktion  
 $y$  Verkehrsangebotsfunktion

Für die Bestimmung des Gleichgewichts ist es jedoch von Vorteil, die inverse Nachfragefunktion und die inverse Angebotsfunktion zu bestimmen und gleichzusetzen (vgl. VARIAN [148] S. 296 f.). Die inversen Funktionen ermitteln dabei den Aufwand in Abhängigkeit der Verkehrsnachfrage, wobei dieser dem Durchschnittsaufwand jedes Verkehrsteilnehmers entspricht. Allgemein gilt für das Gleichgewicht:

$$a_v(v) = a_y(v). \quad (3.61)$$

$a_v(v)$  inverse Verkehrsnachfragefunktion  $a_y(v)$  inverse Verkehrsangebotsfunktion

Hierdurch liefern beide Funktionen den Aufwand als Funktionswert, wodurch das Gleichgewicht als Optimierungsproblem formuliert werden kann. Die inverse Nachfragefunktion entspricht dabei der Zahlungsbereitschaftsfunktion, d. h. sie gibt jene Werte an, die die Verkehrsteilnehmer für die Realisierung der Ortsveränderung zu zahlen bereit sind. Im Rahmen der Verkehrsangebotsmodellierung wurden CR-Funktionen betrachtet, die der inversen Angebotsfunktion eines Netzabschnitts entsprechen. Der Weg einer nachgefragten Alternative besteht jedoch i. d. R. nicht nur aus einem Netzabschnitt. Vielmehr setzt sich der Weg aus vielen Netzelementen zusammen, die wiederum Bestandteil anderer Wege sein können. Im Rahmen der Verkehrsmodellierung kommen daher zur Gleichgewichtsbestimmung spezielle Algorithmen zur Anwendung (siehe Kapitel 3.3.2). In Abbildung 3-10 ist eine Gleichgewichtssituation dargestellt, in der der Gleichgewichtspunkt bei  $v^*$ ;  $a^*$  liegt.

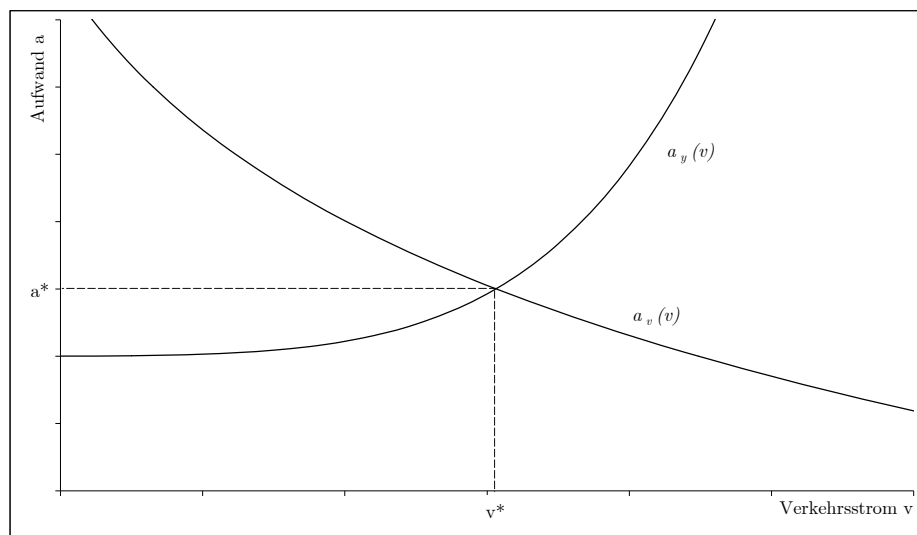


Abbildung 3-10: Gleichgewicht von Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage

Ändern sich die Präferenzen der Verkehrsteilnehmer, so resultiert daraus eine Änderung der Verkehrsnachfragekurve. Investitionen im Verkehrswesen oder Beeinflussungsmaßnahmen des Verkehrs führen zu einem anderen Verlauf der Angebotskurve. Beide Fälle entsprechen einer Störung des stabilen Gleichgewichtszustandes und führen zu Anpassungsvorgängen, die in einem neuen Gleichgewicht enden. Besondere Relevanz besitzt der Fall der Bestimmung des neuen Gleichgewichts infolge einer Investitionsmaßnahme, da hierdurch die verkehrlichen Veränderungen bestimmt werden können, die großen Einfluss auf das Bewertungsergebnis der NKA haben.

Die verschiedenen Alternativen in der Verkehrsnachfragemodellierung, wie Quelle-Ziel-Relationen, Verkehrsmittel oder Routen stehen in einem substitutiven Verhältnis zueinander, weshalb sich die Gleichgewichte der Alternativen nicht unabhängig voneinander ergeben. Die modelltheoretische Umsetzung dieser Wechselwirkungen wird in den folgenden Kapiteln kurz erläutert.

### 3.3.2 Nutzergleichgewicht

In der Verkehrsmodellierung kommt der Gleichgewichtsberechnung – im Besonderen bei der Routenwahl, aber nicht nur dort – eine große Bedeutung zu. Hierbei steht den Verkehrsteilnehmern für ihre Verbindung zwischen Quelle und Ziel eine Vielzahl möglicher Routen zur Verfügung. Die grundlegenden Ansätze unterstellen auch hier nutzenmaximierendes Verhalten der Verkehrsteilnehmer (Nutzer). Dementsprechend wählen sie jene Route, deren Generalisierter Aufwand minimal bzw. deren Nutzen maximal ist. In Abhängigkeit der Annahme der vorhandenen Information der Verkehrsteilnehmer über die alternativen Routen und die vorhandenen Informationen des Modellierers über das Entscheidungsverhalten der Verkehrsteilnehmer wird grundsätzlich in ein deterministisches und ein stochastisches Nutzergleichgewicht unterschieden.

#### Deterministisches Nutzergleichgewicht

Es handelt sich hier um einen Ansatz, der auf der Grundlage vollständiger Information der Verkehrsteilnehmer und des Modellierers basiert und eine deterministische Entscheidungsregel besitzt. Das bekannteste Modellierungsaxiom ist das 1. WARDROPsche Prinzip (vgl. WARDROP [153]). Dabei erfolgt die Aufteilung der Verkehrsströme auf die Routen so, dass sich auf allen benutzten Routen die gleichen Aufwände einstellen. Alle anderen nicht genutzten Routen weisen den gleichen oder einen höheren Generalisierten Aufwand auf. Die entsprechende Zielfunktion – mit Bezug zu Gleichung (3.59) – lautet (vgl. z. B. ORTÚZAR/WILLUMSEN [115] S. 356 f.):

$$\min z(v_{ijr}) = \sum_s \int_0^{M_s} g a_s(M_s) \cdot dM \quad (3.62)$$

unter den Nebenbedingungen:

$$\sum_r v_{ijr} = v_{ij} \quad \text{mit} \quad v_{ij} \geq 0.$$

Der Berechnungsansatz kann mittels verschiedener Verfahren iterativ gelöst werden. Im Besonderen sind der MSA- (vgl. SMOCK [132]) und der FRANK-WOLFE-Algorithmus (vgl. FRANK/WOLFE [55]) zu nennen (siehe z. B. auch ORTÚZAR/WILLUMSEN [115] S. 342 f. und 361 f.).

#### Stochastisches Nutzergleichgewicht

Der Nachteil des deterministischen Nutzergleichgewichts liegt in der Annahme der vollständigen Information der Verkehrsteilnehmer und des Modellierers, was nicht der Realität entspricht. Dieser Nachteil kann durch die Modellierung eines stochastischen Nutzergleichgewichts aufgehoben werden. Hierfür werden i. d. R. diskrete Wahlmodelle zur Routenwahl herangezogen. Das Gleichgewicht ist auch hier erreicht, wenn kein Verkehrsteilnehmer durch einen Routenwechsel seinen (geschätzten) Generalisierten Aufwand verringern kann.

Das stochastische Nutzergleichgewicht lässt sich ebenfalls als Optimierungsproblem formulieren. Eine mögliche Zielfunktion lautet (vgl. SHEFFI/POWELL [128] S. 193):

$$\min z(v_{ijr}) = \sum_s M_s \cdot ga_s(M_s) - \sum_i \sum_j v_{ij} \cdot E(ga_{ij}(\mathbf{M})) - \sum_s \int_0^{M_s} ga_s(M_s) \cdot dM. \quad (3.63)$$

$E(ga_{ij})$  erwarteter oder wahrgenommener Generalisierter Aufwand  
 $\mathbf{M}$  Vektor der Verkehrsstärken aller Strecken  $s$

Neben der Modellierung des Gleichgewichts bei der Routenwahl ist dies ebenfalls für die Ziel- und Verkehrsmittelwahl möglich und nötig (siehe Kapitel 3.3.4).

### 3.3.3 Systemoptimum

Das Nutzergleichgewicht basiert auf dem individualistischen Paradigma, wonach jeder Einzelne souverän handelt. Unter den gegebenen Umständen wird der Aufwand jedes Einzelnen minimal. Dies führt jedoch nicht zwingend zum minimal möglichen Gesamtaufwand aller Verkehrsteilnehmer. Dieser Fall wird als **Systemoptimum** (2. WARDROPsches Prinzip) bezeichnet. Zur Bestimmung dieses Optimums erfolgt – ähnlich der Berechnung des Nutzergleichgewichts – die Aufstellung einer Zielfunktion, wobei hierfür oftmals (auch andere Funktionen sind je nach Optimierungsziel möglich) die Minimierung des Produkts aus Generalisiertem Streckenaufwand und der Verkehrsstärke der Strecke verwendet wird. Der entsprechende Ansatz lautet (vgl. ORTÚZAR/WILLUMSEN [115] S. 362):

$$\min z(v_{ijr}) = \sum_s GA_s(M_s) = \sum_s M_s \cdot ga_s(M_s) \quad (3.64)$$

$GA_s$  Generalisierter Gesamtaufwand auf der Strecke  $s$   
 $M_s$  Verkehrsstärke auf Strecke  $s$

unter den Nebenbedingungen:

$$\sum_r v_{ijr} = v_{ij} \quad \text{mit} \quad v_{ij} \geq 0.$$

Zur Erreichung des Systemoptimums ist eine übergeordnete Steuerung der Verkehrsteilnehmer notwendig, was jedoch kaum realisierbar ist. Grundsätzlich möglich ist hingegen die Einführung einer streckenabhängigen Nutzungsabgabe für Fahrzeuge, so dass das Nutzergleichgewicht in Richtung des Systemoptimums – exklusive der Reisekosten – verschoben wird (vgl. LINDSEY/VERHOEF in [68] S. 367).<sup>43</sup>

---

<sup>43</sup> Für weitere Informationen bezüglich der Thematik der Modellierung von streckenabhängigen Nutzungsabgaben siehe z. B. BOBINGER [20], HELMS [66], TEUBEL [140].

### 3.3.4 Gleichgewichtsebenen

In Kapitel 3.3.2 wurden gezeigt, dass das stochastische Nutzergleichgewicht die Realität besser widerspiegelt als das deterministische Nutzergleichgewicht. Da die Verkehrsnachfrage nicht nur bei der Routenwahl aufwandsabhängig ist, muss ebenfalls auf der Ebene der Ziel- und Verkehrsmittelwahl ein stochastisches Nutzergleichgewicht mit dem Verkehrsangebot für eine adäquate Verkehrsmodellierung realisiert werden. Es sind somit mehrere Rückkopplungen zwischen Angebot und Nachfrage notwendig, die in Abbildung 3-11 schematisch dargestellt sind.

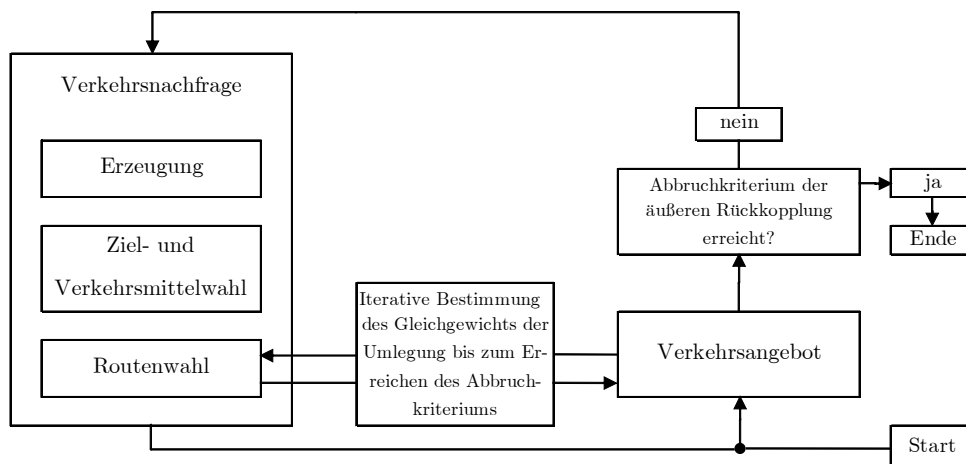


Abbildung 3-11: Schematischer Rückkopplungsprozess zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage  
(Quelle: SCHILLER [124] S. 113)

Die Rückkopplung mit der Ziel- und Verkehrsmittelwahl (äußere Rückkopplung) dient der Wahl alternativer Ziele und/oder Verkehrsmittel in Abhängigkeit der neuen Aufwände, die sich für die kapazitätsabhängigen Verkehrsmittel ergeben. Infolge der Einhaltung der Randsummenbedingungen und der veränderten relativen Vorteilhaftigkeit der Verkehrsmittel untereinander resultieren für alle Verkehrsmittel Änderungen in der Verkehrsnachfrage. Die Rückkopplungen sind solange durchzuführen, bis das Abbruchkriterium eingehalten wird. Werden auf allen Ebenen die Kriterien erfüllt, ist das vollständige Gleichgewicht erreicht. In Bezug auf die Verkehrsmodellierung als Grundlage der ökonomischen Gesamtbewertung von Investitionsmaßnahmen ist zu beachten, dass ein Gleichgewicht sowohl für den Mit- als auch für den Ohnefall zu erreichen ist.

## 3.4 Induzierter Verkehr

Der induzierte Verkehr ist ein in den letzten Jahrzehnten kontrovers diskutiertes Thema. Nicht nur die Schwierigkeiten der Modellierung und Quantifizierung dieses Verkehrs standen im Mittelpunkt der Debatte, sondern auch die ökonomische Bewertung damit hervorgerufener Projektwirkungen, weshalb hier eine genauere Betrachtung notwendig ist. Im Folgenden wird das Phänomen „induzierter Verkehr“ betrachtet. Die Thematik der

Bewertung des induzierten Verkehrs wird in Kapitel 4 aufgegriffen. Ein Überblick über die bestehende, sehr umfassende Literatur zu diesem Thema soll an dieser Stelle nicht gegeben werden. Hierfür sei z. B. auf FGSV [53], HELMS [66] und LITMAN [86] verwiesen.

Im realen Verkehrsgeschehen streben Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage für einen größeren Zeitraum (Tag, Woche, Jahr) gegen ein relativ stabiles (globales) Nutzergleichgewicht, das im Rahmen der Verkehrsmodellierung nachgebildet wird. Dabei wird die Art und Weise des Verkehrsgeschehens durch zahlreiche Einflussgrößen wie die bestehende Flächennutzung (Raumstrukturgrößen), das Verkehrsverhalten der Menschen, das Verkehrsangebot etc. determiniert. Eine neue verkehrswirksame Maßnahme stellt einen Eingriff in das Verkehrssystem dar und stört das bestehende Nutzergleichgewicht. Da die Verkehrsnachfrage i. d. R. nicht aufwandsunelastisch ist, führt die neue Maßnahme zu einer Reaktion bei den Verkehrsteilnehmern. Hierdurch finden Änderungen in der Abfolge der Aktivitäten, Zielwahl, Verkehrsmittelwahl, Routenwahl etc. statt (vgl. FGSV [53] S. 17). Resultat ist ein neues Nutzergleichgewicht mit der Maßnahme. Somit stehen sich zur Quantifizierung des induzierten Verkehrs zwei relativ stabile globale Nutzergleichgewichtszustände gegenüber (vgl. FGSV [53] S. 17).

Der induzierte Verkehr besteht im Wesentlichen aus den folgenden Komponenten (vgl. FGSV [53] S. 5):

- intramodale Verlagerungen: entstehen bei gleichbleibenden Quelle-Ziel-Relationen und Verlagerungen auf andere Routen innerhalb des gleichen Verkehrsmittels,
- intermodale Verlagerungen: entstehen bei gleichbleibenden Quelle-Ziel-Relationen und Verlagerungen auf andere Verkehrsmittel, ggf. mit neuer Routenwahl,
- interlokale Verlagerungen: entstehen bei veränderten Quelle-Ziel-Relationen, ggf. verbunden mit der Nutzung anderer Verkehrsmittel,
- neue Ortsveränderungen: entstehen bei zusätzlich realisierten Ortsveränderungen (Neuverkehr).

Neben diesen „klassischen“ Komponenten kann der induzierte Verkehr jedoch auch intertemporale Verlagerungen, die durch eine veränderte Zeitwahl entstehen, umfassen (vgl. z. B. EM [44] S. 109 f. und CDT [27]). Die Modellierung der Zeitwahl stellt ein derzeit bedeutendes Forschungsfeld dar (vgl. ORTÚZAR/WILLUMSEN [115] S. 391). Entsprechende Betrachtungen sind im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht zusätzlich leistbar, was folglich auch auf die Darstellung intertemporaler Verlagerungen zutrifft.

Von Bedeutung ist die zeitliche Betrachtung der Maßnahmewirkung. Kurzfristig nach Realisierung der Maßnahme treten verkehrliche Änderungen in Form des **primär induzierten Verkehrs** auf. Dieser umfasst dabei „[...] die Gesamtheit aller durch eine Maßnahme kurzfristig verursachten Verkehrsmengen- und Verkehrsaufwandsveränderungen, das heißt, den gesamten verlagerten und neu hinzukommenden Verkehr“ (FGSV [53] S. 5). Der primär induzierte Verkehr wird nur aus Veränderungen des Verkehrsverhaltens der

Verkehrsteilnehmer hervorgerufen. Die räumliche Verteilung der Bevölkerung und der Nutzungsgelegenheiten wird als konstant betrachtet.

Neben den unmittelbaren (primären) verkehrlichen Wirkungen führt die verkehrswirksame Maßnahme u. U. zu mittelbaren (sekundären) Veränderungen der Siedlungsstrukturen (Arbeits- und Wohnungsmarkt), auf dem Dienstleistungssektor usw. (vgl. SCHILLER [124] S. 28). Infolge dieser langfristigen maßnahmebedingten Raumstrukturänderungen entstehen weitere langfristige verkehrliche Verlagerungen und Neuverkehre (Zu- oder Abnahme möglich). Der **sekundär induzierte Verkehr** kann somit als „[...] die durch eine Maßnahme [...] mittelbar und langfristig verursachten Verkehrsverlagerungen und Neuverkehre im Vergleich des primären Mit-Falls und des sekundären Mit-Falls [...] der betrachteten Maßnahme [...]“ definiert werden (FGSV [53] S. 22).

Die exakte Unterscheidung in primär und sekundär induzierten Verkehr einer verkehrswirksamen Maßnahme ist zwar theoretisch möglich, praktisch jedoch kaum durchführbar. Dies liegt zum einen an zu geringen induzierten Verkehrsmengen gegenüber dem Gesamtverkehr, zum anderen an starken Vermischungen und Überlagerungen mit anderen Maßnahmen. Ein weiteres großes Problem stellt der Zeitpunkt der Entstehung des entsprechenden induzierten Verkehrs dar. Während der Zeitpunkt der Entstehung des primär induzierten Verkehrs relativ klar abgrenzbar ist (kurzfristig nach Inbetriebnahme), ist dies für den sekundär induzierten Verkehr (praktisch) nicht eindeutig feststellbar. Große verkehrswirksame Investitionsmaßnahmen unterliegen langen Planungen und bieten Investoren, Politikern u. a. so die Möglichkeit, bereits vor dem Bau bzw. der Inbetriebnahme der Maßnahme verkehrsgünstige Standortentscheidungen für die Investitionen zu treffen (vgl. SCHILLER [124] S. 28 f.). Hierdurch treten dann bereits vorher Verkehre auf, die eigentlich sekundär induzierten Verkehr darstellen. Eine sinnvolle explizite Quantifizierung des sekundär induzierten Verkehrs erscheint aus dieser Perspektive kaum realistisch.

Grundsätzlich lässt sich bzgl. des induzierten Verkehrs festhalten, dass das Ausmaß des induzierten Verkehrs sehr von den gegebenen Rahmenbedingungen abhängt. „Starke“ Maßnahmen führen zu ausgeprägteren Wirkungen, wobei solche Maßnahmen vor allem hohe Aufwandsrückgänge in hochbelasteten Regionen darstellen. Darüber hinaus sind die Aufwandselastizitäten und damit das Verkehrsverhalten der Verkehrsteilnehmer maßgebend. Hohe Elastizitäten führen zu starken Reaktionen in Form der Anpassung der Verkehrsnachfrage und folglich zu induziertem Verkehr. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Verhaltensänderungen bei nicht substituierbaren Aktivitäten geringer sind als bei substituierbaren Aktivitäten (vgl. SCHILLER [124] S. 29). In diesem Zusammenhang wurden zur Berechnung der interlokal verlagerten Wege in der letzten Bundesverkehrswegeplanung lediglich 7,7 % aller Wege mit einer freien Zielwahl identifiziert (vgl. ENGLMANN ET AL. [46] S. 5).

---

Generell lassen sich Verlagerungen gegenüber Neuverkehr in Form neuer realisierter Fahrten (neues Gesamtverkehrsaufkommen) empirisch deutlich einfacher und sicherer nachweisen. Über das Ausmaß des Neuverkehrs infolge der Realisierung einer Verkehrsinvestition herrscht weitgehend die Annahme, dass dieser eher gering ausfällt, da die Wegehäufigkeit pro Person und die durchschnittlich im Verkehr verbrachte Zeit relativ konstante Größen darstellen (vgl. FGSV [53] S. 5 f.). Modelltheoretisch kann der Neuverkehr im Rahmen der Verkehrserzeugung mittels elastischer Produktionsraten berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 3.2.1.2). Davon zu unterscheiden ist der Neuverkehr im Sinne von neuen Verkehrsaufwänden, der durch zusätzliche Verkehrsaufwände beschrieben wird. Diese zusätzlichen Aufwände werden sowohl durch verlagerte als auch neu hinzukommende Fahrten hervorgerufen.



## 4 Bewertungskonzepte

Die volkswirtschaftliche Wirkung einer neuen Verkehrsmaßnahme ist vielfältig und im Rahmen einer NKA erfassbar. Die grundsätzliche Berechnung lautet zusammengefasst (vgl. MACKIE ET AL. [99] S. 5):

$$\begin{array}{c} \boxed{\text{ökonomische} \\ \text{Gesamtwirkung}} \end{array} = \begin{array}{c} \boxed{\text{Änderung des} \\ \text{monetären internen} \\ \text{Nutzens}} \end{array} + \begin{array}{c} \boxed{\text{Änderung in den} \\ \text{Betreiberkosten} \\ \text{und Einnahmen}} \end{array} - \begin{array}{c} \boxed{\text{Änderung der} \\ \text{externen} \\ \text{Kosten}} \end{array} - \begin{array}{c} \boxed{\text{Investitions-} \\ \text{kosten}} \end{array}$$

Die mikroökonomisch konsistente Bestimmung der Änderung des internen Nutzens der Verkehrsteilnehmer ist Gegenstand dieser Arbeit. Der Begriff „interner Nutzen“ umfasst dabei den Nutzen der **Verkehrsteilnehmer**.

In diesem Kapitel werden zum einen theoretische Zusammenhänge und bestehende Ansätze zur Berechnung der Änderung des internen Nutzens unmittelbar aus dem Verkehrsnachfragemodell aufgezeigt. Die Zufallsnutzentheorie und das Logit-Modell stehen dabei aufgrund der mikroökonomischen Begründung im Zentrum der Betrachtungen. Zum anderen erfolgen die Vorstellung ausgewählter praktischer Bewertungsansätze und deren Diskussion vor dem Hintergrund theoretischer Anforderungen.

Verkehr dient, mit Ausnahme von Ortsveränderungen als Selbstzweck, dem Ziel der Ausübung einer nutzenbringenden Aktivität an einem anderen Ort und stiftet selbst keinen Nutzen. Eine Nutzenerhöhung durch die Realisierung einer Verkehrsinvestition resultiert somit zum einen aus der Reduzierung der Aufwände bei gleicher Verkehrsnachfrage und der damit verbundenen Freisetzung individueller Ressourcen, zum anderen aus der Möglichkeit, andere Ziele mit den bestehenden Ressourcen zu erreichen. Wird das Postulat der individuellen Nutzenmaximierung als Grundlage der Verkehrsnachfrage unterstellt, so erfahren die Verkehrsteilnehmer an den neuen Zielen einen höheren Nutzen, da sie sonst ihr altes Ziel nicht substituieren würden. Diese Zusammenhänge wurden in der ökonomischen Fachliteratur vielfach dargelegt und sollen hier nicht wiederholt werden. Für entsprechende Erläuterungen siehe z. B. ABAY [1], FRERICH [56], JARA-DÍAZ [76] und VAN DER TAK und RAY [138].

## 4.1 Konsum- und Zufallsnutzentheorie

Bevor die Bewertungskonzepte vorgestellt werden, erfolgt in diesem Kapitel die Darlegung wichtiger Zusammenhänge zwischen der klassischen mikroökonomischen Konsumtheorie und der Zufallsnutzentheorie. Dabei werden im Besonderen indirekte Nutzenfunktionen und deren Eigenschaften sowie die Eigenschaften von Zufallsnutzenmodellen vorgestellt.

### 4.1.1 Indirekte Nutzenfunktion

In der mikroökonomischen Konsumtheorie werden für beliebig teilbare Güter die nachgefragten Gütermengen mittels eines individuellen Programms der optimalen Ressourcenallokation bestimmt (vgl. Kapitel 2.2). Die Auswahl dieses optimalen Güterbündels führt zum maximalen Nutzen. Wenn in der **direkten Nutzenfunktion** die Gütermengen durch die entsprechenden Preise und das Einkommen substituiert werden, dann resultiert daraus die **indirekte Nutzenfunktion**, die das maximal erreichbare Nutzenniveau in Abhängigkeit dieser Größen beschreibt. Die mikroökonomisch konsistente Bestimmung der monetären Nutzenänderungen infolge einer Verkehrsmaßnahme direkt aus dem Verkehrsnachfragemodell bedarf einer indirekten Nutzenfunktion (siehe Kapitel 2.5.2).

#### 4.1.1.1 Bedingte indirekte Nutzenfunktion

Ausgangspunkt der Betrachtungen ist das individuelle Optimierungsprogramm für stetige Güter (vgl. Kapitel 2.2). Das Programm wird zur Berücksichtigung sich ausschließender Verkehrsalternativen um ein entsprechendes **diskretes** Gut erweitert. Damit kann die Verkehrsnachfrage als ein Bestandteil des vom Konsumenten  $n$  zu wählenden Gesamtgüterbündels formuliert werden. Die Bestimmung der Nachfragefunktionen für die stetigen Güter  $\mathbf{x}_n$  erfolgt dann unter der Annahme der Nutzenmaximierung und unter der Bedingung der Auswahl einer speziellen Alternative  $a_{bn}$  (diskretes Gut). Das bedingte Optimierungsprogramm für  $a_{bn}$  lautet (vgl. z. B. MCFADDEN in [102] S. 207):

$$\begin{aligned} \max u_n(\mathbf{x}_n, \mathbf{X}_{bn}) \\ y_n \geq \sum_i p_{in} \cdot x_{in} + rk_{bn} \end{aligned} \quad (4.1)$$

mit  $rk_{bn}$  als Reisekosten der diskreten Alternative  $a_{bn}$  der Alternativenmenge  $A_n$ . Entsprechend LANCASTERS Ansatz wird die Alternative  $a_{bn}$  in der indirekten Nutzenfunktion durch deren Charakteristika beschrieben, wobei die Reisekosten  $rk_{bn}$  darin **nicht** enthalten sind. Darüber hinaus wird  $\mathbf{X}_{bn}$  durch sozioökonomische Charakteristika der Entscheidungsträger determiniert.<sup>44</sup> Für die weiteren Überlegungen, die sich auf das diskrete Gut

---

<sup>44</sup> Oft werden die sozioökonomischen Charakteristika erst später eingeführt. Zur einfacheren Nachvollziehbarkeit der Gesamtzusammenhänge werden sie jedoch, HANEMANN in [61] folgend, im individuellen Optimierungsprogramm explizit berücksichtigt.

beziehen, ist die Anwendung des „composite gommodity-Theorems“ zweckmäßig, wodurch die stetigen Güter  $x_{in}$  zu einem generalisierten Konsumgut  $x_{0n}$  zusammengefasst werden können (vgl. MAIER/WEISS [100] S. 44 f.). Dadurch werden theoretische Betrachtungen bezüglich des diskreten Gutes vereinfacht, besitzen aber dennoch Allgemeingültigkeit (vgl. VARIAN [146] S. 21). Es gilt:

$$p_{0n} \cdot x_{0n} = \sum_i p_{in} \cdot x_{in} . \quad (4.2)$$

Die Betrachtung des generalisierten Konsumgutes als Numéraire ermöglicht darüber hinaus die Eliminierung von  $p_{0n}$  (vgl. VARIAN [146] S. 26):

$$\begin{aligned} y_n &\geq p_{0n} \cdot x_{0n} + rk_{bn} \\ \frac{y_n}{p_{0n}} &\geq x_{0n} + \frac{rk_{bn}}{p_{0n}} \quad , \\ y_n &\geq x_{0n} + rk_{bn} \quad \text{mit } p_{0n} = 1 \end{aligned} \quad (4.3)$$

wodurch  $rk_{bn}$  und  $y_n$  relativ zu  $p_{0n}$  gemessen werden. Durch die Fixierung auf den Wert Eins verschwindet  $p_{0n}$ . Es ist jedoch zu beachten, dass  $p_{0n}$  weiterhin **implizit** enthalten ist. Die bedingte indirekte Nutzenfunktion bei Auswahl der Alternative  $a_{bn}$  lautet:

$$\Phi_{bn} (y_n - rk_{bn}, \mathbf{X}_{bn}) . \quad (4.4)$$

Die Funktion ist abhängig von der funktionalen Form der zugrunde liegenden direkten Nutzenfunktion,  $\mathbf{X}_{bn}$  und  $(y_n - rk_{bn})$ , d. h. dem „bedingten Budget“, das bei der Wahl der Alternative  $a_{bn}$  für den Konsum von  $x_{0n}$  noch zur Verfügung steht. Die bedingte indirekte Nutzenfunktion gibt an, welcher Nutzen bei der Wahl einer bestimmten diskreten Alternative (Bedingung) und bestimmten Einkommen  $y_n$  erreicht werden kann (vgl. MAIER/WEISS [100] S. 37).

Gleichung (4.4) ist rein deterministischer Natur, was im Kontext der Verkehrsnachfrage zu fehlerhaften Ergebnissen führt. Daher ist der in (4.4) beschriebene Nutzen, entsprechend der Zufallsnutzentheorie, ohne Verlust der Allgemeingültigkeit um die zusätzliche stochastische Größe  $\varepsilon$  zu erweitern (vgl. MCFADDEN [105] S. 15). Die bedingte indirekte Nutzenfunktion lautet demnach:

$$\Phi_{bn} (y_n - rk_{bn}, \mathbf{X}_{bn}, \varepsilon_{bn}) \quad (4.5)$$

und es gilt aufgrund der additiven Trennbarkeit in eine deterministische und eine stochastische Nutzenkomponente (vgl. HAU [63] S. 480):

$$\Phi_{bn} = \bar{\Phi}_{bn} + \varepsilon_{bn} . \quad (4.6)$$

$\bar{\Phi}_{bn}$  entspricht dem indirekten Pendant von  $\bar{u}_{bn}$  in Gleichung (3.34).

Die einfachste bedingte indirekte Nutzenfunktion wird durch folgenden linearen Ansatz ausgedrückt (vgl. z. B. MCFADDEN in [102] S. 209):

$$\Phi_{bn} = \beta_{rkn} \cdot (y_n - rk_{bn}) + \beta_n \cdot \mathbf{X}_{bn} + \varepsilon_{bn}, \quad (4.7)$$

der in der Literatur häufig – MCFADDEN in [102] folgend – als AIRUM-Form (Additive Income Random Utility Maximization) bezeichnet wird. Wird die Reisezeit explizit aufgeführt, resultiert:

$$\Phi_{bn} = \beta_{rkn} \cdot (y_n - rk_{bn}) - \beta_{rzn} \cdot rz_{bn} + \sum_l \beta_{ln} \cdot X_{bln} + \varepsilon_{bn}. \quad (4.8)$$

Da die Reisezeit einen Aufwand darstellt, geht sie negativ in die Nutzenfunktion ein. Aufgrund des linearen und additiven Einflusses des Einkommens kann  $y_n$  zur Bestimmung der Auswahlwahrscheinlichkeiten vernachlässigt werden, da es keinen Einfluss besitzt. Das kann unter Verwendung von (3.35) mit – zur Vereinfachung – lediglich der Berücksichtigung von  $(y_n - rk_{bn})$  gezeigt werden:

$$\begin{aligned} P_{bn} &= Prob\left(\beta_{rkn} \cdot (y_n - rk_{bn}) - \beta_{rkn} \cdot (y_n - rk_{b'n}) \geq \varepsilon_{b'n} - \varepsilon_{bn}, \quad b' = 1, \dots, B_n\right) \\ &= Prob\left(\beta_{rkn} \cdot (rk_{b'n} - rk_{bn}) \geq \varepsilon_{b'n} - \varepsilon_{bn}, \quad b' = 1, \dots, B_n\right) \end{aligned}$$

Hierdurch kann (4.8) wie folgt vereinfacht werden:<sup>45</sup>

$$\begin{aligned} \Phi_{bn} &= -\beta_{rkn} \cdot rk_{bn} - \beta_{rzn} \cdot rz_{bn} + \sum_l \beta_{ln} \cdot X_{bln} + \varepsilon_{bn} \\ &= -ga_{bn} + \sum_l \beta_{ln} \cdot X_{bln} + \varepsilon_{bn} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Der deterministische Anteil entspricht dem Ausdruck der in Kapitel 3.2.2.3.2 gezeigten linearen Form der Gleichung (3.50), die somit eine bedingte indirekte Nutzenfunktion ist.

Unabhängig von der speziellen Ausprägung der bedingten indirekten Nutzenfunktion lassen sich damit wichtige Kenngrößen bestimmen. Der Grenznutzen des Einkommens  $\lambda$  lautet:

$$\lambda = \frac{\partial \Phi}{\partial y}. \quad (4.10)$$

Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Einkommen und Reisekosten folgt des Weiteren:

$$\lambda = -\frac{\partial \Phi}{\partial rk}. \quad (4.11)$$

---

<sup>45</sup> Es handelt sich hierbei eigentlich um eine **beschränkte** bedingte indirekte Nutzenfunktion, da sie nicht den gesamten Nutzen, sondern lediglich den negativen Nutzen infolge der Realisierung der Verkehrsalternative angibt (vgl. JARA-DÍAZ [76] S. 54).

Der Grenznutzen des Einkommens entspricht somit dem negativen Grenznutzen der Reisekosten. Neben  $\lambda$  können außerdem der Grenznutzen der Reisezeit und der Grenznutzen der Charakteristika der Alternative bestimmt werden:

$$GN_{rz} = \frac{\partial \Phi}{\partial rz} \quad (4.12)$$

und

$$GN_{X_l} = \frac{\partial \Phi}{\partial X_l}. \quad (4.13)$$

$GN$  Grenznutzen

Mit Hilfe der Grenznutzen lassen sich über die Grenzrate der Substitution (MRS; siehe Kapitel 2.2) die subjektiven Werte der Reisezeiteinsparung (subjective value of travel time savings)<sup>46</sup>

$$svtts = - \frac{\frac{\partial \Phi}{\partial rz}}{\frac{\partial \Phi}{\partial y}} = \frac{\frac{\partial \Phi}{\partial rz}}{\frac{\partial \Phi}{\partial rk}} \quad (4.14)$$

und der Charakteristika der Alternative

$$svX_l = \frac{\frac{\partial \Phi}{\partial X_l}}{\frac{\partial \Phi}{\partial y}} \quad (4.15)$$

bestimmen. Es handelt sich bei diesen Werten um subjektive Größen, da sie aus der subjektiven indirekten Nutzenfunktion bestimmt werden.

#### 4.1.1.2 Unbedingte indirekte Nutzenfunktion

Die vorangegangenen Betrachtungen bezogen sich stets auf den (bedingten) Fall, dass eine bestimmte Alternative  $a_{bn}$  gewählt wird. Der Entscheidungsträger steht jedoch der Entscheidungssituation gegenüber, jene Alternative aus der Menge  $A_n$  zu wählen, die ihm in Kombination mit der Auswahl weiterer stetiger Güter den maximalen Nutzen liefert. Dieser wird durch die unbedingte indirekte Nutzenfunktion ausgedrückt (vgl. MAIER/WEISS [100] S. 41).

---

<sup>46</sup> Aufgrund der Aufwandseigenschaft der Reisezeit ergibt sich durch eine Erhöhung von  $rz$  eine negative Zahlungsbereitschaft. Da hier jedoch die Zahlungsbereitschaft für die Reduzierung von  $rz$  bestimmt wird, erfolgt die Bildung der negativen MRS.

Die (deterministische) unbedingte indirekte Nutzenfunktion eines Individuums lautet allgemein (vgl. z. B. MCFADDEN in [102] S. 208):

$$\Phi_n^* \left( y_n - \mathbf{rk}_{A_n n}, \mathbf{X}_{A_n n} \right) = \max_{b \in A_n} \Phi_{bn} \left( y_n - rk_{bn}, \mathbf{X}_{bn} \right). \quad (4.16)$$

Dabei entspricht  $\left( y_n - \mathbf{rk}_{A_n n} \right)$  einem Vektor mit den Elementen  $(y_n - rk_{bn})$  und  $\mathbf{X}_{A_n n}$  einem Vektor mit den Komponenten  $\mathbf{X}_{bn}$ , für jedes  $b \in A_n$ . Die unbedingte indirekte Nutzenfunktion ist folglich genau jene bedingte indirekte Nutzenfunktion, die den höchsten Nutzen aufweist.

Im Rahmen der Zufallsnutzentheorie wird  $\Phi_{bn}$  entsprechend Gleichung (4.5) durch eine zusätzliche stochastische Nutzenkomponente  $\varepsilon_{bn}$  beschrieben, weshalb  $\Phi_n^*$  ebenfalls von dieser Größe abhängt (vgl. IBÁÑEZ/BATLEY [73] S. 20):

$$\Phi_n^* \left( y_n - \mathbf{rk}_{A_n n}, \mathbf{X}_{A_n n}, \varepsilon_{A_n n} \right) = \max_{b \in A_n} \Phi_{bn} \left( y_n - rk_{bn}, \mathbf{X}_{bn}, \varepsilon_{bn} \right). \quad (4.17)$$

Der maximale Nutzen  $\Phi_n^*$  stellt ebenso wie  $\Phi_{bn}$  eine Zufallsgröße dar und ist das wahr-scheinlichkeitstheoretische Pendant der indirekten Nutzenfunktion der klassischen mikro-ökonomischen Konsumtheorie (vgl. MAIER/WEISS [100] S. 115). Für die Zielstellung dieser Arbeit ist der Erwartungswert der Zufallsvariable  $\Phi_n^*$  von noch größerer Bedeutung und lautet:

$$E \left( \Phi_n^* \left( y_n - \mathbf{rk}_{A_n n}, \mathbf{X}_{A_n n}, \varepsilon_{A_n n} \right) \right) = E \left( \max_{b \in A_n} \Phi_{bn} \left( y_n - rk_{bn}, \mathbf{X}_{bn}, \varepsilon_{bn} \right) \right). \quad (4.18)$$

### 4.1.1.3 Eigenschaften indirekter Nutzenfunktionen

Indirekte Nutzenfunktionen stellen Ergebnisse individueller Optimierungsprogramme dar, welche auf Basis einfacher direkter Nutzenfunktionen problemlos ableitbar sind. Bei komplexeren direkten Nutzenfunktionen ist das mathematisch sehr kompliziert oder nicht lösbar (vgl. TRAIN [142] S. 80). Da dadurch zahlreiche mikroökonomische Problemstellungen nicht untersuchbar wären, besteht die Möglichkeit, indirekte Nutzenfunktionen unmittelbar zu definieren. Diese müssen jedoch mikroökonomisch konsistente Formen aufweisen, wodurch die Existenz dazugehöriger direkter Nutzenfunktionen und das individuelle Optimierungsprogramm implizit gewährleistet werden.

Indirekte Nutzenfunktionen sind durch spezielle Eigenschaften gekennzeichnet, durch deren Einhaltung die mikroökonomische Konsistenz gewährleistet wird. Grundsätzlich muss  $\Phi_n^*$  diesen Bedingungen genügen, allerdings zeigen NUNES ET AL. in [113], dass die Eigenschaften von  $\Phi_n^*$  durch  $\Phi_{bn}$  determiniert werden und daher die Prüfung von  $\Phi_{bn}$  genügt.

Die zu erfüllenden Eigenschaften von  $\Phi_{bn}$  lauten (vgl. NUNES ET AL. [113] S. 258):

- (1) nicht zunehmend in  $rk_{bn}$  sowie nicht abnehmend in  $y_n$ ,
- (2) stetig bei allen  $rk_{bn} \gg 0, y_n > 0$ ,
- (3) homogen vom Grade Null in  $(y_n, rk_{bn})$  und
- (4) konvex in  $rk_{bn}$ .

**Ad (1):**

Zur Gewährleistung einer Nichtzunahme in  $rk_{bn}$  muss gelten:

$$\frac{\partial \Phi_{bn}(y_n - rk_{bn}, \mathbf{X}_{bn}, \varepsilon_{bn})}{\partial rk_{bn}} \leq 0 \quad \text{für } b \in A_n. \quad (4.19)$$

Analog erfolgt die Prüfung für  $y_n$ :

$$\frac{\partial \Phi_{bn}(y_n - rk_{bn}, \mathbf{X}_{bn}, \varepsilon_{bn})}{\partial y_n} \geq 0 \quad \text{für } b \in A_n. \quad (4.20)$$

**Ad (2):**

Stetige Funktionen weisen in ihrem Wertebereich keine Sprungstellen auf. Funktionen, die aus stetigen Funktionen mittels der Grundrechenarten gebildet werden, sind wiederum stetig.

**Ad (3):**

Die Homogenität vom Grade Null besagt, dass die Budgetmenge konstant bleibt, wenn alle Preise/Reisekosten und das Einkommen mit einer positiven Zahl multipliziert werden. Diese Notwendigkeit folgt unmittelbar aus der Budgetrestriktion des Optimierungsprogramms mit dem Faktor  $k$ :  $y_n \cdot k \geq p_{0n} \cdot k \cdot x_{0n} + rk_{bn} \cdot k$ , was der ursprünglichen Restriktion:  $y_n \geq p_n \cdot x_n + rk_{bn}$  entspricht.

Für die bedingte indirekte Nutzenfunktion muss folglich gelten:  $\Phi_{bn}(k \cdot (y_n - rk_{bn}), \mathbf{X}_{bn}, \varepsilon_{bn}) = \Phi_{bn}(y_n - rk_{bn}, \mathbf{X}_{bn}, \varepsilon_{bn})$  für  $k > 0$ .  $\Phi_{bn}$  erfüllt diese Bedingung, da  $y_n$  und  $rk_{bn}$  in Bezug auf den Numeraire-Preis  $p_{0n}$  angegeben werden. Aus Gleichung (4.3) wird deutlich, dass in  $\Phi_{bn}$  stets implizit die Beziehung  $(y_n - rk_{bn}) / p_{0n}$  besteht. Es gilt folglich:

$$\frac{k \cdot (y_n - rk_{bn})}{k \cdot 1} = y_n - rk_{bn}. \quad (4.21)$$

**Ad (4):**

Grundsätzlich stellt Quasikonvexität indirekter Nutzenfunktionen eine notwendige Bedingung zur Erzielung einer optimalen, d. h. nutzenmaximalen, Entscheidung dar und

gewährleistet, dass die Preisindifferenzkurven konvex sind. Unter diesen Bedingungen sind die Indifferenzkurven der Güter konvex und die Optimierung unter Beachtung des Einkommensbudgets liefert eine eindeutige Lösung (siehe Kapitel 2.2).

Die Bedingung zur Einhaltung der Quasikonvexität lautet allgemein (vgl. VARIAN [147] S. 103):

$$\Phi(k \cdot p + (1 - k) \cdot p') \leq \max(\Phi(p), \Phi(p')) \quad \text{für } 0 \leq k \leq 1. \quad (4.22)$$

Für indirekte Nutzenfunktionen mit nur einem Preis wird Quasikonvexität durch jede in dem Preis monoton abnehmende Funktion gewährleistet (vgl. DALY/HYMAN [31] S. 11).

Die bedingte indirekte Nutzenfunktion beinhaltet jedoch neben  $rk_{bn}$  zusätzlich implizit den Preis des Numeraires  $p_{0n}$ , in dem die Funktion ebenfalls quasikonvex sein muss. Der Nachweis der Quasikonvexität bei mehreren Preisen ist mathematisch sehr komplex und ist ggf. lokal mittels Simulationsrechnungen zu prüfen. Es kann jedoch gezeigt werden, dass für indirekte Nutzenfunktionen mit einem implizit enthaltenen Numeraire-Preis die Quasikonvexität sowohl in  $rk_{bn}$  als auch in  $p_{0n}$  gewährleistet ist, wenn die Funktion global konvex in  $rk_{bn}$  ist (vgl. ANDERSON ET AL. [5] S. 71). Das ist erfüllt, wenn gilt:

$$\frac{\partial^2 \Phi_{bn}(y_n - rk_{bn}, \mathbf{X}_{bn}, \varepsilon_{bn})}{\partial rk_{bn}^2} \geq 0 \quad \text{für } b \in A_n, \quad (4.23)$$

also die zweite Ableitung der bedingten indirekten Nutzenfunktion nach  $rk_{bn}$  nicht negativ ist.

#### 4.1.1.4 Eigenschaften des Erwartungswertes des unbedingten indirekten Nutzens

In Kapitel 2 wurde dargestellt, dass auf Grundlage indirekter Nutzenfunktionen individuelle Nutzenänderungen infolge einer Projektrealisierung bestimmt werden können. Diese Änderungen stellen im Rahmen von Verkehrsinvestitionen den internen Nutzengewinn oder -verlust dar. Zur Bestimmung dieser Größe ist der Erwartungswert des unbedingten indirekten Nutzens  $E\Phi_n^*$  von besonderer Bedeutung, der folgende zwei wichtige Eigenschaften aufweist (vgl. MAIER/WEISS [100] S. 116):

- (1) Durch eine Erweiterung der Alternativenmenge kann sich  $E\Phi_n^*$  nicht verringern.
- (2) Die Ableitung von  $E\Phi_n^*$  nach  $\bar{\Phi}_{bn}$  ergibt für translationsinvariante Verteilungen für  $\varepsilon$  die Auswahlwahrscheinlichkeit  $P_{bn}$ .



**Ad (1):**

Es gilt:

$$E\left(\max_{b \in A_n} \left(\Phi_{bn}(y_n - rk_{bn}, \mathbf{X}_{bn}, \varepsilon_{bn})\right)\right) \leq E\left(\max_{b \in A'_n} \left(\Phi_{bn}(y_n - rk_{bn}, \mathbf{X}_{bn}, \varepsilon_{bn})\right)\right) \quad \text{für } A_n \subseteq A'_n. \quad (4.24)$$

Eine zusätzliche Alternative kann  $E\Phi_n^*$  somit nur erhöhen oder unverändert lassen, da gemäß dem Nutzenmaximierungsprinzip stets jene Alternative mit dem höchsten Zufallsnutzen gewählt wird. Die Eigenschaft gilt für alle Zufallsnutzenmodelle, vorausgesetzt die Werte für  $E\Phi_n^*$  existieren.

**Ad (2):**

Es gilt:

$$\frac{\partial E\left(\Phi_n^*(y_n - rk_{A_n n}, \mathbf{X}_{A_n n}, \varepsilon_{A_n n})\right)}{\partial \bar{\Phi}_{bn}(y_n - rk_{bn}, \mathbf{X}_{bn})} = P_{bn}. \quad (4.25)$$

### 4.1.2 Eigenschaften von Zufallsnutzenmodellen

Zur Gewährleistung von (4.25) müssen Zufallsnutzenmodelle bestimmte Eigenschaften erfüllen. Die Eigenschaften lassen sich anhand der Ableitungen von  $P_{bn}$  nach  $\bar{\Phi}_{bn}$  zeigen, die in der sogenannten JACOBI-Matrix zusammengefasst werden können (vgl. MAIER/WEISS [100] S. 117 f.):

$$\mathbf{J}_{P_n} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_{1n}}{\partial \bar{\Phi}_{1n}} & \dots & \frac{\partial P_{1n}}{\partial \bar{\Phi}_{B_n n}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{B_n n}}{\partial \bar{\Phi}_{1n}} & \dots & \frac{\partial P_{B_n n}}{\partial \bar{\Phi}_{B_n n}} \end{pmatrix}. \quad (4.26)$$

Die Modelleigenschaften lauten:

- (1) Die Elemente von  $\mathbf{J}_{P_n}$  unterliegen der Summenrestriktion für Wahrscheinlichkeiten.
- (2) Die Matrix  $\mathbf{J}_{P_n}$  ist symmetrisch.
- (3) Änderungen, die alle  $\bar{\Phi}_{bn}$  auf gleiche Weise beeinflussen, haben keinen Einfluss auf die Auswahlwahrscheinlichkeiten.
- (4) Die Erhöhung von  $\bar{\Phi}_{bn}$  für eine Alternative kann die entsprechende Auswahlwahrscheinlichkeit nicht verringern und die Auswahlwahrscheinlichkeiten der anderen Alternativen nicht erhöhen.

Die Eigenschaften (2) bis (4) gelten nur für Modelle mit translationsinvarianter Verteilung für  $\varepsilon$ .

**Ad (1):**

Die Summe der Auswahlwahrscheinlichkeiten weist stets den Wert Eins auf. Die Reaktionen der Auswahlwahrscheinlichkeiten auf Veränderungen von  $\bar{\Phi}_{bn}$  müssen sich daher aufheben:

$$\sum_b \frac{\partial P_{bn}}{\partial \bar{\Phi}_{b'n}} = 0. \quad (4.27)$$

**Ad (2):**

Aus der Symmetrie von  $\mathbf{J}_{P_n}$  folgt für die Elemente der Matrix  $\mathbf{J}_{P_n}$ :

$$\frac{\partial P_{bn}}{\partial \bar{\Phi}_{b'n}} = \frac{\partial^2 E(\Phi_n^*)}{\partial \bar{\Phi}_{bn} \partial \bar{\Phi}_{b'n}} = \frac{\partial P_{b'n}}{\partial \bar{\Phi}_{bn}}. \quad (4.28)$$

Die Auswahlwahrscheinlichkeit der Alternative  $a_{bn}$  reagiert somit gleich auf eine Änderung des deterministischen Nutzens der Alternative  $a_{b'n}$ , wie die Auswahlwahrscheinlichkeit von  $a_{b'n}$  auf eine Änderung des deterministischen Nutzens von  $a_{bn}$ . Sind diese symmetrischen Ableitungen für das Modell gewährleistet, so ist es **integrierbar** (Integrabilitätsbedingung).

**Ad (3):**

Eigenschaft (3) ergibt sich aus Eigenschaft (2), da hierdurch die Indizes  $b$  und  $b'$  in (4.27) vertauscht werden können.

**Ad (4):**

Dies folgt aus der Annahme der Nutzenmaximierung und es gilt:

$$\frac{\partial P_{bn}}{\partial \bar{\Phi}_{b'n}} = \begin{cases} \geq 0 & \text{für } b = b' \\ \leq 0 & \text{für } b \neq b' \end{cases}. \quad (4.29)$$

Mittels der in diesem Unterkapitel vorgestellten Eigenschaften der indirekten Nutzenfunktionen und Zufallsnutzenmodelle lassen sich Verkehrsnachfragemodelle auf ihre mikroökonomische Kompatibilität prüfen. Ist diese gewährleistet, so kann die Änderung des monetären internen Nutzens unmittelbar aus dem Modell bestimmt werden.

## 4.2 Änderung des internen Nutzens und der Konsumentenrente

Nach der Diskussion der grundlegenden Zusammenhänge der Konsumtheorie und der Zufallsnutzenmaximierung in Kapitel 4.1 erfolgt an dieser Stelle darauf aufbauend die Darstellung praktikabler Ansätze zur Bestimmung der Änderung der Konsumentenrente. Dabei ist analog zu den Erläuterungen in Kapitel 2.5.2 zunächst die Änderung des internen Nutzens und anschließend, mittels des Grenznutzens des Einkommens, dessen monetäres Äquivalent, die Änderung der Konsumentenrente, zu bestimmen. In dem Grundlagenkapitel wurde ebenfalls dargelegt, dass die Konsumentenrente nur dann ein exaktes monetäres Nutzenmaß ist, wenn keine Einkommenseffekte auftreten. Hierfür sind symmetrische Kreuzpreisableitungen der Verkehrsnachfragefunktion eine notwendige und hinreichende Voraussetzung. Für Zufallsnutzenmodelle muss gelten:

$$\frac{\partial P_{bn}}{\partial rk_{b'n}} = \frac{\partial^2 E(\Phi_n^*)}{\partial rk_{bn} \partial rk_{b'n}} = \frac{\partial P_{b'n}}{\partial rk_{bn}}. \quad (4.30)$$

Das stellt eine erweiterte Bedingung gegenüber der in Kapitel 4.1.2 gezeigten Eigenschaft (2) dar und wird für Zufallsnutzenmodelle gewährleistet, wenn **zusätzlich** gilt:

$$-\frac{\partial \Phi_{bn}}{\partial rk_{bn}} = \lambda_n = \textit{konstant}. \quad (4.31)$$

Die Konstanz des Grenznutzens des Einkommens über alle Alternativen wird nur durch in den monetären Größen lineare bedingte indirekte Nutzenfunktionen (AIRUM-Form) erfüllt.<sup>47</sup> Jede nichtlineare Transformation von  $(y_n - rk_{bn})$  verletzt (4.31) und impliziert Einkommenseffekte.

Linearität in den Reisekosten ist somit zur eindeutigen Bestimmung der Konsumentenrente eine zentrale Modellvoraussetzung. Aus verkehrsplanerischer Sicht ist dies problematisch, da hierdurch entsprechende nichtlineare Transformationen, die das Verhalten der Verkehrsteilnehmer oft besser abbilden, ausgeschlossen sind. In Kapitel 4.2.4 werden daher Ansätze zur Näherung der Konsumentenrente bei nichtlinearen Transformationen aufgezeigt.

---

<sup>47</sup> Die AIRUM-Form genügt allen in Kapitel 4.1.1.3 genannten Anforderungen (siehe hierfür z. B. MCFADDEN in [102] S. 209).

## 4.2.1 Logsum-Differenz

### 4.2.1.1 Konzept

Im Rahmen der Zufallsnutzentheorie ist der maximale Nutzen des Entscheidungsträgers  $n$  eine Zufallsgröße, deren Erwartungswert  $E(\Phi_n^*)$  zur Bestimmung der Konsumentenrente von Bedeutung ist. Das Logit-Modell als Hauptvertreter der Theorie weist alle in den Kapiteln 4.1.1.4 und 4.1.2 genannten Eigenschaften auf. WILLIAMS [156] und SMALL/ROSEN [131] zeigen, dass für das Logit-Modell

$$\frac{\partial E(\Phi_n^*(y_n - rk_{A_n n}, \mathbf{X}_{A_n n}, \varepsilon_{A_n n}))}{\partial \bar{\Phi}_{bn}(y_n - rk_{bn}, \mathbf{X}_{bn})} = P_{bn}(\bar{\Phi}_{A_n n}) = \frac{e^{\bar{\Phi}_{bn}}}{\sum_{b'} e^{\bar{\Phi}_{b'n}}} \quad (4.32)$$

gilt (vgl. (4.25)) und  $E(\Phi_n^*)$  als Stammfunktion von  $P_{bn}$  analytisch geschlossen bestimmbar ist:

$$E(\Phi_n^*(y_n - rk_{A_n n}, \mathbf{X}_{A_n n}, \varepsilon_{A_n n})) = \int_{-\infty}^{\bar{\Phi}_{A_n n}} \sum_b \frac{e^{\bar{\Phi}_{bn}}}{\sum_{b'} e^{\bar{\Phi}_{b'n}}}(\bar{\Phi}_{A_n n}) d\bar{\Phi}_{bn} = \ln \left( \sum_b e^{\bar{\Phi}_{bn}} \right) + C. \quad (4.33)$$

Hierbei ist  $\ln \sum_b e^{\bar{\Phi}_{bn}}$  der sogenannte Logsum-Term, der dem Logarithmus des Nenners des Logit-Modells entspricht.  $C$  ist eine unbekannte Konstante, weshalb nicht auf das absolute Maß des internen Nutzens geschlossen werden kann. Für die Bewertung von Verkehrsinvestitionen ist die Änderung des maximalen (internen) Nutzens von größerer Bedeutung, auf die  $C$  keinen Einfluss hat. Die gesuchte Nutzenänderung wird mit Hilfe der **Logsum-Differenz** bestimmt:

$$\Delta E(\Phi_n^*) = \left( \ln \sum_b e^{\bar{\Phi}_{bn}^M} - \ln \sum_b e^{\bar{\Phi}_{bn}^O} \right). \quad (4.34)$$

Die Bestimmung der Nutzendifferenz zwischen Mit- und Ohnefall erfolgt hierbei mittels eines einfachen analytisch geschlossenen Ansatzes.

Wird  $\Delta E(\Phi_n^*)$  mittels  $\lambda_n$  monetarisiert, resultiert die (gesuchte) **Änderung der Konsumentenrente** (vgl. z. B. TRAIN [143] S. 60) aus:<sup>48</sup>

---

<sup>48</sup> Es handelt sich dabei grundsätzlich um die Änderung der Erwartungswerte der Konsumentenrente. Der Operator des Erwartungswertes der Konsumentenrente wird jedoch hier und im Folgenden zur Vereinfachung vernachlässigt.

$$\Delta KR_n = \frac{1}{\lambda_n} \cdot \left( \ln \sum_b e^{\bar{\Phi}_{bn}^M} - \ln \sum_b e^{\bar{\Phi}_{bn}^O} \right). \quad (4.35)$$

Auf die Verkehrsnachfragemodellierung übertragen ergibt sich die Änderung der Konsumentenrente für einen repräsentativen Verkehrsteilnehmer  $n$  der Quelle-Ziel-Gruppe  $c$  – auf Basis eines Joint-Logit-Modells – demnach aus:

$$\begin{aligned} \Delta KR_{n_c} &= \frac{1}{\lambda_c} \cdot \left( E\left(\Phi_{n_c}^{*M}\right) - E\left(\Phi_{n_c}^{*O}\right) \right) \\ &= \frac{1}{\lambda_c} \cdot \left( \ln \sum_i \sum_j \sum_k e^{\bar{\Phi}_{ijkc}^M} - \ln \sum_i \sum_j \sum_k e^{\bar{\Phi}_{ijkc}^O} \right) \end{aligned} \quad (4.36)$$

und für die Gesamtheit der Quelle-Ziel-Gruppe  $c$  zu:

$$\begin{aligned} \Delta KR_c &= \frac{1}{\lambda_c} \cdot \left( E\left(\Phi_c^{*M}\right) - E\left(\Phi_c^{*O}\right) \right) \\ &= \frac{1}{\lambda_c} \cdot \left( \ln \sum_i \sum_j \sum_k e^{\bar{\Phi}_{ijkc}^M} - \ln \sum_i \sum_j \sum_k e^{\bar{\Phi}_{ijkc}^O} \right) \cdot V_c. \end{aligned} \quad (4.37)$$

$\lambda_c$  kann entweder extern vorgegeben oder intern aus  $\bar{\Phi}_c$  bestimmt werden. Im Kontext der harmonisierten Bewertung ist die interne Bestimmung vorzuziehen, weil hierdurch die Präferenzen der Verkehrsteilnehmer in die Bewertung Eingang finden.

Da  $\lambda_c$  signifikant von der Höhe des Einkommens abhängt, wird ersichtlich, dass innerhalb der Quelle-Ziel-Gruppen das Einkommen der Verkehrsteilnehmer beachtet werden sollte. Dies ist z. B. durch eine Unterteilung der Quelle-Ziel-Gruppen nach Personengruppen unterschiedlicher Einkommensklassen möglich. Dadurch wird gewährleistet, dass die Präferenzen der Verkehrsteilnehmer bezüglich der Reisekosten neben dem Reisezweck ebenfalls vom Einkommen bestimmt werden.<sup>49</sup> Im Folgenden soll jedoch zunächst vereinfachend davon ausgegangen werden, dass alle Personen einer Quelle-Ziel-Gruppe der gleichen Einkommensklasse angehören.

#### 4.2.1.2 Zerlegung der Änderung der Konsumentenrente

Die Bestimmung der Änderung der Konsumentenrente auf Basis der Logsum-Differenz liefert **einen** monetären Nutzenwert je Quelle-Ziel-Gruppe infolge einer Projektrealisierung. Aus praktischer Sicht kann es von Interesse sein, die Nutzenänderung differenziert nach

---

<sup>49</sup> Durch diese Unterteilung erfolgt eine abgestufte Beachtung interpersoneller Einkommenseffekte. Intrapersonelle Effekte, die durch unterschiedliche Reisekosten entstehen, können jedoch nur durch nichtlineare Funktionen abgebildet werden.

Aufwandsänderungen, verbleibendem und induziertem Verkehr und Verkehrsmitteln auszuweisen.

Für die Nutzenzuweisung zu den einzelnen Aufwandsänderungen auf Basis der Logsum-Differenz ist die sequentielle Integration des Logit-Modells nach den Aufwandskomponenten notwendig. HELMS zeigt, dass die aufeinander folgende Integration unter Konstanthaltung aller weiteren Einflussgrößen zwar zu einem korrekten Gesamtergebnis führt, die Nutzenzuweisung jedoch vom Integrationsweg, also der Reihenfolge der Integration, abhängt. Die Nutzenzerlegung bzgl. der Aufwandskomponenten ist somit nicht sinnvoll möglich (vgl. HELMS [66] S. 202 ff.).

Das Joint-Logit-Modell bestimmt die wahrscheinlichste Verteilung des Verkehrsaufkommens  $V_c$  auf die möglichen Alternativen  $ijk$ , so dass  $E(\Phi_c^*)$  maximal ist.  $E(\Phi_c^*)$  gibt dabei je Quelle-Ziel-Gruppe den maximalen Nutzen der Gesamtentscheidung, also über alle Alternativen  $ijk$ , an. Eine Nutzensausweisung nach den einzelnen Verkehrsmitteln  $k$  (oder anderen Alternativen(-gruppen)) sowie induziertem und verbleibendem Verkehr für die einzelnen Verkehrsströme  $v_{ijk}$  ist nicht möglich. Ist  $V_c$  für Mit- und Ohnefall gleich ( $V_c^O = V_c^M$ ), so tritt – bezogen auf  $V_c$  – kein induzierter Neuverkehr auf.

Kommt es hingegen zu einer Änderung des Verkehrsaufkommens, gilt also  $V_c^O \neq V_c^M$ , so kann der Ansatz in (4.36) nicht direkt angewendet werden, da die Nutzendifferenz mit **einem** Verkehrsaufkommen  $V_c$  zu multiplizieren ist. Eine pragmatische Lösung stellt die Mittelwertbildung aus  $V_c^O$  und  $V_c^M$  dar (vgl. KOHLI/DALY [82] S. 12). Es gilt:

$$\Delta KR_c = \frac{1}{\lambda_c} \cdot \left( E(\Phi_{n_c}^{*M}) - E(\Phi_{n_c}^{*O}) \right) \cdot \left( \frac{V_c^M + V_c^O}{2} \right). \quad (4.38)$$

Dadurch wird auch der Nutzengewinn/-verlust infolge der projektinduzierten Änderung des Gesamtverkehrsaufkommens berücksichtigt. Die Verwendung des Mittelwertes impliziert dabei eine lineare Nachfragekurve für  $V_c$ .

### 4.2.2 Halbierungsregel

Ende der 1960er Jahre wurde die Methodik der Halbierungsregel („Rule of a Half“) als Näherungslösung zur Bestimmung der Änderung des internen Nutzens erstmals im Rahmen einer Projektbewertung im Verkehrswesen angewendet (vgl. WILLIAMS [156] S. 289). Von Bedeutung ist dieser Ansatz zum einen für Modelle, die die Bedingung (4.28) nicht erfüllen und folglich nicht integrierbar sind, zum anderen zur Zerlegung des Nutzens nach den Verkehrsalternativen.

Die Halbierungsregel findet ihre inhaltliche Begründung unmittelbar im Ursprungskonzept nach DUPUIT und wird in diesem Kontext in der Literatur vorrangig dargestellt

(siehe z. B. ABELSON/HENSHER in [69], MACKIE ET AL. [99], HELMS [66]). In Kapitel 2.5 wurde bereits gezeigt, dass das ursprüngliche Konzept eher intuitiv begründet ist und erst durch die Einbettung in die mikroökonomische Konsumtheorie ein rigoroses theoretisches Fundament erhält.

Wird die mikroökonomische Begründung vernachlässigt, kann mittels der Halbierungsregel die Änderung des internen Nutzens basierend auf nahezu jedem beliebigen Verkehrsnachfragemodell bestimmt werden (vgl. JARA-DÍAZ/FARAH [77] S. 207). Vor dem Hintergrund der angestrebten Konsistenz zwischen Verkehrsnachfragemodellierung und wohlfahrtstheoretischer Bewertung soll die Halbierungsregel jedoch im Folgenden für (mikroökonomisch begründete) Zufallsnutzenmodelle theoretisch konsistent abgeleitet werden.

#### 4.2.2.1 Konzept

Bei der Halbierungsregel erfolgt die Berechnung von  $\Delta E(\Phi_n^*)$ , im Gegensatz zur Logsum-Differenz, für jede einzelne Alternative  $a_b$  getrennt. Das wird durch die Zerlegung der Gesamtnachfragefunktion und die Integration der einzelnen Auswahlwahrscheinlichkeiten  $P_{bn}$  erreicht. Die gesamte Änderung des internen Nutzens des Entscheidungsträgers  $n$  ergibt sich zu:

$$\Delta E(\Phi_n^*) = \sum_b \Delta E(\Phi_{bn}^*) = \sum_b \int_{\bar{\Phi}_{bn}^O}^{\bar{\Phi}_{bn}^M} P_{bn}(\bar{\Phi}_{A_n n}) d\bar{\Phi}_{bn}. \quad (4.39)$$

Die Auswahlwahrscheinlichkeiten  $P_{bn}$  werden von den sich simultan ändernden Nutzen  $\bar{\Phi}_{bn}$  aller Alternativen  $a_b$  beeinflusst, weshalb die Berechnung der einzelnen  $\Delta E(\Phi_{bn}^*)$  die Kenntnis des Integrationsweges von  $\bar{\Phi}_{bn}^O$  nach  $\bar{\Phi}_{bn}^M$  erfordert.

In Anlehnung an WILLIAMS in [155] kann gezeigt werden, dass die Halbierungsregel als Näherungslösung unter der Annahme eines **linearen** Integrationspfads zwischen  $\bar{\Phi}_{bn}^O$  und  $\bar{\Phi}_{bn}^M$  resultiert. Hierbei wird unterstellt, dass die relative Änderung zwischen beiden Gleichgewichtszuständen für alle Alternativen gleich und konstant ist:

$$PF_n = \left\{ \begin{array}{l} \bar{\Phi}_{1n}^O + \sigma(\bar{\Phi}_{1n}^M - \bar{\Phi}_{1n}^O) \\ \vdots \\ \bar{\Phi}_{bn}^O + \sigma(\bar{\Phi}_{bn}^M - \bar{\Phi}_{bn}^O) \\ \vdots \\ \bar{\Phi}_{B_n n}^O + \sigma(\bar{\Phi}_{B_n n}^M - \bar{\Phi}_{B_n n}^O) \end{array} \right\} \quad 0 \leq \sigma \leq 1. \quad (4.40)$$

Unter der Annahme des Integrationspfads  $PF_n$  ergibt sich:

$$\begin{aligned}\Delta E\left(\Phi_n^*\right) &= \sum_b \int_{PF_n} P_{bn}\left(\bar{\Phi}_{A_n n}\right) d\bar{\Phi}_{bn} \\ &= \sum_b \int_0^1 P_{bn}(\sigma) \left(d\bar{\Phi}_{bn}(\sigma) / d\sigma\right) d\sigma. \\ &= \sum_b \left(\bar{\Phi}_{bn}^M - \bar{\Phi}_{bn}^O\right) \int_0^1 P_{bn}(\sigma) d\sigma\end{aligned}\quad (4.41)$$

Anschließend erfolgt eine Taylorreihenentwicklung im Punkt der Ohnefallsituation  $\bar{\Phi}_{bn}^O$ , d. h.,  $\sigma = 0$ :

$$\Delta E\left(\Phi_n^*\right) = \sum_b \left(\bar{\Phi}_{bn}^M - \bar{\Phi}_{bn}^O\right) \int_0^1 \left\{ P_{bn}(\theta) + \sigma \frac{dP_{bn}(\theta)}{d\sigma} + \frac{1}{2} \sigma^2 \frac{d^2 P_{bn}(\theta)}{d\sigma^2} + \dots \right\} d\sigma, \quad (4.42)$$

wobei alle Ableitungen an der Stelle  $\sigma = 0$  erfolgen. Die Terme zweiter und höherer Ordnung werden bei marginalen Änderungen des Nutzens nicht berücksichtigt, was eine Linearisierung von  $P_{bn}$  an der Stelle  $\sigma = 0$  zur Folge hat. Unter dieser Annahme gilt:

$$\begin{aligned}\frac{dP_{bn}(\theta)}{d\sigma} &\simeq P_{bn}(\sigma = 1) - P_{bn}(\sigma = 0). \\ &= P_{bn}^M - P_{bn}^O\end{aligned}\quad (4.43)$$

Durch Einsetzen in und Integration von (4.42) nach  $\sigma$  ergibt sich:

$$\Delta E\left(\Phi_n^*\right) = \sum_b \left(\bar{\Phi}_{bn}^M - \bar{\Phi}_{bn}^O\right) \cdot P_{bn}^O + \frac{1}{2} \cdot \sum_b \left(\bar{\Phi}_{bn}^M - \bar{\Phi}_{bn}^O\right) \cdot \left(P_{bn}^M - P_{bn}^O\right). \quad (4.44)$$

Der Ausdruck kann zusammengefasst werden zu:

$$\Delta E\left(\Phi_n^*\right) = \frac{1}{2} \cdot \sum_b \left(P_{bn}^O + P_{bn}^M\right) \cdot \left(\bar{\Phi}_{bn}^M - \bar{\Phi}_{bn}^O\right). \quad (4.45)$$

Durch die Monetarisierung mittels  $\lambda_n$  ergibt sich wiederum die **Änderung der Konsumentenrente** des Entscheidungsträgers  $n$ :

$$\Delta KR_n = \frac{1}{2} \cdot \sum_b \left(P_{bn}^O + P_{bn}^M\right) \cdot \frac{1}{\lambda_n} \cdot \left(\bar{\Phi}_{bn}^M - \bar{\Phi}_{bn}^O\right). \quad (4.46)$$

Für die simultane Verkehrsnachfrageberechnung folgt für die Quelle-Ziel-Gruppe  $c$ :

$$\Delta KR_c = \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left(v_{ijk}^O + v_{ijk}^M\right) \cdot \frac{1}{\lambda_c} \cdot \left(\bar{\Phi}_{ijk}^M - \bar{\Phi}_{ijk}^O\right). \quad (4.47)$$



Die Nutzenfunktionen  $\bar{\Phi}_{ijkc}$  umfassen alle quantifizierbaren entscheidungsrelevanten Einflussgrößen, deren Änderungen auf die Verkehrsnachfrage und die Höhe der Konsumentenrente Einfluss haben. Sind die alternativenspezifischen Charakteristika für Mit- und Ohnefall konstant, so resultiert  $\Delta KR_c$  nur aus Aufwandsänderungen:

$$\Delta KR_c = \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k (v_{ijkc}^O + v_{ijkc}^M) \cdot \frac{1}{\lambda_c} \cdot (ga_{ijkc}^O - ga_{ijkc}^M). \quad (4.48)$$

Die in der Literatur gebräuchlichste Form ergibt sich durch die Verwendung der Generalisierten Kosten  $g$ :

$$\Delta KR_c = \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k (v_{ijkc}^O + v_{ijkc}^M) \cdot (g_{ijkc}^O - g_{ijkc}^M), \quad (4.49)$$

wodurch der Grenznutzen des Einkommens nur noch implizit in der Formel enthalten ist.

Das Prinzip der Halbierungsregel ist in Abbildung 4-1 grafisch dargestellt.<sup>50</sup> Dabei ist zu beachten, dass der Generalisierte Aufwand die unabhängige Größe (Ordinate) darstellt. Somit entspricht die Fläche unterhalb der Nachfragekurve zwar dem internen Nutzen, jedoch nicht der Konsumentenrente. Für deren Bestimmung ist die Monetarisierung des Nutzens mittels des Grenznutzens des Einkommens notwendig. Aus der Abbildung wird deutlich, dass die Halbierungsregel zur Ermittlung der Nutzenänderung (schraffierte Fläche) auf einer linearen Approximation der Nachfragefunktion (Gerade BC) basiert und i. Allg. kein exaktes Ergebnis liefert.

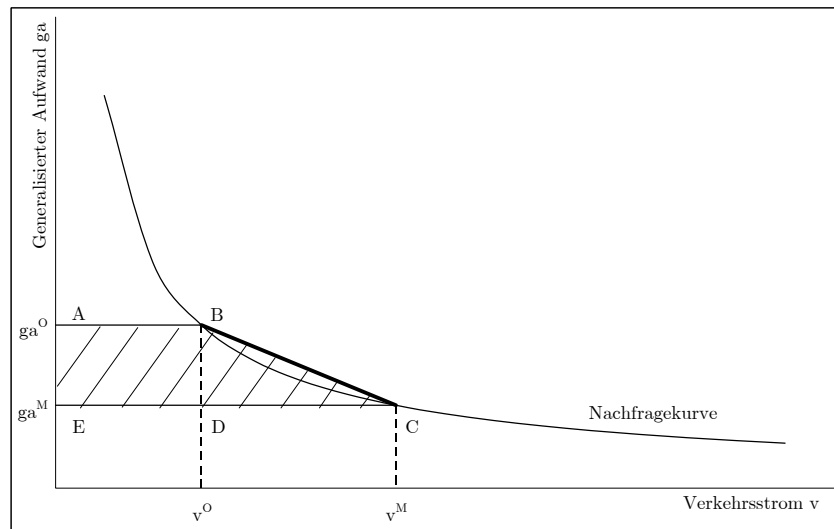


Abbildung 4-1: Halbierungsregel

<sup>50</sup> Zur Vereinfachung ist der ceteris-paribus-Fall dargestellt, bei dem sich zwischen Ohne- und Mitfall ausschließlich die Aufwände der betrachteten Alternative ändern. Auf die Darstellung der Angebotskurven wird darüber hinaus aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Die Gleichgewichtszustände in den Punkten B und C ergeben sich jedoch infolge der Schnittpunkte der Nachfrage- und der Angebotskurven.

### 4.2.2.2 Zerlegung der Änderung der Konsumentenrente

Im Gegensatz zur Logsum-Differenz ist eine Zerlegung von  $\Delta KR_c$  bei Anwendung der Halbierungsregel möglich. Die Möglichkeit der Disaggregation nach verschiedenen Alternativen(-gruppen), wie z. B. den Verkehrsmitteln, wird bei Betrachtung der oben gezeigten Formeln deutlich. Wird auf die Summierung über  $k$  verzichtet, resultieren die Werte  $\Delta KR_{kc}$  je Verkehrsmittel. Die Zerlegung der Änderung der Konsumentenrente nach den Aufwandsänderungen ist ebenfalls problemlos durchführbar. Mit

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_{ijkc} &= -ga_{ijkc} + \sum_l \beta_{lc} \cdot X_{ijklc} \\ &= -\beta_{rkc} \cdot rk_{ijkc} - \beta_{rzc} \cdot rz_{ijkc} + \sum_l \beta_{lc} \cdot X_{ijklc}\end{aligned}$$

resultiert (mit  $\mathbf{X}^O = \mathbf{X}^M$ ):

$$\begin{aligned}\Delta KR_c &= \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left( v_{ijkc}^O + v_{ijkc}^M \right) \cdot \left( rk_{ijkc}^O - rk_{ijkc}^M \right) \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left( v_{ijkc}^O + v_{ijkc}^M \right) \cdot \frac{\beta_{rzc}}{\beta_{rkc}} \left( rz_{ijkc}^O - rz_{ijkc}^M \right).\end{aligned}\tag{4.50}$$

Die Verhältnisse der Präferenzparameter entsprechen dem subjektiven monetären Wert der Reisezeiteinsparung, die dem Verkehrsnachfragemodell zugrunde liegen.

Eine andere Möglichkeit der Zerlegung besteht in der getrennten Ausweisung von  $\Delta KR_c$  nach verbleibendem und induziertem Verkehr. Der Ansatz leitet sich direkt aus (4.44) ab und lautet formal:

$$\begin{aligned}\Delta KR_c &= \sum_i \sum_j \sum_k \frac{1}{\lambda_c} \cdot \left( \bar{\Phi}_{ijkc}^M - \bar{\Phi}_{ijkc}^O \right) \cdot v_{ijkc}^{min} \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \frac{1}{\lambda_c} \cdot \left( \bar{\Phi}_{ijkc}^M - \bar{\Phi}_{ijkc}^O \right) \cdot \left( v_{ijkc}^{max} - v_{ijkc}^{min} \right).\end{aligned}\tag{4.51}$$

Dabei sind  $v_{ijkc}^{min} = \min \left\{ v_{ijkc}^O, v_{ijkc}^M \right\}$  und  $v_{ijkc}^{max} = \max \left\{ v_{ijkc}^O, v_{ijkc}^M \right\}$ , wodurch die Formel sowohl für induzierten als auch reduzierten Verkehr angewendet werden kann.

Mit  $\mathbf{X}^O = \mathbf{X}^M$  ergibt sich:

$$\begin{aligned}\Delta KR_c &= \sum_i \sum_j \sum_k \frac{1}{\lambda_c} \cdot \left( ga_{ijkc}^O - ga_{ijkc}^M \right) \cdot v_{ijkc}^{min} \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \frac{1}{\lambda_c} \cdot \left( ga_{ijkc}^O - ga_{ijkc}^M \right) \cdot \left( v_{ijkc}^{max} - v_{ijkc}^{min} \right).\end{aligned}\tag{4.52}$$

Der erste Term repräsentiert (mit  $ga^O > ga^M$ ) den Konsumentenrentenzuwachs des verbleibenden Verkehrs, der der Einsparung der monetarisierten Generalisierten Aufwände entspricht. In Abbildung 4-1 wird dieser Nutzen durch die Fläche ABDE dargestellt. Demgegenüber gibt der zweite Term den monetären Nutzengewinn des induzierten Verkehrs (Fläche BCD) an, der durch die projektinduzierte Erreichbarkeit/Zugänglichkeit (z. B. eines Ziels) bei gleichen individuellen Ressourcen erzielt wird.

Der erste zusätzliche Verkehrsteilnehmer erfährt dabei einen Nutzengewinn in vollem Umfang ebenso wie die verbleibenden Verkehrsteilnehmer (Punkt B). Er war im Ohnefall gerade indifferent zwischen Realisierung und Unterlassung der betrachteten Ortsveränderung. Der letzte hinzukommende Verkehrsteilnehmer erzielt keinen zusätzlichen Nutzengewinn, da er im Mitfall gerade indifferent ist und durch eine marginale Erhöhung des Generalisierten Aufwands auf die Durchführung der betrachteten Ortsveränderung verzichten würde (Punkt C). Somit wird unterstellt, dass die Gesamtheit der neu hinzukommenden Verkehrsteilnehmer im Mittel eine Änderung der Konsumentenrente in Höhe der Hälfte der Einsparung der monetarisierten Generalisierten Aufwände erfährt.

Es wird deutlich, dass bei der Bewertung des induzierten Verkehrs keine Unterscheidung in verlagerten oder Neuverkehr getroffen wird. Für eine vollständige und korrekte Nutzenerfassung sind jedoch alle betroffenen Relationen (mit  $v_{ijk}^O \neq v_{ijk}^M$ ) zu berücksichtigen, da verlagertes Verkehr u. U. auf der ursprünglichen  $ijk$ -Relation einen zusätzlichen Nutzengewinn oder -verlust erfährt. ABAY zeigt in [1] ausführlich, dass das Konzept für alle relevanten Aufwands- und Mengenänderungen konsistent ist.

Eine weitere Zerlegung des verbleibenden und induzierten Verkehrs in die Nutzenkomponenten kann zu fehlerhaften Nutzenzuweisungen beim induzierten Verkehr führen, weshalb darauf verzichtet werden sollte (vgl. EM [44] S. 63). Dies gilt jedoch nicht für den verbleibenden Verkehr.

### 4.2.3 Erweiterte approximative Ansätze

Die Halbierungsregel zur Näherung der Änderung des internen Nutzens führt unter folgenden Umständen zu keinem oder einem fehlerhaften Ergebnis:

- große Änderungen der Generalisierten Kosten/Aufwände zwischen Ohne- und Mitfall und
- ungleiche Alternativenmenge zwischen Ohne- und Mitfall.

Die Problematik der großen Aufwandsänderungen wird unmittelbar aus Abbildung 4-1 deutlich. Die Abweichung der linearen Approximation der Nachfragekurve steigt bei nichtlinearen Nachfragekurven mit zunehmenden Aufwandsdifferenzen. Der zweite Anwendungsfall umfasst vor allem neue bzw. wegfallende Verkehrsmittel und Ziele, für welche die Vergleichsaufwände des Ohne- bzw. Mitfalls fehlen. Zur Lösung der Probleme

entwickelten NELLTHORP und HYMAN die Halbierungsregel weiter. Nachfolgend werden die Ansätze basierend auf NELLTHORP/HYMAN [110] vorgestellt.

#### 4.2.3.1 Numerische Integration bei großen Aufwandsänderungen

Der Ansatz der Numerischen Integration stellt eine Erweiterung der Halbierungsregel dar, wobei die zu bestimmende Fläche unterhalb der Nachfragekurve nicht mittels einer, sondern mehrerer Trapezflächen approximiert wird. Die modellierten Gleichgewichtszustände des Mit- und Ohnefalls, die der Halbierungsregel zugrunde liegen, werden beibehalten und durch zusätzliche Zwischenpunkte ergänzt. Das Prinzip ist in Abbildung 4-2 grafisch dargestellt, in der die schattierte Fläche die genäherte Nutzenänderung angibt.

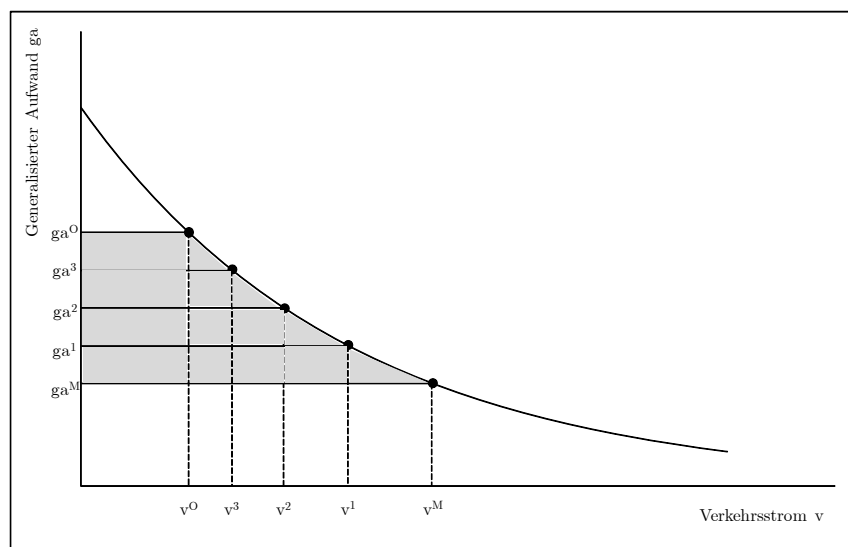


Abbildung 4-2: Numerische Integration bei großen Aufwandsänderungen

Die Bestimmung der Zwischenpunkte ergibt sich auf Grundlage äquidistant verteilter Generalisierter Aufwände. Zur Festlegung der in Abbildung 4-2 dargestellten drei Zwischenpunkte erfolgt die Definition der Generalisierten Aufwände wie folgt:

$$\begin{aligned}
 ga_{ijkc}^1 &= 0,25 \cdot (ga_{ijkc}^O - ga_{ijkc}^M) + ga_{ijkc}^M \\
 ga_{ijkc}^2 &= 0,5 \cdot (ga_{ijkc}^O - ga_{ijkc}^M) + ga_{ijkc}^M \\
 ga_{ijkc}^3 &= 0,75 \cdot (ga_{ijkc}^O - ga_{ijkc}^M) + ga_{ijkc}^M
 \end{aligned} \quad (4.53)$$

Unter Vorgabe dieser Werte sind die entsprechenden Verkehrsströme  $v_{ijkc}^1$ ,  $v_{ijkc}^2$  und  $v_{ijkc}^3$  mittels des Verkehrsnachfragemodells zu berechnen. Darauf aufbauend kann die Änderung des internen Nutzens mittels der Numerischen Integration bestimmt werden. Dessen Monetarisierung mittels des Grenznutzens des Einkommens liefert die **Änderung der Konsumentenrente**:

$$\Delta KR_c = \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \frac{1}{\lambda_c} \cdot \begin{pmatrix} \left( v_{ijk}^O + v_{ijk}^3 \right) \cdot \left( ga_{ijk}^O - ga_{ijk}^3 \right) \\ + \left( v_{ijk}^3 + v_{ijk}^2 \right) \cdot \left( ga_{ijk}^3 - ga_{ijk}^2 \right) \\ + \left( v_{ijk}^2 + v_{ijk}^1 \right) \cdot \left( ga_{ijk}^2 - ga_{ijk}^1 \right) \\ + \left( v_{ijk}^1 + v_{ijk}^M \right) \cdot \left( ga_{ijk}^1 - ga_{ijk}^M \right) \end{pmatrix}. \quad (4.54)$$

Das Konzept der Numerischen Integration ist einfach, besitzt jedoch einen erhöhten Berechnungsaufwand. Daher sind die Notwendigkeit der Anwendung und die erforderliche Anzahl der Zwischenpunkte zu prüfen. Als Kriterium für die Differenziertheit der Numerischen Integration ist die erforderliche Genauigkeit der approximativen Nutzenberechnung gegenüber dem exakten Nutzenmaß vorzugeben. Als akzeptabel befinden NELLTHORP/HYMAN eine Abweichung von 10 %, für deren Einhaltung folgende Regel zur Anwendung der Numerischen Integration vorgeschlagen wird (vgl. [110] S. 8):

$$\frac{ga_{ijk}^M}{ga_{ijk}^O} \vee \frac{ga_{ijk}^O}{ga_{ijk}^M} \vee \frac{v_{ijk}^M}{v_{ijk}^O} \vee \frac{v_{ijk}^O}{v_{ijk}^M} \geq 33\% \quad \rightarrow NI. \quad (4.55)$$

Neben der Änderung der Generalisierten Aufwände wird zusätzlich die Abweichung der Verkehrsströme zwischen Mit- und Ohnefall betrachtet, da große Differenzen der Verkehrsströme ebenfalls zu fehlerhaften Ergebnissen bei der Anwendung der Halbierungsregel führen.

Die Anzahl der Zwischenpunkte richtet sich ebenfalls nach der prozentualen Änderung der Generalisierten Aufwände. Wird ein zusätzlicher Zwischenpunkt eingeführt, liefert die Numerische Integration akzeptable Ergebnisse bis zu einer Änderung von ca. 70 %. Bei noch größeren Abweichungen sind drei Zwischenpunkte zu berechnen, wobei der Ansatz grundsätzlich eine beliebige Anzahl an Zwischenpunkten erlaubt.

#### 4.2.3.2 Dreieck-Methode bei ungleichen Alternativenmengen

Die Problematik wird nachfolgend für die Erweiterung der Alternativenmenge im Mitfall erläutert. Infolge der Einführung eines neuen Verkehrsmittels oder durch die Erreichbarkeit eines neuen Ziels, sind für die entsprechende Alternative nur  $v_{ijk}^M$ ,  $ga_{ijk}^M$  und  $v_{ijk}^O = 0$  gegeben,  $ga_{ijk}^O$  hingegen nicht. Gleiches gilt, wenn die Alternative zwar im Ohnefall existiert, jedoch  $ga_{ijk}^O$  so hoch ist, dass die Alternative nicht nachgefragt wird ( $v_{ijk}^O = 0$ ). Für beide Fälle ist der gesamte interne Nutzen im Mitfall zu bestimmen, der durch die schraffierte Fläche in Abbildung 4-3 repräsentiert wird.

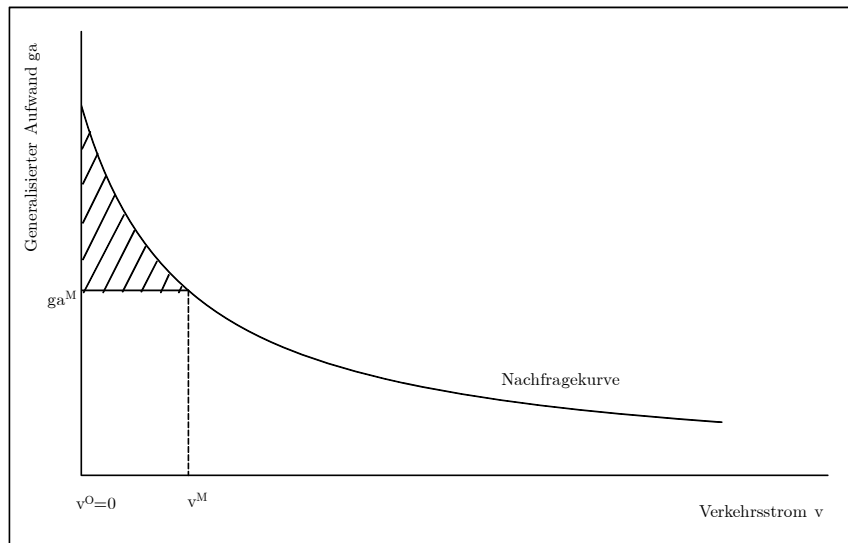


Abbildung 4-3: Interner Nutzen bei Einführung einer neuen Alternative

Zur Berechnung dieser Fläche ist folgendes uneigentliche Integral zu lösen:

$$\Delta E \left( \Phi_{ijkc}^* \right) = \left( \int_{-\infty}^{\bar{\Phi}_{ijkc}^M} P_{ijkc} \left( \bar{\Phi}_{A_c} \right) d\bar{\Phi}_{ijkc} \right) \cdot V_c = \int_{-\infty}^{\bar{\Phi}_{ijkc}^M} v_{ijkc} \left( \bar{\Phi}_{A_c} \right) d\bar{\Phi}_{ijkc}. \quad (4.56)$$

Aufgrund multipler Abhängigkeiten der Alternativen ist jedoch der Integrationspfad unbekannt und eine Näherungslösung notwendig. Hierfür schlagen NELLTHORP/HYMAN die „Dreieck-Methode“ vor, bei der, ausgehend von einem zu definierenden Hilfs-Ohnefall, die verbleibende Restfläche unterhalb der Nachfragekurve mit einem Dreieck genähert wird. Da die Einführung neuer Alternativen i. Allg. mit großen Aufwandsänderungen verbunden ist, erfolgt die Anwendung dieser Methode in Kombination mit der Numerischen Integration.

Die Approximation des gesamten internen Nutzens der Verkehrsteilnehmer einer neuen Alternative ist in Abbildung 4-4 unter Verwendung von fünf Zwischenpunkten grafisch dargestellt, wobei der Zwischenpunkt  $(ga^{hO}, v^{hO})$  dem Hilfs-Ohnefall entspricht. Bei dem Ansatz ist es von zentraler Bedeutung, jenen Aufwand möglichst genau zu nähern, bei dem die Nachfrage eingestellt wird. Es handelt sich dabei um den Prohibitiv-Aufwand, dessen **Näherungswert** in der Abbildung mit  $ga^{PN}$  gekennzeichnet ist.

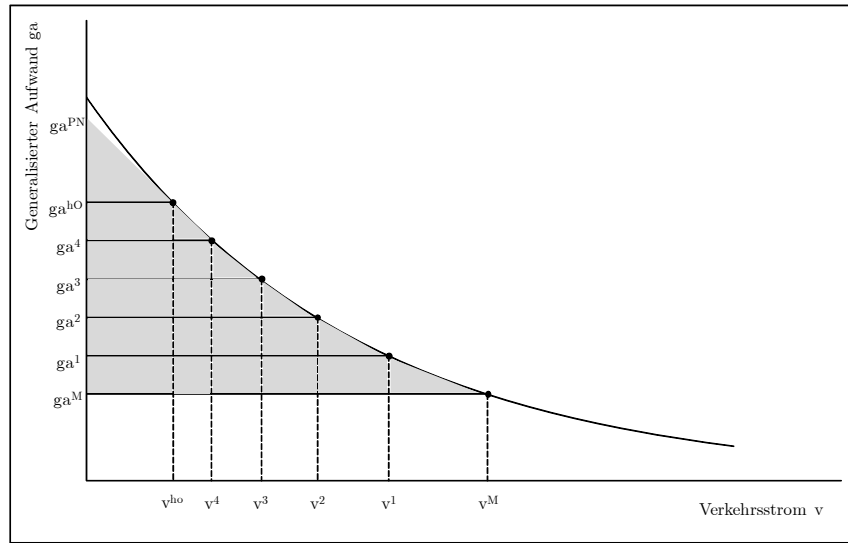


Abbildung 4-4: Numerische Integration bei Einführung einer neuen Alternative

Die Generalisierten Aufwände zur Bestimmung der Zwischenpunkte sind bis auf  $ga^{PN}$  wiederum äquidistant verteilt. Der Wert für  $ga^{PN}$  wird hingegen unter Zuhilfenahme der Zwei-Punkt-Form zur Bestimmung einer Geraden festgelegt. Unter Verwendung der Punkte  $(ga^{hO}, v^{hO})$  und  $(ga^4, v^4)$  kann die Gerade definiert werden:

$$ga = \frac{(ga^{hO} - ga^4)}{(v^{hO} - v^4)} \cdot v + ga^4 - \frac{(ga^{hO} - ga^4)}{v^{hO} - v^4} \cdot v^4. \quad (4.57)$$

Mit  $v^{PN} = 0$  kann  $ga^{PN}$  bestimmt werden:

$$ga^{PN} = ga^4 - \left( \frac{ga^{hO} \cdot v^4 - ga^4 \cdot v^4}{v^{hO} - v^4} \right). \quad (4.58)$$

Alle Teilstücke sind dann mittels der Halbierungsregel bestimmbar. Unter Beachtung des Grenznutzens des Einkommens ergibt sich schließlich die **Änderung der Konsumentenrente** durch:

$$\Delta KR_{ijkc} = \frac{1}{2 \cdot \lambda_c} \cdot \left( \begin{aligned} & v_{ijkc}^4 \cdot \left( - \left( \frac{ga_{ijkc}^{hO} \cdot v_{ijkc}^4 - ga_{ijkc}^4 \cdot v_{ijkc}^4}{v_{ijkc}^{hO} - v_{ijkc}^4} \right) \right) \\ & + (v_{ijkc}^4 + v_{ijkc}^3) \cdot (ga_{ijkc}^3 - ga_{ijkc}^4) + (v_{ijkc}^3 + v_{ijkc}^2) \cdot (ga_{ijkc}^2 - ga_{ijkc}^3) \\ & + (v_{ijkc}^2 + v_{ijkc}^1) \cdot (ga_{ijkc}^1 - ga_{ijkc}^2) + (v_{ijkc}^1 + v_{ijkc}^M) \cdot (ga_{ijkc}^M - ga_{ijkc}^1) \end{aligned} \right). \quad (4.59)$$

Für den Näherungswert  $ga^{PN}$  und damit die Genauigkeit des Ergebnisses besitzt die Festlegung des Hilfs-Ohnefalls eine große Bedeutung. NELLTHORP/HYMAN schlagen zur Bestimmung dieses Punktes folgende Regel vor (vgl. [110] S. 15):

$$ga_{ijkc}^{hO} = 3 \cdot ga_{ijkc}^M. \quad (4.60)$$

In verschiedenen Berechnungsbeispielen stellen die Autoren jedoch fest, dass stets ein Fehler von mindestens 10 % verbleibt. Als Hauptfehlerquelle wird der Bereich kleiner Aufwandswerte identifiziert, was Folge der äquidistanten Verteilung der Generalisierten Aufwände ist. NELLTHORP/HYMAN empfehlen daher weitere Untersuchungen, falls die Abweichung als zu groß bewertet wird (vgl. [110] S. 15).

#### 4.2.4 Einkommenseffekte und Nichtlinearitäten

Bisher wurden Einkommenseffekte infolge von Verkehrsprojekten nicht thematisiert, da ein Einkommenseffekt von Null Voraussetzung für die Eindeutigkeit der Konsumentenrente als monetäres Nutzenmaß ist. Die Annahme ist jedoch nur gerechtfertigt, wenn die Reisekosten relativ klein zum Einkommen sind (vgl. JARA-DÍAZ [76] S. 55). Das gilt nicht für die Verkehrsnachfrage:

- in Entwicklungsländern (siehe z. B. JARA-DÍAZ/VIDELA [78]),
- bei extensivem road pricing (vgl. DALY ET AL. [32] S. 2) und
- teuren Reisen (vgl. ABAY [1] S. 11).

Neben den genannten Fällen, in denen die Reisekosten einen signifikanten Anteil am Einkommen darstellen, werden häufig auch nichtlineare Transformationen der Reisekostenkomponente zur Erzielung besserer Modellierungsergebnisse verwendet (siehe Kapitel 3.2.2.3), die formal ebenfalls implizit Einkommenseffekte unterstellen. Entsprechend den Darstellungen in Kapitel 4.1 ist zur Abbildung von Einkommenseffekten jedoch das Einkommen als erklärende Variable in die Nutzenfunktion zu integrieren (vgl. IBÁÑEZ/BATLEY [73] S. 6). Die Vernachlässigung des Einkommens trotz nichtlinearer Transformationen wird in Kapitel 5.2.3.2 aus mikroökonomischer Sicht diskutiert.

Wenn Einkommenseffekte auftreten, dann stellt die Konsumentenrente kein exaktes Nutzenmaß dar. Die Mikroökonomie sieht in diesem Fall die Bestimmung der Kompensations- oder Äquivalenzvariation vor. Deren Berechnung führt jedoch im Rahmen der Verkehrsnachfragemodellierung zu theoretischen und praktischen Problemen. Zwar wurden auf dem Gebiet in den letzten Jahren zahlreiche Ansätze entwickelt (siehe z. B. MCFADDEN [104], KARLSTRÖM/MOREY [80] oder DE PALMA/KILANI [116]), diese sind jedoch für große Alternativenmengen derzeit noch nicht praktikabel. Die Entwicklung pragmatischer Ansätze stellt ein mikroökonomisches Grundlagenproblem dar, dessen Lösung nicht Gegenstand dieser Arbeit sein kann.



Es wird daher i. Allg. auch bei Einkommenseffekten auf das Konzept der Konsumentenrente als Näherungslösung zurückgegriffen. Dabei stellt der Grenznutzen des Einkommens  $\lambda$  das kritische Element dar. Zur Monetarisierung der Nutzenänderungen je Quelle-Ziel-Gruppe wird sowohl bei der Logsum-Differenz als auch bei der Halbierungsregel und der Numerischen Integration hierfür jeweils ein Wert benötigt. Bei nichtlinearen Zusammenhängen wird somit der Erwartungswert von  $\lambda$  für jede Quelle-Ziel-Gruppe  $c$  gesucht.

Ausgehend von folgender allgemeiner Nutzenfunktion:

$$\bar{\Phi}_{ijkc} = \beta_{rkc} \cdot f\left(y_{n_c} - rk_{ijkc}\right) + \beta_c \cdot \mathbf{X}_{ijkc} \quad (4.61)$$

resultiert der vom individuellen Einkommen und von den Reisekosten abhängige Grenznutzen des Einkommens:

$$\lambda_c\left(y_{n_c}, \mathbf{r}\mathbf{k}_c\right) = \frac{\partial \bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial y_{n_c}} = \beta_{rkc} \cdot \frac{df\left(y_{n_c} - rk_{ijkc}\right)}{dy_{n_c}}. \quad (4.62)$$

Der Erwartungswert lautet:

$$E\left(\lambda_c\left(y_{n_c}, \mathbf{r}\mathbf{k}_c\right)\right) = \beta_{rkc} \cdot E\left(\frac{df\left(y_{n_c} - rk_{ijkc}\right)}{dy_{n_c}}\right). \quad (4.63)$$

Zur Ermittlung des Erwartungswertes des Grenznutzens des Einkommens gibt es grundsätzlich mehrere Möglichkeiten:

- (1) arithmetischer Mittelwert des Ohne- oder Mitfalls,
- (2) gewichteter Mittelwert des Ohne- oder Mitfalls,
- (3) Mittelwert aus arithmetischen oder gewichteten Mittelwerten des Ohne- und Mitfalls.

#### Ad (1):

Die arithmetische Mittelwertbildung über alle Alternativen lautet:<sup>51</sup>

$$E\left(\lambda_c\left(y_{n_c}, \mathbf{r}\mathbf{k}_c\right)\right) = \beta_{rkc} \cdot E\left(\frac{df\left(y_{n_c} - rk_{ijk\tilde{k}c}\right)}{dy_{n_c}}\right) = \beta_{rkc} \cdot \frac{\sum_i \sum_j \sum_{\tilde{k}} \frac{df\left(y_{n_c} - rk_{ijk\tilde{k}c}\right)}{dy_{n_c}}}{|I| \cdot |J| \cdot |\tilde{K}|}. \quad (4.64)$$

$\tilde{k} = 1 \dots \tilde{K}$  Laufindex Verkehrsmittel mit Reisekosten

<sup>51</sup> Der Ausdruck  $|I|$  entspricht der Mächtigkeit der Menge  $I$ , d. h. der Anzahl der Elemente der Menge  $I$ .

**Ad (2):**

Die über die realisierten Verkehrsströme gewichtete Mittelwertbildung über alle Alternativen lautet:

$$\begin{aligned}
 E\left(\lambda_c\left(y_{n_c}, \mathbf{r}\mathbf{k}_c\right)\right) &= \beta_{rkc} \cdot E\left(\frac{df\left(y_{n_c} - rk_{ij\tilde{k}c}\right)}{dy_{n_c}}\right) \\
 &= \beta_{rkc} \cdot \frac{\sum_i \sum_j \sum_{\tilde{k}} \frac{df\left(y_{n_c} - rk_{ij\tilde{k}c}\right)}{dy_{n_c}} \cdot v_{ij\tilde{k}c}}{\sum_i \sum_j \sum_{\tilde{k}} v_{ij\tilde{k}c}}.
 \end{aligned} \tag{4.65}$$

**Ad (3):**

Liegen die Erwartungswerte sowohl für den Ohne- als auch den Mitfall vor, so ist ebenfalls der Mittelwert aus arithmetischen oder gewichteten Mittelwerten bestimmbar:

$$\bar{E}\left(\lambda_c\left(y_{n_c}, \mathbf{r}\mathbf{k}_c\right)\right) = \frac{E^O\left(\lambda_c\left(y_{n_c}, \mathbf{r}\mathbf{k}_c\right)\right) + E^M\left(\lambda_c\left(y_{n_c}, \mathbf{r}\mathbf{k}_c\right)\right)}{2}. \tag{4.66}$$

In der Literatur wird i. Allg. nur der Fall (1) betrachtet (vgl. z. B. KOHLI/DALY [82] S. 13 und HELMS [66] S. 187). Ein gewichteter Wert erscheint jedoch logischer, da er die Betroffenheit berücksichtigt.

Untersuchungen hinsichtlich der Genauigkeit der Änderung der Konsumentenrente bei Einkommenseffekten führten CHERCHI ET AL. in [28] durch. Die Autoren verglichen an einem einfachen Beispiel der Verkehrsmittelwahl Ergebnisse der Halbierungsregel mit denen der Kompensationsvariation. Sie stellten fest, dass ab einer 30-prozentigen Erhöhung der Reisekosten der Fehler der Änderung der Konsumentenrente signifikant wird, wenn gleichzeitig die Höhe der Reisekosten einer Alternative einem Anteil des individuellen Einkommens von über 25 % entspricht (vgl. CHERCHI ET AL. [28] S. 17). Zwar erlauben die Berechnungen keine endgültigen Schlussfolgerungen, jedoch scheint die Nutzenberechnung mittels der Änderung der Konsumentenrente für den (Regel-)Fall  $rk_{ijk} \ll y$  hinreichend genau zu sein.

#### 4.2.5 Aggregation der veränderten Konsumentenrenten

In Kapitel 2.5.3 wurde gezeigt, wie mittels einer sozialen Wohlfahrtsfunktion individuelle Nutzen zu einem sozialen Gesamtnutzen zusammengefasst werden können. Der Ansatz lässt sich hier auf die Aggregation der veränderten Konsumentenrenten je Quelle-Ziel-

Gruppe übertragen. Der monetäre Gesamtnutzen ergibt sich dann als Summe der gewichteten veränderten Konsumentenrenten:

$$\Delta KR = \sum_c \alpha_c \cdot \Delta KR_c . \quad (4.67)$$

Der soziale Gewichtungsfaktor  $\alpha$  ist durch den politischen Entscheidungsträger vorzugeben. Hierdurch ist es möglich, unterschiedliche Gewichte nach Wegezwecken zu vergeben. Von größerer Bedeutung ist jedoch, wenn die Quelle-Ziel-Gruppen zusätzlich nach Einkommensklassen unterteilt werden. Dann können die veränderten Konsumentenrenten der Personen unterschiedlicher Einkommensklassen differenziert gewichtet werden. Da der Grenznutzen mit steigendem Einkommen sinkt, liefert eine Nutzenänderung des gleichen Betrags bei hohem Einkommen eine höhere veränderte Konsumentenrente als bei niedrigem Einkommen. Eine Gleichgewichtung der veränderten Konsumentenrenten aller Quelle-Ziel-Gruppen mit  $\alpha = 1$  würde somit zu einer impliziten Gewichtung nach den Einkommen führen. Welche Gewichtung vorzunehmen ist, kann und darf jedoch nicht Gegenstand des Modellierers sein. Die Verantwortung hierfür liegt ausschließlich beim politischen Entscheidungsträger.

### 4.3 Ersparnisansatz

Neben der Änderung der Konsumentenrente besitzt, vor allem in der verkehrsplanerischen Praxis, der Ersparnisansatz eine Bedeutung zur Quantifizierung von Nutzenänderungen. Die Methodik zielt dabei auf die Bestimmung der projektinduzierten Ausgabenänderungen der Verkehrsteilnehmer ab und orientiert sich am Ressourceneinsatz. Aufgrund der hohen praktischen Bedeutung sollen das Konzept und damit verbundene Besonderheiten nachfolgend kurz vorgestellt werden.

#### 4.3.1 Konzept

Der Ersparnisansatz stellt ein pragmatisches mikroökonomisches Konzept zur Bewertung öffentlicher Güter und externer Effekte dar, da für diese Fälle oftmals keine Nachfragekurven und Marktpreise bekannt sind (vgl. HANUSCH [62] S. 76). Unabhängig davon führt eine Projektrealisierung jedoch zu beobachtbaren Kostenersparnissen, durch die Ressourcen freigesetzt werden. Diese Ersparnisse stellen ein Maß für den durch die Investitionsmaßnahme gestifteten Nutzen dar.<sup>52</sup>

---

<sup>52</sup> Es wird unterstellt, dass die Kostenersparnis in der alten Verwendung genau dem Wertzuwachs in der neuen Verwendung entspricht. Voraussetzung hierfür ist die Annahme der vollkommenen Konkurrenz, wodurch der Preis eines Produktionsfaktors in allen Verwendungen gleich ist. Er entspricht seinem Wertgrenzprodukt (vgl. HANUSCH [62] S. 84).

Grundlage des Ansatzes ist die Berechnung direkt messbarer Ersparnisse. Für die Verkehrsteilnehmer umfasst das alle entscheidungsrelevanten Aufwände, d. h. im Besonderen Reisezeit und Reisekosten. Die Ersparnisse werden aus den Gesamtaufwänden des Mit- und Ohnefalls berechnet. Formal gilt für den allgemeinen Gesamtaufwand je Quelle-Ziel-Gruppe  $c$ :

$$GA_c = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_r GA_{ijkrc} \quad \text{mit} \quad GA_{ijkrc} = v_{ijkrc} \cdot ga_{ijkrc}. \quad (4.68)$$

Die Ersparnis  $E_c$  ergibt sich dann:

$$E_c = GA_c^O - GA_c^M. \quad (4.69)$$

Die monetäre Einsparung je Quelle-Ziel-Gruppe mit veränderten Gesamtreisekosten  $\Delta RK_c$  und Gesamtreisezeiten  $\Delta RZ_c$  lautet demnach:

$$mE_c = \Delta RK_c + vtts_c \cdot \Delta RZ_c. \quad (4.70)$$

Hierbei bezeichnet  $vtts$  den Wert der Reisezeiteinsparung (value of travel time savings). Da auch in (4.70) die unterschiedlichen Bezugspersonen und der Fahrtzweck einen Einfluss auf  $vtts$  haben, erfolgt die Nutzenberechnung je Quelle-Ziel-Gruppe. Die Aggregation über alle Quelle-Ziel-Gruppen liefert den Gesamtnutzen.

Der Wert der Reisezeiteinsparung wird beim Ersparnisansatz i. Allg. extern vorgegeben, allerdings ist es theoretisch möglich, den subjektiven Wert des Verkehrsnachfragemodells ( $svtts$ ) hierfür heranzuziehen. Erfolgt im Verkehrsnachfragemodell die Berücksichtigung von Einkommenseffekten, so ist, analog den Ausführungen in Kapitel 4.2.4, ein Erwartungswert des Grenznutzens des Einkommens zu bilden, der zur Bestimmung des Erwartungswertes für  $svtts$  heranzuziehen ist. Aufgrund der ansatzimmanenten disaggregierten Bestimmung der Gesamtaufwandsänderungen je Aufwandskomponente ist die Zerlegung des Gesamtnutzens nach den Aufwandskomponenten und den Verkehrsmitteln a priori gewährleistet.

### 4.3.2 Induzierter Verkehr beim Ersparnisansatz

Der Ansatz weist bezüglich der Bewertung des induzierten Verkehrs einige Besonderheiten auf, die zu beachten sind. Zur Erläuterung dient Abbildung 4-5, in der die Nachfragekurve eines Verkehrsstroms in Abhängigkeit der Reisezeit dargestellt ist.<sup>53</sup>

---

<sup>53</sup> Die Betrachtung nur eines Aufwands ermöglicht eine einfachere Nachvollziehbarkeit der Berechnung der Einsparung der originären Größen, die bei dem Ansatz die Grundlage der Nutzenberechnung darstellen. Die Verkehrsnachfrage ist jedoch, wie bisher stets angenommen, von weiteren Einflussgrößen, die untereinander gewichtet sind, abhängig.

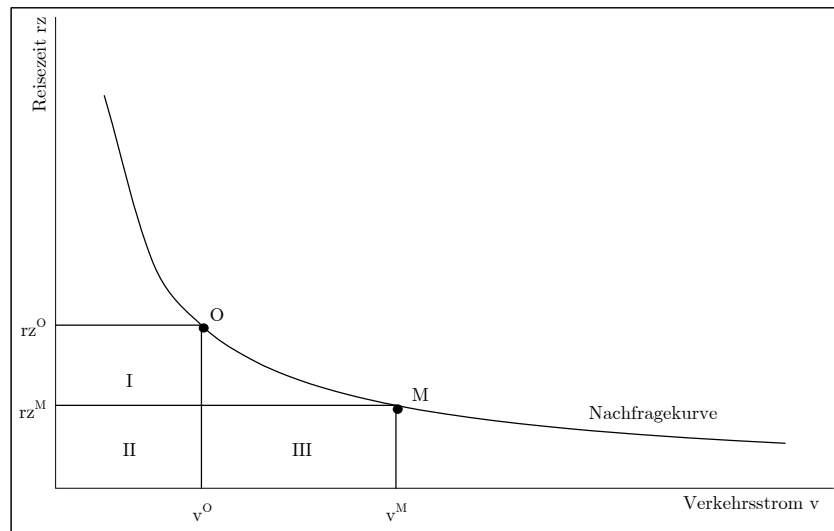


Abbildung 4-5: Ersparnisansatz und induzierter Verkehr

Ausgangspunkt ist die Gleichgewichtssituation des Ohnefalls  $O$ , in der die Verkehrsnachfrage  $v^O$  realisiert wird. Infolge einer Verkehrsinvestition sinkt  $rz^O$  auf  $rz^M$ , wodurch die Verkehrsnachfrage auf  $v^M$  steigt. Der Ressourcenverbrauch an Reisezeit wird für den Ohnefall durch die Summe der Flächen I und II und für den Mitfall durch die Summe der Flächen II und III repräsentiert. Während für den verbleibenden Verkehr ( $v^O$ ) eine Einsparung in Höhe der Fläche I resultiert, verursacht der induzierte Verkehr ( $v^M - v^O$ ) zusätzliche Reisezeitaufwendungen (Fläche III). Für den betrachteten Verkehrsstrom übersteigen die Reisezeiten des induzierten Verkehrs die Einsparung des verbleibenden Verkehrs und es entsteht auf dieser Relation ein negativer Nutzen.

Der induzierte Verkehr setzt sich aus verlagertem Verkehr und ggf. Neuverkehr zusammen. Der verlagerte Verkehr umfasst dabei jene Verkehrsteilnehmer, die im Ohnefall andere Relationen nutzten. Der dort reduzierte Verkehr führt zu Reisezeiteinsparungen in Höhe der Ausgaben im Ohnefall, wodurch auf diesen Relationen ein entsprechender projektinduzierter Nutzen resultiert.

Die Summierung der (monetarisierten) Ressourcenverbräuche über alle Relationen und alle Aufwandsgrößen im Ohne- und Mitfall und deren Saldierung ergibt die gesamte Nutzenänderung der Verkehrsteilnehmer. Dieses Ergebnis führt jedoch i. d. R. zu einer Unterschätzung des tatsächlichen Nutzens, da nur die im Verkehr realisierten Einsparungen betrachtet werden. Der Nutzen des induzierten Verkehrs, der durch die verbesserten Erreichbarkeiten (z. B. weiter entfernter Ziele) erzielt wird, geht nicht in die Berechnung ein. Dieser zusätzliche Nutzensgewinn müsste durch die Quantifizierung und Saldierung des von den Verkehrsteilnehmern am Ziel ihrer Ortsveränderung erfahrenen Nutzens bestimmt werden. Allgemein bedeutet das, dass es erforderlich wäre, alle Interdependenzzusammenhänge der Verkehrsmaßnahme zu erfassen, was jedoch praktisch kaum möglich ist (vgl. FEST [49] S. 67).

## 4.4 Einschätzung und Vergleich der Bewertungsansätze

Die vorgestellten Bewertungsansätze sollen nachfolgend gegenübergestellt werden. Tabelle 4-1 beinhaltet eine entsprechende Übersicht bezüglich verschiedener Bewertungskriterien. Mit Ausnahme der drei ersten Kriterien findet eine dreistufige Bewertungsskala Anwendung. Neben der tabellarischen Bewertung werden zusätzlich kurze Einschätzungen getroffen.

Kriterium	Logsum-Differenz	Halbierungsregel	Numerische Integration/ Dreieck-Methode	Ersparnisansatz
Ergebnis	$\Delta KR$	$\Delta KR$	$\Delta KR$	$\Delta E$
Bewertungspräferenzen	intern	(intern)	(intern)	(intern)
Verkehrsnachfragemodell	Logit	k. R.	k. R.	k. R.
Theoriekonsistenz	+	0	0	0
induzierter Verkehr	+	+	+	-
Einkommenseffekt	-	-	-	-
neue Alternativen	+	-	+	+
Genauigkeit	+	0	+	0
Zerlegbarkeit	-	+	+	+
Anschaulichkeit	-	+	+	+
Berechnungsaufwand	+	0	-	0
Harmonisierbarkeit	+	+	+	+

*Legende: +: Vorteil, -: Nachteil, 0: neutral, k. R.: keine Restriktion,*

*Tabelle 4-1: Vergleich der Bewertungskonzepte*

### Logsum-Differenz:

Die Logsum-Differenz zur Berechnung der Änderung der Konsumentenrente erfordert die Verkehrsnachfrageberechnung mittels des Logit-Modells. Die Bewertungspräferenzen der Verkehrsnachfragemodellierung fließen unmittelbar in die Berechnung ein, weshalb eine externe Vorgabe nicht erforderlich ist. Hierdurch wird eine theoriekonforme Bewertung gewährleistet. Einkommenseffekte stellen ein grundsätzliches Problem im Rahmen der Berechnung der Konsumentenrente dar, weshalb hierfür bei der Berücksichtigung dieser Effekte für die Verkehrsnachfrage Näherungslösungen für den Grenznutzen des Einkommens verwendet werden müssen.

Ein Vorteil des Ansatzes ist die sehr einfache Berechnen- und Umsetzbarkeit. Aus praktischer Sicht steht dem jedoch der Nachteil der Unfähigkeit der Zerlegbarkeit der Nutzen nach den Nutzenkomponenten und den Verkehrsmitteln gegenüber. Dies ist zwar mikroökonomisch irrelevant, jedoch erscheint das für eine praktische Anwendung von Bedeutung. Aufgrund der theoretischen Konsistenz durch die direkte Integrierbarkeit des Verkehrsnachfragemodells und der Nutzung interner Präferenzen bietet der Ansatz gute Voraussetzungen für die Harmonisierung der Bewertungsansätze.

**Halbierungsregel:**

Die Halbierungsregel ist eine Näherungslösung zur Bestimmung der Änderung der Konsumentenrente und ist somit a priori fehlerbehaftet. Die Abweichung vom exakten Ergebnis hängt dabei von der Form der Verkehrsnachfragekurve ab. Hinsichtlich der Einkommenseffekte gelten die gleichen Einschränkungen wie bei der Logsum-Differenz. Bezüglich der Bewertungspräferenzen ist festzuhalten, dass diese aus dem Verkehrsnachfragemodell verwendet werden können. In Kapitel 4.2.2 wurde dieses Vorgehen vor dem Hintergrund der Harmonisierung bereits dargestellt. Das ist jedoch keineswegs der in der Literatur vorherrschende Weg.

Ein Vorteil der Halbierungsregel gegenüber dem Logsum-Ansatz ist die Unabhängigkeit vom Logit-Modell. Es ist grundsätzlich möglich, die Änderung der Konsumentenrente mittels der Halbierungsregel für jedes Verkehrsnachfragemodell anzuwenden. Es ist allerdings zu beachten, dass hieraus ggf. kein mikroökonomisch konsistentes Ergebnis resultiert. Genügt die Verkehrsnachfrageberechnung den mikroökonomischen Anforderungen nicht, so ist das Resultat der Halbierungsregel lediglich intuitiv begründet. Als Nachteil ist anzusehen, dass das Konzept bei Einführung neuer Alternativen scheitert.

Im Gegensatz zur Logsum-Differenz ist eine Zerlegung der Änderung der Konsumentenrente problemlos möglich, wodurch sich eine höhere Anschaulichkeit des Ergebnisses ergibt. Dies ist aus der Perspektive der Praxis von Vorteil. Der Berechnungsaufwand hängt von der Alternativenanzahl ab, ist aber stets höher als bei der Logsum-Differenz. Eine Harmonisierung mit der Bewertung der Verkehrsnachfrage ist einwandfrei gewährleistet, wenn die internen Präferenzen der Verkehrsteilnehmer Eingang finden. Zur vollständigen mikroökonomischen Konsistenz sind zusätzliche Bedingungen des Verkehrsnachfragemodells zu erfüllen (siehe Kapitel 4.1).

**Numerische Integration / Dreieck-Methode:**

Die erweiterten approximativen Ansätze sind Weiterentwicklungen der Halbierungsregel und weisen daher grundsätzlich die gleichen Eigenschaften auf. Durch die Ansätze werden jedoch eine höhere Genauigkeit und die Möglichkeit der Bewertung neu eingeführter Alternativen gewährt. Den Vorteilen steht jedoch der Nachteil des höheren Berechnungsaufwands gegenüber. Die von NELLTHORP/HYMAN entwickelten Methoden sind einfach und praktikabel, bedürfen jedoch, wie die Autoren selbst feststellen, noch weiterer Entwicklungen.

**Ersparnisansatz:**

Der Ersparnisansatz stellt ein pragmatisches Verfahren dar, welches eine Nutznäherung über Umwege erzielt. Die Zerlegbarkeit der Ersparnisse ist problemlos durchführbar. Der Berechnungsaufwand ist äquivalent zur Halbierungsregel und abhängig von der Anzahl der Alternativen. Unter Verwendung des modellinternen subjektiven Wertes der Reisezeiteinsparung ist eine harmonisierte Bewertung möglich. Zu beachten ist die Bewertung des

induzierten Verkehrs, da diese zu einer Nutzenunterschätzung führt, die nur durch eine zusätzliche Nutzenerfassung (am Ziel) kompensiert werden kann. Das erscheint derzeit nicht praktikabel, weshalb der Ansatz (ohne die zusätzliche (externe) Nutzenerfassung) nur dann Anwendung finden sollte, wenn infolge eines Verkehrsprojekts kein oder nur geringer induzierter Verkehr zu erwarten ist.

## 4.5 Wert der Reisezeiteinsparung

Die Realisierung einer Verkehrsinvestition geht nahezu immer mit einer Änderung der Reisezeiten der Verkehrsteilnehmer einher. Der dadurch hervorgerufene Nutzen stellt i. d. R. einen großen Nutzenanteil in der Bewertung der Investition dar. Im Rahmen der NKA ist dieser Nutzen zu monetarisieren, wofür ein geeigneter Wertansatz benötigt wird. Die Bestimmung und die Höhe dieses Wertes der Reisezeiteinsparung stellt ein viel untersuchtes und diskutiertes Forschungsfeld dar.<sup>54</sup> Es ist im Rahmen dieser Arbeit daher nicht möglich, die Thematik ausführlich zu behandeln, sondern kann nur kurz umrissen werden. Für einen umfassenden Einblick sei z. B. auf LÜTHI [93] und PAULUBEN [117] verwiesen.

Mit der allgemeinen Frage nach dem Wesen und dem Wert der Zeit setzten sich zahlreiche wissenschaftliche Disziplinen auseinander, wobei die Sichtweisen z. T. sehr differieren (vgl. PAULUBEN [117] S. 16 ff.). Eine dieser Wissenschaften ist die Ökonomie. Deren Zeitwertforschung versucht, den individuellen Wert der Reisezeiteinsparung zu ermitteln. Die Problematik ist somit Gegenstand der Mikroökonomie.<sup>55</sup> Basis für die Überlegungen auf diesem Gebiet stellen vor allem die theoretischen Arbeiten auf dem Gebiet der Zeitallokationstheorie von BECKER [12] und DESERPA [35] dar, deren Ansätze durch zahlreiche Untersuchungen Verfeinerungen und Anpassungen an spezielle Fragestellungen erfuhren.

Alle diese Ansätze weisen die gemeinsame zentrale Annahme auf, dass die Zeit bei vielen ökonomischen Aktivitäten eine bedeutende Rolle spielt und eine knappe individuelle Ressource ist. Aus diesem Grund wurde der allgemeine Ansatz des individuellen Optimierungsprogramms der Ressourcenallokation (siehe Kapitel 2.2) um eine zusätzliche Zeitrestriktion (und weitere technologische Restriktionen) erweitert. Die sich daraus ergebenden Nachfragefunktionen und die indirekte Nutzenfunktion stellen Resultate der Nutzenmaximierung unter Beachtung der zur Verfügung stehenden Einkommens- und Zeitbudgets dar.

---

<sup>54</sup> Weitgehend Einigkeit herrscht über den Wert der Reisezeiteinsparung des Wirtschaftsverkehrs. Hier wird entsprechend der Grenzproduktivitätstheorie der Lohnsatz verwendet (vgl. PAULUBEN [117] S. 29 f.).

<sup>55</sup> Lange Zeit wurden makroökonomische Ansätze zur Bestimmung der Werte genutzt, die jedoch keine verhaltensorientierte Betrachtung beinhalten. Aus theoretischer Sicht sind diese Ansätze abzulehnen, da sie aufgrund ihrer „Globalbetrachtung“ keinen Bezug zum Individuum besitzen.



Die Überlegungen lassen sich auf das Optimierungsprogramm unter Beachtung einer diskreten Verkehrsalternative übertragen. Dabei gehen die Reisezeiten – analog den Reisekosten – nicht als Alternativencharakteristikum, sondern über die Zeitbudgetrestriktion in die bedingte indirekte Nutzenfunktion ein. Diesbezüglich erste Untersuchungen führten TRAIN und MCFADDEN [144] am Beispiel eines Verkehrsmittelwahlmodells für Wege zur Arbeit durch. Ziel war die mikroökonomische Begründung des Einflusses des Lohnsatzes der Erwerbstätigen in der bedingten indirekten Nutzenfunktion.

Ein weiterer, in der derzeitigen Praxis bedeutenderer Ansatz wurde von TRUONG und HENSHER [145] abgeleitet und von BATES [9] berichtigt. Hierbei werden neben dem allgemeinen Zeitbudget weitere technologische Nebenbedingungen eingeführt, die untere minimale Zeitgrenzen für die Durchführung einer Fahrt festlegen. Die Reisezeit findet als unerwünschte Größe Eingang in das Optimierungsprogramm, wodurch ein Nutzengewinn durch die Reduzierung der Reisezeit – und eine damit einhergehende Erhöhung der Freizeit – erklärt wird. Das Ergebnis dieses Ansatzes weist die formale Struktur der in Kapitel 4.1.1.1 abgeleiteten linearen bedingten indirekten Nutzenfunktion auf. Die Reisezeitpräferenzen dieses Funktionstyps geben folglich ein zeitallokationstheoretisch begründetes individuelles Verhalten unter Beachtung des allgemeinen Zeitbudgets an.

Die Berücksichtigung zeitallokationstheoretischer Überlegungen in Modellen der Zufallsnutzenmaximierung ist sehr komplex und nicht primärer Gegenstand dieser Arbeit. Es ist gerade vor dem Hintergrund nichtlinearer Reisezeitpräferenzen noch viel Forschungsarbeit zu leisten. Einige erste Ansätze finden sich z. B. in BLAYAC [15], BLAYAC/CAUSSE [16] und JARA-DÍAZ/VIDELA [78].

Neben den theoretischen Betrachtungen ist vor allem die empirische Ermittlung des Wertes der Reisezeiteinsparungen von großer Bedeutung. Hierfür gibt es eine Vielzahl verschiedener Ansätze, wobei der Zahlungsbereitschaftsansatz „[...] *im Einklang mit den theoretischen Grundgedanken*“ steht (PAULUBEN [117] S. 145). Bei diesem Ansatz werden anhand des beobachteten oder geäußerten Verhaltens<sup>56</sup> der Verkehrsteilnehmer individuelle Nutzenfunktionen konstruiert, mit denen Wertausdrücke für Reisezeiteinsparungen (Zahlungsbereitschaften) abgeleitet werden können.

Da auch im Rahmen der Zeitwertforschung der Gesamtnutzen der Verkehrsteilnehmer für den Modellierer eine Zufallsgröße darstellt, werden ebenfalls Zufallsnutzenmodelle zur Nachbildung des Entscheidungsverhaltens herangezogen. Unter der Annahme der speziellen Wahrscheinlichkeitsverteilung der stochastischen Nutzenkomponente können mittels spezieller Schätzalgorithmen die wahrscheinlichsten Präferenzparameter bestimmt

---

<sup>56</sup> Am häufigsten kommen dabei sogenannte Stated-Preference-Befragungen zur Anwendung, bei denen den Probanden eingeschränkte Entscheidungssituationen zur Auswahl gestellt werden.

werden.<sup>57</sup> Das Verhältnis der Grenznutzen der Reisezeit und des Einkommens gibt dann den wahrscheinlichsten *svtts* an (siehe Kapitel 4.1.1).

Die Größe des *svtts* ist von zahlreichen Einflüssen abhängig, was eine gesonderte Bestimmung für unterschiedliche Untersuchungsgebiete erfordert. Aus diesem Grund gibt es eine unüberschaubare Anzahl an Studien, die sich mit dieser Thematik empirisch auseinandersetzen. Bedeutende, landesweite Studien, die der Bestimmung der Wertansätze zur Monetarisierung von Reisezeiteinsparungen in NKAs dienen, sind z. B. MACKIE ET AL. [97] für Großbritannien, FOSGERAU ET AL. [54] für Dänemark und KÖNIG ET AL. [84] für die Schweiz.

In allen diesen Studien hängt der *svtts* signifikant von der Höhe des individuellen Einkommens ab. Weitere bedeutende Einflussgrößen sind z. B. Reisezweck, Reiseweite und das verwendete Verkehrsmittel (Komfort, Sicherheit etc.). Für standardisierte Bewertungsverfahren im Verkehrswesen werden die einkommensabhängigen Werte der Reisezeiteinsparungen jedoch i. Allg. zu einem einheitlichen gewichteten Wert zusammengefasst (siehe Kapitel 4.6). Aus theoretischer Sicht ist dies problematisch, da es gegen das fundamentale Prinzip der NKA verstößt, wonach der Nutzen mittels der individuellen Zahlungsbereitschaften zu bestimmen ist.

In der nachfolgenden Tabelle sind beispielhaft einige aktuelle Zeitwerte zusammengestellt. Die Werte stammen aus einer umfangreichen Metaanalyse, in der je Land die Ergebnisse unterschiedlicher länderspezifischer Studien statistisch ausgewertet und verglichen wurden.

Land/Region	Verkehrsmittel	Zeitwerte [Euro/h]			
		Pendeln		andere Fahrt	
		Stadt	Überland	Stadt	Überland
Deutschland	Zug/Pkw	9,48	12,18	7,95	10,21
	Bus	6,82	8,75	5,72	7,34
Großbritannien	Zug/Pkw	10,24	13,15	8,59	11,03
	Bus	7,36	9,45	6,17	7,93
Schweiz	Zug/Pkw	12,22	15,69	10,24	13,15
	Bus	8,78	11,28	7,36	9,46
EU-25	Zug/Pkw	10,29	13,21	8,63	11,08
	Bus	7,40	9,50	6,20	7,96

Tabelle 4-2: Zeitwerte je Fahrtzweck und Verkehrsmittel für ausgewählte Länder – Preisstand 2003  
(Quelle: SHIRES/DE JONG [129] S. 22 ff.)

<sup>57</sup> Die im Rahmen von Zeitwertstudien gewonnenen Präferenzparameter der Nutzenfunktionen der Verkehrsteilnehmer bilden häufig auch eine wichtige Informationsquelle für Verkehrsnachfragemodelle. Im Idealfall sind beide Modellansätze und die verwendeten Präferenzen identisch.

## 4.6 Standardisierte Bewertungsverfahren

Die bisherigen Ausführungen beinhalteten die zu beachtenden mikroökonomischen Randbedingungen und die Beleuchtung möglicher Konzepte für eine konsistente Berechnung der Änderung des internen Nutzens. In welchem Maße die in der Praxis angewandten standardisierten Bewertungsverfahren diesen Anforderungen genügen, soll nachfolgend erläutert werden.

Standardisierte Bewertungsverfahren im Verkehrswesen stellen relativ exakt vorgeschriebene und nachvollziehbare Verfahren dar, welche i. d. R. durch Empfehlungen oder Richtlinien eine besondere Geltung erlangt haben (vgl. LOHSE [88] S. 405). Das Festschreiben einer bestimmten Methodik erlaubt den Vergleich unterschiedlicher zu bewertender Maßnahmen, die um die knappen Ressourcen der Gesellschaft konkurrieren.

### 4.6.1 Einige ausgewählte Verfahren

Neben den drei deutschen standardisierten Bewertungsverfahren sollen zusätzlich Verfahren, die in der Schweiz und in Großbritannien zur Anwendung kommen, betrachtet werden. Die schweizer Richtlinie stellt das im deutschsprachigen Raum momentan aktuellste Verfahren dar. Der Grund für die Einbeziehung des britischen Verfahrens ist die britische Vorreiterstellung auf dem Gebiet der Anwendung der NKA im Verkehrswesen. MACKIE und KELLY kommen im Zuge der Auswertung einer europäischen Vergleichsstudie (HEATCO [65]) zum Schluss: „*The UK remains at the forefront of the use of CBA to inform decision making*” ([98] S. 18).

In Tabelle 4-3 sind die Richtlinien gegenübergestellt. Die Kriterien beziehen sich dabei nur auf Aspekte bezüglich der Bestimmung der Änderung des monetären internen Nutzens und vor dem Hintergrund einer möglichen harmonisierten Bewertung. Es ist zu beachten, dass für die methodische Gegenüberstellung der Verfahren die Nutzenermittlung **eines** Jahres betrachtet wird. Der gesamte Bewertungszeitraum für Verkehrsinvestitionen umfasst i. d. R. viele Jahre, der häufig vereinfachend als statisch betrachtet wird. Hierdurch ist die Extrapolation der Ergebnisse des berechneten Jahres möglich. Sind signifikante zeitliche Änderungen der Verkehrsnachfrage zu erwarten, müssen allerdings weitere Berechnungen durchgeführt werden.

Kriterium	Deutschland			Schweiz	Großbritannien
	EWS	SB	BVWP	VSS-Norm	TAG (TUBA)
Bewertungsgegenstand	Straße	ÖPNV	Straße, Schiene, Wasserstraße	Straße	Straße, Schiene, ÖPNV, u. a.
Verkehrsnachfrageberechnung	nicht integriert	integriert	integriert	nicht integriert	nicht integriert
Bestimmung der Änderung des internen Nutzens	EA	HR, EA	EA, Zuschlag	HR	HR, NI
Bewertung des induzierten Verkehrs	(ja)	ja	ja	ja	ja
Anzahl Zeitabschnitte pro Jahr (modelliert)	15 (1)	1 (1)	1 (1) 360 (1)	3 (3)	5 (5)
Bewertungsebene	Strecke	Verkehrsstrom	Strecke	Verkehrsstrom	Verkehrsstrom
vtts-Bestimmung	makro-ökonomisch	in Anlehnung an BVWP	ZB	ZB	ZB
vtts-Einteilung	Pkw, Bus, Tag	Schüler, Erwachsene	Verkehrsmittel	Fahrtzweck, Distanz, Verkehrsmittel	Pendeln, andere Fahrtzwecke

*Legende: EA: Ersparnisansatz, HR: Halbierungsregel, NI: Numerische Integration, ZB: Zahlungsbereitschaft*

*Tabelle 4-3: Gegenüberstellung ausgewählter standardisierter Bewertungsverfahren*

### **EWS – Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen [50]**

Die EWS sind eine von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen im Jahre 1997 herausgegebene Empfehlung zur Durchführung einer NKA für Straßenbauinvestitionen. Die Verkehrsnachfrageberechnung ist nicht Gegenstand der EWS. Es wird lediglich darauf hingewiesen, dass die Berechnung der zu prognostizierenden Verkehrsnachfrage stets auf der Grundlage einer Verkehrsuntersuchung zu erfolgen hat, die auf der Verkehrsanalyse basiert. Falls bei einem Ausbau einer bestehenden Strecke nur geringe Auswirkungen auf anderen Streckenabschnitten des Netzes zu erwarten sind, wird auch eine einfache Trendprognose als akzeptabel angesehen (vgl. S. 11).

Die Methodik zur Bestimmung der Änderung des internen Nutzens erfolgt auf Basis des Ersparnisansatzes, wobei die für den Mitfall berechnete Fahrtenmatrix sowohl auf das Mit- als auch auf das Ohnefallverkehrsnetz umgelegt wird. Dadurch wird jedoch der Kausalzusammenhang, der zum induzierten Verkehr führt, missachtet. Es können hierdurch viel zu hohe Aufwände im Ohnefall entstehen, da gerade im Bereich hoher Sättigungsgrade bereits wenige zusätzliche Fahrzeuge zu einer starken Erhöhung des Aufwands führen können. Die Verwendung dieses Ansatzes führt zu z. T. erheblichen Nutzenüberschätzungen (vgl. NEUBURGER [111] S. 55).

Der schwankenden Verkehrsnachfrage eines Jahres wird in den EWS durch die Unterteilung in drei verschiedene Tagesgruppen (Normalwerktage, Urlaubswerktage, Sonn- und Feiertage) mit jeweils fünf verschiedenen Zeitabschnitten Rechnung getragen. Daraus resultieren 15 Zeitabschnitte „[...] mit annähernd gleichartigem Verkehrsablauf“ (S. 19). Die Verkehrsnachfrage jedes Zeitabschnitts wird, aufbauend auf einem modellierten 24-Stundenwert, mittels vorgegebener, empirisch bestimmter Faktoren abgeschätzt.

Die Aufwandsersparnisse (Reisekosten, Reisezeit) werden für alle Stunden jedes Zeitabschnitts als Differenz aus dem Mit- und Ohnefall gebildet und anschließend summiert. Grundlage dafür sind die Verkehrsstärken der einzelnen Streckenabschnitte des Verkehrsnetzes. Zur Monetarisierung der Reisezeiteinsparungen wird ein makroökonomisch hergeleiteter Ansatz verwendet. Dieser geht davon aus, dass das Volkseinkommen in Deutschland im Jahre 1992 jeweils zur Hälfte durch die Erwerbstätigen und durch die Leistungen der Gesamtbevölkerung erzielt wurde (vgl. FGSV [51] S. 64). Zur Berücksichtigung unterschiedlicher Reisezeitkosten privater Pkw-Nutzer und Buspassagiere<sup>58</sup> werden hierfür unterschiedliche Wertansätze verwendet. Darüber hinaus erfolgt für Pkw-Nutzer eine Unterscheidung der Wertansätze in Werkstage und Sonn- und Feiertage. Die Wertansätze an Sonn- und Feiertagen entsprechen dabei genau der Hälfte der Werkstage.<sup>59</sup>

### **SB – Standardisierte Bewertung von Verkehrsweginvestitionen des ÖPNV (Version 2006) [75]**

Die SB ist ein von Intraplan Consult GmbH und dem Verkehrswissenschaftlichen Institut Stuttgart GmbH im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung erstelltes standardisiertes Bewertungsverfahren zur Gesamtbewertung von Investitionen des ÖPNV. Mit diesem Verfahren wird die Fördermöglichkeit von Vorhaben nach dem Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz geprüft. Die SB umfasst neben einer NKA einen nutzwertanalytischen Ansatz, der weitere nicht monetarisierbare Wirkungen erfasst.

Neben dem Bewertungsverfahren ist in der SB die Methodik zur Berechnung der Verkehrsnachfrage festgeschrieben. Grundsätzlich wird bei dem Verfahren nur zwischen den Verkehrsmitteln ÖPV und MIV sowie den Personengruppen „Erwachsene“ und „Schüler“ unterschieden (vgl. S. 32).

Die Verkehrsnachfrageberechnung umfasst zum einen ein inkrementelles Verkehrsmittelwahlmodell für den ÖPV und den MIV, welches auf den entsprechenden Verkehrstrommatrizen des Ohnefalls basiert, zum anderen einen Ansatz zur Abschätzung des Neuverkehrs des ÖPV. Der intermodal verlagerte Verkehr und der Neuverkehr werden

---

<sup>58</sup> Der Wertansatz für die Buspassagiere ist in den EWS nicht explizit angegeben, sondern mit den Lohnkosten des Fahrers vermischt.

<sup>59</sup> Für ausführliche Erläuterungen bezüglich der Wertansätze zur Monetarisierung der Reisezeiteinsparungen siehe FGSV [51].

darüber hinaus nur für Erwachsene bestimmt. Für den Schülerverkehr wird eine konstante Verkehrsmittelwahl und, ebenso wie für die Erwachsenen, eine konstante Zielwahl unterstellt (vgl. S. 44). Der Schülerverkehr kann lediglich seine Routenwahl ändern.

Die in der SB ermittelte Änderung des internen Nutzens ergibt sich durch Reisezeiteinsparungen im ÖPV und durch eingesparte MIV-Betriebskosten des zum ÖPV verlagerten MIV (vgl. S. 63 ff.). Für die Bewertung werden konstante Reisekosten und Reisezeiten des MIV unterstellt. Reisekosten im ÖPV werden nicht betrachtet. Zur Berechnung des Nutzens infolge der Reisezeiteinsparungen schreibt die SB seit der Überarbeitung im Jahre 2006 die Verwendung der Halbierungsregel vor.

Die Berücksichtigung eingesparter MIV-Betriebskosten, durch vom MIV zum ÖPV verlagerte Fahrten, führt jedoch zu **Doppelzählungen**, woraus systematische Nutzenüberschätzungen resultieren. Der Grund dafür ist, dass der Nutzen der Betriebskosteneinsparungen bereits in der veränderten Konsumentenrente, die unterhalb der Verkehrsnachfragekurve des ÖPV bestimmt wurde, enthalten ist.<sup>60</sup> Gehen eingesparte MIV-Betriebskosten in die Berechnung ein, so ist für alle Aufwände – auch für die nicht berücksichtigten Reisekosten des ÖPV – der Ersparnisansatz zu verwenden.

Die Nutzenänderung wird auf der Grundlage der Verkehrsströme des ÖPV und MIV eines durchschnittlichen Werktages bestimmt und mit konstanten Faktoren auf Jahreswerte hochgerechnet. Dabei wird – ohne nähere Erläuterungen – für Schüler der Wert 250 und für Erwachsene der Wert 300 verwendet (vgl. S. 65). Die gesonderte Berechnung durchschnittlicher Samstage und Sonn- und Feiertage wird als zu aufwendig erachtet (vgl. S. 20).

Zur Monetarisierung der Reisezeitreduzierung im ÖPV werden für Schüler und Erwachsene zwei unterschiedliche Wertansätze bereitgestellt, wobei der Wert für Erwachsene fast dreimal höher ist. Eine nähere Erläuterung zur Bestimmung der Wertansätze wird nicht gegeben, bis auf den Hinweis, dass sie „[...] in Anlehnung an das Verfahren der BVWP festgelegt [...]“ sind (S. 82). In diesem Zusammenhang interessant ist die Annahme in der SB, dass kleine Reisezeitdifferenzen einen geringeren Nutzen liefern und daher bis zu einer Höhe von fünf Minuten vermindert in die Berechnung eingehen (vgl. S. 64).

### **BVWP – Bundesverkehrswegeplan 2003 [19]**

Der BVWP stellt einen Investitionsrahmenplan und ein Planungsinstrument der deutschen Bundesregierung dar. Er umfasst Investitionen für die Verkehrsträger Straße, Schiene und Wasserstraße. Den Kern des gesamtwirtschaftlichen Bewertungsverfahrens zur Aufstellung des BVWP stellen verkehrsträgerspezifische NKAs dar. Privater Personenverkehr und der damit verbundene Nutzen wird nur für Straßen- und Schienenprojekte

---

<sup>60</sup> Für ausführliche Erläuterungen siehe VAN SUNTUM [136] S. 163 ff. und S. 174.

berücksichtigt. Die Verkehrsnachfrage des Personenverkehrs für den Ohnefall wurde projektübergreifend für Deutschland mittels eines sequentiellen vierstufigen und multimodalen Verkehrsnachfragemodells berechnet (BVU ET AL. [24]).

Während dieses Modell auch zur Ermittlung der Verkehrsnachfrage des Mitfalls für die Schienenprojekte angewandt wird, erfolgt für Straßenprojekte keine Neuberechnung. Im Rahmen dieser Projektbewertungen ist zur Abbildung der Routenwahl im Mit- und Ohnefall zunächst ein deutlich detaillierteres Verkehrsangebotsmodell notwendig, wofür die berechneten Verkehrsstrommatrizen disaggregiert werden. Die Verkehrsnachfrage des Mitfalls ergibt sich dann durch „Bewertungsprognosen“, die lediglich eine neue Routenwahl umfassen (vgl. S. 151 ff.).

Die Berechnung der Änderung des internen Nutzens basiert im Wesentlichen auf der Ersparnis infolge der Reisekosten- und Reisezeitänderungen, die für jedes Streckenelement des Netzes bestimmt werden. Im Rahmen der Bewertung von Schieneninfrastrukturprojekten entspricht der verwendete Ansatz dem Vorgehen in Kapitel 4.3.2.

Für Straßenprojekte erfolgt die Berechnung der Ersparnis der Reisekosten- und Reisezeiten auf Grundlage konstanter Verkehrsstrommatrizen aller Verkehrsmittel. Nutzenänderungen infolge intermodaler Verkehrsverlagerungen werden aufbauend auf einem zusätzlichen Verkehrsmittelwahlmodell für MIV und ÖPV im Rahmen der Projektbewertungen bestimmt (vgl. S. 170 ff.). Dabei werden die Reisekosten- und Reisezeitersparnisse durch den Verkehrsmittelwechsel zum MIV ermittelt.

Zur Abschätzung einer projektinduzierten veränderten Zielwahl sowie des Neuverkehrs für Straßenprojekte dient die Bewertungskomponente „Wirkungen des induzierten Verkehrs“ (vgl. S. 209 ff.). Diese Größe stellt eine Sammlung unterschiedlichster Wirkungen des interlokal verlagerten MI-Verkehrs und des MI-Neuverkehrs dar, wozu neben externen Effekten auch die Nutzen der Verkehrsteilnehmer zählen. Die Nutzenänderung wird dabei in Abhängigkeit veränderter Reisezeiten der auf das Verkehrsnetz umgelegten Verkehrsströme und vorgegebener Zuschlagfaktoren, die die Wirkungen des induzierten Verkehrs pauschal monetär abschätzen, abgeleitet. Ermittelt wurden diese Zuschlagfaktoren in einer zuvor von STASA ET AL. [133] durchgeführten Studie, in der vierzig Projekte bezüglich der Wirkung des induzierten Verkehrs untersucht wurden.

Die Differenzierung zwischen Schienen- und Straßenprojekten erstreckt sich auch auf die Berücksichtigung unterschiedlicher Zeitabschnitte eines Jahres. Während bei Schienenprojekten die modellierte Verkehrsnachfrage eines durchschnittlichen Werktages für den Personenverkehr mit dem Faktor 365 auf ein ganzes Jahr hochgerechnet wird (vgl. S. 245 ff.), erfolgt bei Straßenprojekten eine deutlich differenziertere Betrachtung des straßengebundenen Verkehrs. Hierfür erfolgt neben der Betrachtung der bereits bei den EWS erläuterten 15 Zeitabschnitte eine zusätzliche Differenzierung in 24 Zeitscheiben pro

Tag. Daraus folgen 360 unterschiedliche Verkehrszustände eines Jahres, die aufbauend auf den modellierten Verkehrsstrommatrizen eines durchschnittlichen Werktages mittels vorgegebener Faktoren berechnet werden (vgl. S. 280 f.).

Die Werte der Reisezeiteinsparungen ergeben sich aufbauend auf den Werten des BVWP 1992, für den Zeitwerte aus internationalen Zahlungsbereitschaftsanalysen abgeleitet wurden. Im Rahmen der Aktualisierung der Bewertungsmethodik des BVWP 2003 wurden diese Werte fortgeschrieben. Der Wertansatz wird unter der nicht näher erläuterten Begründung, dass im nichtgewerblichen Verkehr „[...] unterhalb einer bestimmten Schwelle [...]“ Reisezeitverkürzungen nicht wahrgenommen werden, für Straßenbauprojekte pauschal um 30 % Prozent reduziert (S. 74). Diese Verminderung wird jedoch nicht für Schienenprojekte durchgeführt. Selbst in diesem Zusammenhang ermittelte Reisezeitverkürzungen des MIV werden mit dem vollen Wertansatz bewertet.

### **VSS-Norm – SN 641 820 [150]**

Die VSS-Norm ist eine vom Schweizerischen Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute im Jahre 2005 herausgegebene Grundnorm zur Durchführung einer NKA für Straßenbauinvestitionen.<sup>61</sup> Die Verkehrsnachfrageberechnung stellt keinen Gegenstand der Norm dar. Grundsätzlich wird jedoch der Einsatz eines multimodalen Verkehrsmodells verlangt. Allerdings sind in Abhängigkeit der Projektwirkungen vereinfachte Abschätzungen akzeptabel (vgl. S. 27 und EM [44] S. 90 ff.).

Die Änderung des monetären internen Nutzens wird in Form der veränderten Konsumentenrente mit Hilfe der Halbierungsregel bestimmt. Dabei wird zwischen verbleibendem und induziertem Verkehr entsprechend Gleichung (4.52) in Kapitel 4.2.2.2 unterschieden. Zusätzlich erfolgt die getrennte Ausweisung der Einsparungen nach Reisekosten und Reisezeiten des verbleibenden Verkehrs. Die Berechnungen sind für den MIV und Busverkehr durchzuführen (vgl. S. 31).

Zur Berücksichtigung unterschiedlicher Verkehrszustände erfolgt die Unterteilung der Jahresstunden in drei Kategorien (Spitzenstunde, Hauptverkehrszeit, Nebenverkehrszeit). Hierfür sind jeweils gesonderte Modellberechnungen durchzuführen (vgl. S. 26). Als Bewertungsebene werden die Verkehrsströme  $v_{ijk}$  verwendet, deren Aufwände sich aus dem gewichteten Mittelwert aller genutzten Routen zusammensetzen (vgl. S. 23).

Die verwendeten Werte zur Monetarisierung der Reisezeiteinsparungen werden durch die VSS-Norm SN 641 822 a [151] vorgegeben, welche in einer zuvor für die Schweiz durchgeführten Zahlungsbereitschaftsanalyse (KÖNIG ET AL. [84]) abgeleitet wurden. Zur

---

<sup>61</sup> Die Methodik kann ebenfalls zur Bewertung verkehrspolitischer und verkehrsorganisatorischer Maßnahmen herangezogen werden (vgl. S. 5).



Monetarisierung der Reisezeiteinsparungen werden schließlich nach Fahrtzweck, Distanz und Verkehrsmittel (MIV, ÖPV) differenzierte Ansätze herangezogen.

### **TAG – Transport Analysis Guidance [38]**

Der TAG stellt eine Anleitung zur Durchführung einer Bewertung von Investitionen im Verkehrswesen in Großbritannien dar, die einer Finanzierung oder Bewilligung durch das Department for Transport bedürfen. Die Anleitung ist seit dem Jahre 2003 über das Internet zugänglich und wird daher als WebTAG bezeichnet. Der WebTAG reflektiert den im Jahre 1998 in Großbritannien entwickelten „New Approach to Appraisal (NATA)“, der einen analytischen, multikriteriellen Bewertungsrahmen darstellt (vgl. DfT [37] S. 2). Er bietet für alle möglichen Investitionen im Verkehrswesen Anleitungen und Hinweise, wobei die NKA ein zentrales Element darstellt.

Zur Bestimmung der Änderung des internen Nutzens wurde das Softwareprodukt TUBA (Transport User Benefit Appraisal) [108] entwickelt, das einen multimodalen Bewertungsansatz umfasst. Die Verkehrsnachfrage wird nicht in TUBA berechnet, weshalb das Programm kein integriertes Verkehrsnachfrage- und Bewertungstool ist. Im WebTAG finden sich allerdings ausführliche Hinweise und Anleitungen bezüglich einer zweckmäßigen Verkehrsnachfragemodellierung.

In TUBA ist der in Kapitel 4.2.3 vorgestellte Ansatz der Numerischen Integration zur Bestimmung der Änderung des internen Nutzens implementiert. Der Nutzen wird je Verkehrsmittel nach den einzelnen Aufwandswerten getrennt ausgewiesen, jedoch nicht nach verbleibendem und induziertem Verkehr.

Die unterschiedlichen Verkehrszustände des Jahres werden durch die Unterteilung der Jahresstunden in fünf Kategorien (AM peak, PM peak, Inter-peak, Off-peak, Weekend) berücksichtigt (vgl. MM [108] S. 11). Für diese Zeitabschnitte werden repräsentative Modellierungsergebnisse benötigt. Die Verkehrsströme  $v_{ijk}$  stellen die Bewertungsebene dar, deren Aufwände aus dem verwendeten Verkehrsnachfragemodell als gewichtete Mittelwerte bereitzustellen sind (vgl. MM [108] S. 13).

Zur Monetarisierung der Reisezeiteinsparungen erfolgt nach Vorgabe des Departments for Transport eine Unterscheidung nach den Fahrtzwecken „Pendeln“ und „Andere“. Pendeln bedeutet dabei die Fahrt von und zur Arbeit, während alle anderen Zwecke zusammengefasst werden (vgl. DfT [38] unit 3.5.6 S. 4 f.). Die verwendeten Wertansätze basieren auf der von MACKIE ET AL. durchgeführten Zeitwertstudie [97], in der Zahlungsbereitschaften zur Reisezeiteinsparung bestimmt wurden.

### **Einschätzung der Verfahren**

Keines der standardisierten Verfahren genügt vollständig den theoretischen Anforderungen einer harmonisierten Bewertung, wobei sich die einzelnen Ansätze z. T. erheblich

unterscheiden. Zwar umfassen die Methodik des BVWP und die SB neben der Bewertung auch Verkehrsnachfrageberechnungen, eine Nutzenermittlung unmittelbar aus dem Modell erfolgt jedoch nicht. Ebenfalls stehen die modellierten Präferenzen der Verkehrsteilnehmer in keinem Zusammenhang mit den vorgegebenen Wertansätzen der Reisezeiteinsparungen.

## 4.6.2 Besonderheiten standardisierter Bewertungsverfahren

### 4.6.2.1 Einheitlicher Wert der Reisezeiteinsparungen

Der subjektive Wert der Reisezeiteinsparungen hängt im Besonderen vom individuellen Einkommen ab. Theoretisch müssten diese einkommensabhängigen Werte, welche die Präferenzen der Verkehrsteilnehmer abbilden, zur Monetarisierung der individuellen Reisezeiteinsparungen im Rahmen der NKA herangezogen werden. Dies ist jedoch in den standardisierten Verfahren nicht der Fall und ein einheitlicher, ggf. nach Reisezweck oder Verkehrsmittel unterteilter, „sozialer Wertansatz“ wird verwendet.

ORTÚZAR und WILLUMSEN argumentieren diesbezüglich, dass der subjektive Wert die Zahlungsfähigkeit reflektiert und nicht den wahren Wert der Reisezeiteinsparungen (vgl. [115] S. 457). HELMS unterstützt hingegen die Verwendung des subjektiven Wertes damit, dass der wahre Wert *„[...] sich letztlich aus genau den Lohnsätzen, die über die Zahlungsfähigkeit bestimmen, welche das Verhalten der Verkehrsteilnehmer ausdrückt“*, ergibt (HELMS [66] S. 137). Eine bewusste Änderung der Wertansätze entspricht dann einer Korrektur der Einkommensverteilung durch den Analytiker, wodurch jedoch das Wesen der NKA verletzt wird (vgl. HELMS [66] S. 137).

In der Literatur herrscht bezüglich dieser Problematik keinesfalls Einigkeit, weshalb die Thematik hier nicht abschließend geklärt werden kann. In der Praxis werden fast ausschließlich einheitliche Werte verwendet, da ein solcher Wert derzeit auch eine unvermeidbare politische Restriktion darstellt (vgl. DFT [36] S. 15). Aus theoretischer Sicht ist ein einheitlicher Wert allerdings abzulehnen, da er letztlich zu inkorrekten Nutzenergebnissen führen kann (vgl. HEATCO [64] S. 27). Eine Korrektur der unterschiedlichen subjektiven Werte ist durch die von der Politik vorzugebenden zweckmäßigen sozialen Gewichte in einer sozialen Wohlfahrtsfunktion zu erreichen.

### 4.6.2.2 Wahrgenommene und nicht wahrgenommene Kosten

Die NKA basiert auf dem Rationalitätsprinzip, welches einem vollständig informierten Konsumenten die Wahrnehmung aller anfallenden Kosten unterstellt. Bei der Modellierung der Verkehrsnachfrage werden hingegen nur die unmittelbar anfallenden Reisekosten berücksichtigt. Grund dafür ist, dass Verkehrsteilnehmer des MIV Kosten für z. B. fahrleistungsabhängige Abschreibungen, Reifen, Öl, Wartung und Reparatur i. d. R. nicht in die Entscheidung einbeziehen. Bezogen auf die Verkehrsentscheidung stellen sie „nicht

wahrgenommene“ Kosten dar. Dem stehen die entscheidungsrelevanten Kosten für z. B. Treibstoff, Maut und Parkgebühren gegenüber, die als „wahrgenommene“ Kosten bezeichnet werden.

Ein Widerspruch besteht nun in der Annahme des rationalen Verhaltens, auf dem die NKA basiert, und der Vernachlässigung einiger tatsächlich anfallender Kosten bei der Ermittlung der Verkehrsnachfrage. Es stellt sich die Frage, ob und wie diese nicht wahrgenommenen Kosten in der NKA Berücksichtigung finden sollten. In der Literatur dominieren drei unterschiedliche Herangehensweisen:

- (1) Bestimmung der Änderung der Konsumentenrente einschließlich nicht wahrgenommener Kosten,
- (2) Bestimmung der Ersparnis nicht wahrgenommener Kosten und
- (3) Vernachlässigung der nicht wahrgenommenen Kosten.

Ansatz (1) wird beispielsweise in der VSS-Norm verwendet. Dabei wird die Änderung der Konsumentenrente mittels der Halbierungsregel unter Beachtung aller anfallenden Kosten bestimmt (siehe VSS [150] S. 32). Die Nutzenänderung besteht folglich aus einem wahrgenommenen und einem nicht wahrgenommenen Teil. Aus nutzentheoretischer Sicht ist dies jedoch problematisch, da es nicht im Einklang mit der vollständigen Informiertheit der Konsumenten steht (vgl. VAN SUNTUM [136] S. 162).

Alternativ gehen bei (2) die nicht wahrgenommenen Kosten als Ersparnis in die NKA ein. Dieser Ansatz wird beispielsweise in den EWS und in TUBA verfolgt. Während die EWS für alle Nutzenkomponenten den Ersparnisansatz anwendet, werden in TUBA die Ersparnisse nur für die nicht wahrgenommenen Kosten bestimmt. Die monetäre Änderung des internen Nutzens in Form der Änderung der Konsumentenrente wird somit korrekt bestimmt. Allerdings entsteht durch die zusätzliche Verwendung des Ersparnisansatzes ein Methodenmix.

Die dritte Möglichkeit (3) besteht in der Vernachlässigung der nicht wahrgenommenen Kosten. Dem steht jedoch die Tatsache gegenüber, dass auch nicht wahrgenommene Kostenreduzierungen einen Nutzen stiften. Selbst wenn die Verkehrsteilnehmer diese anfallenden Kosten nicht in ihre Verkehrsnachfrageentscheidung einfließen lassen, kann doch davon ausgegangen werden, dass die Änderungen von den Verkehrsteilnehmern „erfahren“ werden und folglich auch in der NKA Berücksichtigung finden sollten (vgl. BATES [8] S. 44).

Welcher dieser Ansätze letztlich in Bewertungsverfahren angewendet werden sollte, kann hier nicht abschließend geklärt werden. In dieser Arbeit steht die Ermittlung der Änderung des internen Nutzens direkt aus dem Verkehrsnachfragemodell im Mittelpunkt, in welchem Zusammenhang Ansatz (1) problematisch ist.

## 5 Modellentwicklung

### 5.1 Anforderungen und Überblick

Die derzeit angewandten Bewertungsverfahren in der Praxis sind durch eine vollständige Entkopplung der Verkehrsnachfrageberechnung und der sich anschließenden Nutzenberechnung im Rahmen der NKA charakterisiert. Die im Verkehrsnachfragemodell abgebildeten Präferenzen der Verkehrsteilnehmer finden keinen Eingang in die Nutzenberechnung. In Kapitel 2 wurde jedoch gezeigt, dass die NKA als wohlfahrtstheoretisches Instrument auf mikroökonomischen Zusammenhängen basiert und die Berechnung der Nutzenänderungen der Verkehrsteilnehmer diesen Ansätzen genügen muss. Grundannahme dabei ist das rationale Verhalten der Individuen, die jene Nachfrage realisieren, die den höchsten Nutzen liefert. Der kausale Wirkungszusammenhang zwischen Nachfrage und Nutzen, die auf den gleichen Präferenzen der Individuen beruhen, ist eine zentrale Bedingung der NKA, die in den standardisierten Bewertungsverfahren verletzt wird.

Ein Grund für den Dissens zwischen Theorie und Praxis liegt – oberflächlich betrachtet – in der wesentlichen Andersartigkeit der mikroökonomischen Nachfragetheorie und der verkehrsplanerischen Verkehrsnachfragemodelle. Letztere besitzen meist keine explizite mikroökonomische Begründung, weshalb eine unmittelbare Nutzenberechnung aus dem Nachfragemodell nicht ohne Weiteres möglich ist. Eine Alternative stellen Zufallsnutzenmodelle dar, die ihren Ursprung in der Mikroökonomie haben und entsprechend interpretierbar sind. Diese Modelle weisen jedoch nicht alle verkehrsplanerisch notwendigen Eigenschaften (in Bezug zur Realität) auf und erreichen daher oftmals nicht die erforderliche Modellierungsqualität. Der größte Nachteil besteht darin, dass **Randsummenbedingungen** nicht beachtet werden.

In Kapitel 4 wurden die wichtigsten Ansätze für eine **integrierte** Verkehrsnachfrage- und Nutzenberechnung aufgezeigt. Voraussetzung **dafür** ist eine mikroökonomisch kompatible Verkehrsnachfrageberechnung, die durch die Verwendung des Logit-Modells erreicht wird. Das Modell ist formal geschlossen formulierbar, daher einfach anwendbar und die Stammfunktion (Logsum-Term) ist bekannt. Allerdings gilt auch für das Logit-Modell, dass Randsummenbedingungen nicht integraler Bestandteil sind.

Ausgehend von dem umrissenen Spannungsfeld ist das Ziel dieses Kapitels die Entwicklung eines integrierten Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodells für den privaten

Personenverkehr, das den verkehrsplanerischen Anforderungen der Verkehrsnachfragemodellierung genügt und ein mikroökonomisch konsistentes Nutzenmaß liefert. Hierfür ist es notwendig, dass sich die Verkehrsnachfrage und der interne Nutzen auf Grundlage der gleichen Bewertungspräferenzen ergeben. Als monetäres Nutzenmaß wird die Änderung der Konsumentenrente bestimmt, da, wie in Kapitel 4.2.4 dargelegt, die Variationsmaße derzeit nicht für umfangreiche Modellberechnungen praktikabel sind.

Da die aus praktischer Sicht relevante Nutzenzerlegung nach den Aufwandskomponenten und/oder dem induzierten und verbleibenden Verkehr mittels der Logsum-Differenz nicht sinnvoll möglich ist, werden, neben der exakten Nutzenberechnung, ebenfalls die approximativen Ansätze Eingang in das integrierte Modell finden. Der Ersparnisansatz wird hingegen nicht berücksichtigt, da die Nutzenermittlung des induzierten Verkehrs mit diesem Ansatz nicht allein auf Grundlage der Verkehrsnachfrage möglich ist.

In Abbildung 5-1 ist die Grundstruktur des integrierten Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodells dargestellt, wobei die, gegenüber der bisherigen verkehrsplanerischen Verkehrsmodellierung, neuen und geänderten Komponenten hervorgehoben sind. Ausgangspunkt ist die Angebotsmodellierung des Ohnefalls entsprechend der Darstellungen in Kapitel 3.1. Das Ergebnis stellen die über alle genutzten Routen gewichteten mittleren Aufwände dar, die in die Verkehrsnachfrageberechnung eingehen. Der Ansatz der Verkehrserzeugung wird ebenfalls nicht verändert und erfolgt mittels des Kennwertmodells. Die daran anschließende simultane Ziel- und Verkehrsmittelwahl bestimmt die Verkehrsströme in Abhängigkeit der einzuhaltenden Randsummenbedingungen, der zu überwindenden Aufwände und der Präferenzen der Verkehrsteilnehmer. Dieser Berechnungsschritt muss für eine integrierte Verkehrsnachfrage- und Nutzenberechnung mikroökonomisch konsistent sein. Das in Kapitel 3.2.2 vorgestellte EVA-Grundmodell wurde nicht unmittelbar aus mikroökonomischen Ansätzen abgeleitet und weist daher vordergründig nicht die Verbindung zur mikroökonomischen Nutzenberechnung auf. Allerdings ist mit dem Modell eine sehr hohe Modellierungsqualität erreichbar, die gewahrt bleiben muss. Es wird daher das dem EVA-Grundmodell adäquate EVA-Logit-Modell durch identische Umformungen und spezielle mikroökonomische Festlegungen herausgearbeitet und damit gezeigt, dass die Eigenschaften des Logit-Modells auch in den verkehrsplanerisch gewünschten Eigenschaften des EVA-Grundmodells immanent enthalten sind.

Die mittels des EVA-Logit-Modells berechneten Verkehrsströme werden anschließend auf das Angebotsmodell umgelegt, wobei ein stochastisches Nutzergleichgewicht zu modellieren ist. Mittels eines weiteren Rückkopplungskreislaufs zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage stellt sich, nach einer hinreichenden Anzahl an Rückkopplungen, das äußere stochastische Nutzergleichgewicht ein, mit dem die Berechnung des Ohnefalls beendet ist und alle für die Bewertung notwendigen Daten zwischengespeichert werden. Als nächster Schritt erfolgt die Berechnung des Mitfalls analog dem Ohnefall.

Wenn die Nachfrageberechnungen des Mit- und Ohnefalls abgeschlossen sind, schließen sich unmittelbar die Bewertungsberechnungen an. Das neue Bewertungsmodul umfasst das Einlesen aller relevanten Daten aus der Nachfrageberechnung (Verkehrsströme, Präferenzparameter, Aufwände etc.), die Berechnung der Änderung des internen Nutzens, die Ermittlung des Grenznutzens des Einkommens und die Änderung der Konsumentenrente. Eine detaillierte Darstellung des Bewertungsmoduls findet sich in Abbildung 5-8.

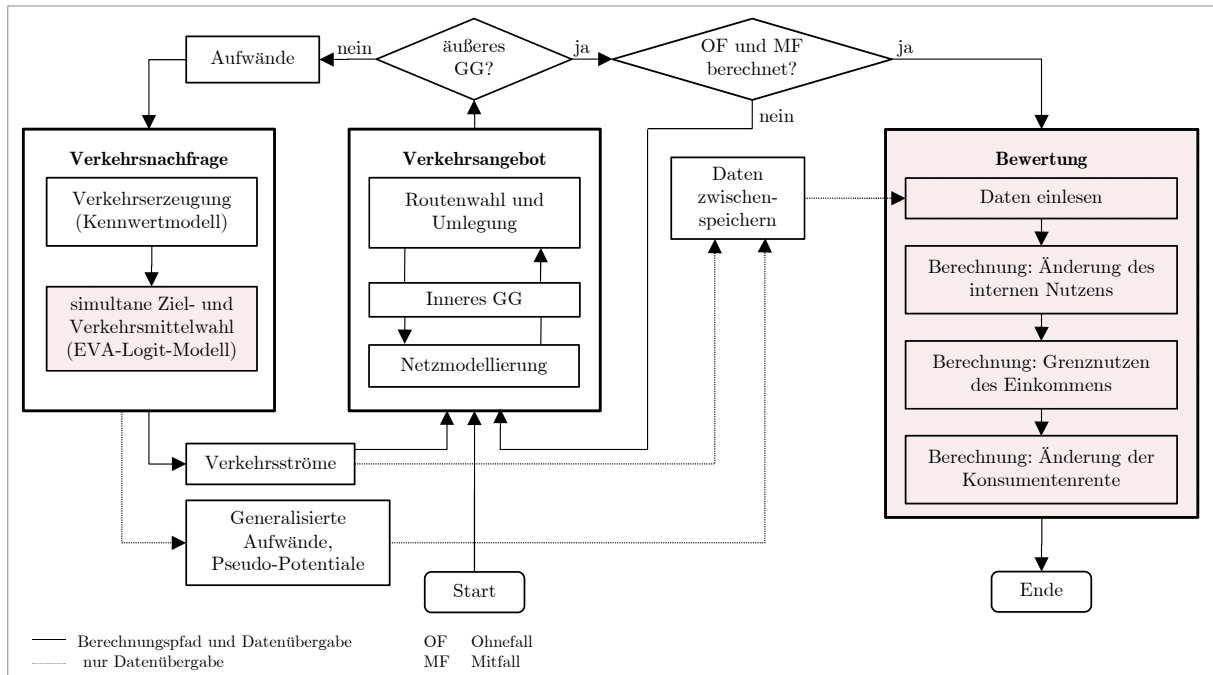


Abbildung 5-1: Grundstruktur des integrierten Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodells

Im Folgenden werden zum einen das EVA-Logit-Modell herausgearbeitet und nach mikroökonomischen Kriterien geprüft, zum anderen die Berechnungsansätze des Bewertungsmoduls abgeleitet. Nach der grundlegenden Ableitung des integrierten Modells erfolgt die Betrachtung weiterer relevanter Aspekte. Hierzu zählen einerseits die Beachtung zeitabhängiger Verkehrsnachfrage- und Aufwandsschwankungen, andererseits langfristige Projektwirkungen in Form von Siedlungsstrukturänderungen. Diese projektinduzierten Änderungen sind zwar derzeit kaum quantifizierbar (siehe Kapitel 3.4), allerdings besitzt die Thematik eine zunehmende wissenschaftliche Relevanz. Im letzten Unterkapitel erfolgt ein kurzer Ausblick hinsichtlich der Implementierung des integrierten Modells in die ökonomische Gesamtbewertung.

## 5.2 EVA-Logit-Modell

Nachfolgend wird der Modellansatz vorgestellt, der die mikroökonomische Kompatibilität des EVA-Grundmodells aufzeigt. Dieser Ansatz, dann als EVA-Logit-Modell bezeichnet, stellt in einer allgemeineren Terminologie ein **randsummenbeschränktes** (Joint-)Logit-Modell der simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahl unter Beachtung nichtlinearer

Bewertungspräferenzen zur Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeiten dar. Die einzuhaltenden Verkehrsaufkommen werden in der Verkehrserzeugung, analog zum EVA-Modell, mit dem Kennwertmodell bestimmt.

Für die Ableitung des EVA-Logit-Modells stellt die funktionale Form der deterministischen Nutzenkomponente das zentrale Integrationselement dar. Für ein mikroökonomisch konsistentes Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodell muss, neben der durch den Logit-Ansatz a priori gewährleisteten Integrierbarkeit des Verkehrsnachfragemodells, die Nutzenfunktion die Eigenschaften indirekter Nutzenfunktionen aufweisen, die daher zu prüfen sind. Darüber hinaus ist für alle nachfolgenden Überlegungen die Formulierung des Zufallsnutzens in Form:

$$\Phi_{ijkc} = \bar{\Phi}_{ijkc} + \varepsilon_{ijkc} \quad (5.1)$$

die Ausgangsbasis, wobei, wie in Anhang B gezeigt, mittels identisch und unabhängig Gumbel-verteilter stochastischer Nutzenkomponenten das Logit-Modell resultiert:

$$P_{ijkc} = \frac{e^{\bar{\Phi}_{ijkc}}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} e^{\bar{\Phi}_{i'j'k'c}}}. \quad (5.2)$$

$\bar{\Phi}_{ijkc}$  ist im Folgenden so zu bestimmen, dass die mittels des EVA-Logit-Ansatzes bestimmten Auswahlwahrscheinlichkeiten gewährleisten, dass die Verkehrsströme:

$$v_{ijkc} = P_{ijkc} \cdot V_c \quad (5.3)$$

den mittels des EVA-Grundmodells berechneten Verkehrsströmen entsprechen.

## 5.2.1 Randsummenbedingungen

Zur Vereinfachung werden in diesem Unterkapitel die (transformierten) Alternativenaufwände allgemein zum Generalisierten Aufwand  $ga$  zusammengefasst.

### 5.2.1.1 Unelastische Randsummenbedingungen

Alle beobachtbaren und quantifizierbaren Charakteristika der Alternativen sind im Rahmen der Zufallsnutzentheorie in der deterministischen Nutzenfunktion zu berücksichtigen. Hierzu zählen zunächst die Aufwände je Alternative und die a priori bestimmbareren Quell- und Zielpotentiale. Da bei unelastischen Randsummenbedingungen die Quell- und Zielverkehrsaufkommen sowie die Verkehrsaufkommen der einzelnen Verkehrsmittel eindeutig vorgegeben werden, ist eine explizite Beachtung von Potentialen in der Nutzenfunktion nicht erforderlich.<sup>62</sup>

---

<sup>62</sup> Die Einbeziehung der Potentiale ist aber grundsätzlich möglich.

Unelastische Randsummenbedingungen gewährleisten die Einhaltung der in der Verkehrserzeugung bestimmten Verkehrsaufkommen und stellen eine Nebenbedingung des simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodells dar. Die einzuhaltenden Verkehrsaufkommen sind Ergebnisse der Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer und beinhalten Informationen über diese Prozesse. Es ist daher notwendig, diese Informationen in der deterministischen Nutzenfunktion mittels „Pseudo-Potentialen“ zu berücksichtigen, deren Größe das Ergebnis des iterativen Lösungsprozesses unter Einhaltung der vorgegebenen Randsummenbedingungen ist.<sup>63</sup> Formal lautet der deterministische Anteil der Nutzenfunktion:

$$\bar{\Phi}_{ijkc} = -ga_{ijkc} + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc}. \quad (5.4)$$

$\theta_{ic}$ ,  $\tau_{jc}$ ,  $\psi_{kc}$  Pseudo-Potentiale für Quelle  $i$ , Ziel  $j$  und Verkehrsmittel  $k$  je Quelle-Ziel-Gruppe  $c$

Die Pseudo-Potentiale stellen quell-, ziel- und verkehrsmittelspezifische Größen dar. Sie sind nicht a priori quantifizierbar, jedoch aus theoretischer Sicht notwendige Eingangsgrößen der Nutzenfunktion. Sie dienen darin der Korrektur des „a-priori-Nutzens“, so dass die mittels Zufallsnutzenmaximierung bestimmten Auswahlwahrscheinlichkeiten jene Ausprägung aufweisen, die zur Einhaltung der Randsummenbedingungen führt.

Die allgemeine Berechnungsvorschrift zur Ermittlung der Verkehrsströme mit dem EVA-Logit-Modell lautet:

$$v_{ijkc} = \frac{e^{(-ga_{ijkc} + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc})}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} e^{(-ga_{i'j'k'c} + \theta_{i'c} + \tau_{j'c} + \psi_{k'c})}} \cdot V_c$$

$$\sum_j \sum_k v_{ijkc} = Q_{ic} \quad . \quad (5.5)$$

$$\sum_i \sum_k v_{ijkc} = Z_{jc}$$

$$\sum_i \sum_j v_{ijkc} = A_{kc}$$

Es gilt weiterhin:

$$v_{ijkc} = \frac{e^{(-ga_{ijkc})} \cdot e^{\theta_{ic}} \cdot e^{\tau_{jc}} \cdot e^{\psi_{kc}}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} e^{(-ga_{i'j'k'c})} \cdot e^{\theta_{i'c}} \cdot e^{\tau_{j'c}} \cdot e^{\psi_{k'c}}} \cdot V_c. \quad (5.6)$$

---

<sup>63</sup> Ähnliche Überlegungen bezüglich des Gravitationsmodells der Zielwahl finden sich z. B. bei ANAS [4] und ERLANDER/STEWART [47].



Unter der Annahme, dass  $B_{ijkc} = e^{(-ga_{ijkc})}$  gilt, kann mit  $f_{q_{ic}} = e^{\theta_{ic}}$ ,  $f_{z_{jc}} = e^{\tau_{jc}}$  und  $f_{a_{kc}} = e^{\psi_{kc}}$  geschrieben werden:

$$v_{ijkc} = \frac{B_{ijkc} \cdot f_{q_{ic}} \cdot f_{z_{jc}} \cdot f_{a_{kc}}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} B_{i'j'k'c} \cdot f_{q_{i'c}} \cdot f_{z_{j'c}} \cdot f_{a_{k'c}}} \cdot V_c. \quad (5.7)$$

Darüber hinaus gilt:

$$V_c = \sum_i \sum_j \sum_k B_{ijkc} \cdot f_{q_{ic}} \cdot f_{z_{jc}} \cdot f_{a_{kc}} \quad (5.8)$$

und es ergibt sich das EVA-Grundmodell in seiner typischen kompakten Schreibweise (siehe auch die Ableitungen in den Kapiteln 3.2.2.1.2 und 3.2.2.1.3):

$$v_{ijkc} = B_{ijkc} \cdot f_{q_{ic}} \cdot f_{z_{jc}} \cdot f_{a_{kc}}. \quad (5.9)$$

In dieser kompakten Schreibweise (5.9) ist das EVA-Logit-Modell (5.5) mit seiner exponentiellen (äußeren) Bewertungsfunktion als eine Ausprägungsvariante enthalten. Die genauere Betrachtung der Aufwandsbewertungen erfolgt in Kapitel 5.2.3.

Die Bestimmung der Pseudo-Potentiale ist durch die gezeigten Zusammenhänge mittels Transformationen der Lösungsfaktoren des EVA-Grundmodells möglich:

$$\begin{aligned} f_{q_{ic}} &= e^{\theta_{ic}} \rightarrow \ln(f_{q_{ic}}) = \theta_{ic} \\ f_{z_{jc}} &= e^{\tau_{jc}} \rightarrow \ln(f_{z_{jc}}) = \tau_{jc} \quad . \\ f_{a_{kc}} &= e^{\psi_{kc}} \rightarrow \ln(f_{a_{kc}}) = \psi_{kc} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Eine Änderung bzw. Anpassung der schon beim EVA-Grundmodell erwähnten Lösungsverfahren (Furness-, Multiverfahren) oder anderer Lösungsansätze für diese mathematische Aufgabenklasse ist somit selbstverständlich nicht notwendig.

Ein weiterer grundsätzlicher Zusammenhang folgt aus  $\sum_i \sum_j \sum_k e^{(-ga_{ijkc} + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc})} = V_c$ :

$$\begin{aligned} \sum_j \sum_k e^{(-ga_{ijkc} + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc})} &= Q_{ic} \\ \sum_i \sum_k e^{(-ga_{ijkc} + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc})} &= Z_{jc} \quad . \\ \sum_i \sum_j e^{(-ga_{ijkc} + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc})} &= A_{kc} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Es wird daraus ersichtlich, dass die beim EVA-Modell bzw. EVA-Logit-Modell bestimmten Pseudo-Potentiale explizit der Einhaltung der Randsummenbedingungen dienen.

### 5.2.1.2 Elastische Randsummenbedingungen

Im Gegensatz zu Modellen mit unelastischen Randsummenbedingungen ergeben sich bei elastischen Randsummenbedingungen die endgültigen Quell- und Zielverkehrsaufkommen erst in der simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahl. Dabei besitzen Quell- und/oder Zielpotentiale ( $Q^P$ ,  $Z^P$ ) einen Einfluss und müssen einen unmittelbaren Eingang in die Berechnung finden. Die Potentiale stellen a priori quantifizierbare Merkmale der Quellen und Ziele dar und können als quell- und zielspezifische Charakteristika in die Nutzenfunktion integriert werden. Die Einhaltung der Randsummenbedingungen wird wiederum mittels Pseudo-Potentialen realisiert. Die deterministische Nutzenfunktion mit quell- und zieleitigen Potentialen lautet demnach:

$$\bar{\Phi}_{ijkc} = -ga_{ijkc} + h(Q_{ic}^P) + h(Z_{jc}^P) + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc}. \quad (5.12)$$

$h$  Transformationsfunktion der Quell- und Zielpotentiale

Der formale Modellansatz zur Bestimmung der Verkehrsströme lautet folglich:

$$v_{ijkc} = \frac{e^{(-ga_{ijkc} + h(Q_{ic}^P) + h(Z_{jc}^P) + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc})}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} e^{(-ga_{i'j'k'c} + h(Q_{i'c}^P) + h(Z_{j'c}^P) + \theta_{i'c} + \tau_{j'c} + \psi_{k'c})}} \cdot V_c$$

$$Q_{ic}^{min} \leq \sum_j \sum_k v_{ijkc} = Q_{ic} \leq Q_{ic}^{max} \quad Q_{ic}^{min} < Q_{ic}^{max} \quad . \quad (5.13)$$

$$Z_{jc}^{min} \leq \sum_i \sum_k v_{ijkc} = Z_{jc} \leq Z_{jc}^{max} \quad Z_{jc}^{min} < Z_{jc}^{max}$$

$$\sum_i \sum_j v_{ijkc} = A_{kc}$$

Die originäre Schreibweise des EVA-Grundmodells ergibt sich entsprechend der Ausführungen der unelastischen Randsummenbedingungen und der zusätzlichen Annahme:

$$h(Q_{ic}^P) = \ln(Q_{ic}^P)$$

$$h(Z_{jc}^P) = \ln(Z_{jc}^P) \quad (5.14)$$

Durch mathematische Umstellungen resultiert schließlich:

$$v_{ijkc} = \frac{B_{ijkc} \cdot Q_{ic}^P \cdot Z_{jc}^P \cdot fq_{ic} \cdot fz_{jc} \cdot fa_{kc}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} B_{i'j'k'c} \cdot Q_{i'c}^P \cdot Z_{j'c}^P \cdot fq_{i'c} \cdot fz_{j'c} \cdot fa_{k'c}} \cdot V_c \quad (5.15)$$

und durch Kürzen:

$$v_{ijkc} = B_{ijkc} \cdot Q_{ic}^P \cdot Z_{jc}^P \cdot fq_{ic} \cdot fz_{jc} \cdot fa_{kc} \quad (5.16)$$

Analog der Ausführungen zum Fall der unelastischen Randsummenbedingungen lassen sich die letztlich bestimmten Verkehrsaufkommen angeben durch:

$$\begin{aligned}
\sum_j \sum_k e^{(-ga_{ijk} + h(Q_{ic}^p) + h(Z_{jc}^p) + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc})} &= Q_{ic} \\
\sum_i \sum_k e^{(-ga_{ijk} + h(Q_{ic}^p) + h(Z_{jc}^p) + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc})} &= Z_{jc} . \\
\sum_i \sum_j e^{(-ga_{ijk} + h(Q_{ic}^p) + h(Z_{jc}^p) + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc})} &= A_{kc}
\end{aligned} \tag{5.17}$$

Mit Hilfe der Pseudo-Potentiale können auch weitere Randsummenbedingungen problemlos in das EVA-Logit-Modell Eingang finden. Das gilt beispielsweise für die Berücksichtigung polarer und bipolarer Einzugsgebiete. Auf die entsprechenden formalen Darstellungen soll hier verzichtet werden.

### 5.2.1.3 Vorzeichen und Größe der Pseudo-Potentiale

Die Pseudo-Potentiale bedürfen einer genaueren Analyse, wofür die Gleichungen in (5.11) und (5.17) zu beachten sind, in denen die bestimmten Verkehrsaufkommen die a-posteriori-Lösung darstellen. Im Folgenden werden nur die Gleichungen in (5.17) betrachtet, da hierin die Gleichungen in (5.11) formal enthalten sind. Die dazugehörige a-priori-Lösung (Start-Lösung) ohne Einhaltung vorgegebener Randsummenbedingungen (Pseudo-Potentiale sind alle Null) lautet:

$$\begin{aligned}
\sum_j \sum_k e^{(-ga_{ijk} + h(Q_{ic}^p) + h(Z_{jc}^p))} &= \tilde{Q}_{ic} \\
\sum_i \sum_k e^{(-ga_{ijk} + h(Q_{ic}^p) + h(Z_{jc}^p))} &= \tilde{Z}_{jc} . \\
\sum_i \sum_j e^{(-ga_{ijk} + h(Q_{ic}^p) + h(Z_{jc}^p))} &= \tilde{A}_{kc}
\end{aligned} \tag{5.18}$$

$\tilde{Q}_{ic}, \tilde{Z}_{jc}, \tilde{A}_{kc}$  Quell-, Ziel- und Verkehrsmittelaufkommen ohne Einhaltung vorgegebener Randsummenbedingungen (a-priori-Verkehrsaufkommen)

Das Vorzeichen und die Größe der Pseudo-Potentiale sind abhängig von den einzuhaltenden Randsummenbedingungen und den a-priori-Lösungen, die durch die Generalisierten Aufwände und die Potentiale beeinflusst werden. Es gilt (mit  $\theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc} = pp_{ijk}$ ):

$$\begin{aligned}
\tilde{Q}_{ic} < Q_{ic} &\rightarrow pp_{ijk} > 0, \tilde{Q}_{ic} = Q_{ic} \rightarrow pp_{ijk} = 0, \tilde{Q}_{ic} > Q_{ic} \rightarrow pp_{ijk} < 0 \\
\tilde{Z}_{jc} < Z_{jc} &\rightarrow pp_{ijk} > 0, \tilde{Z}_{jc} = Z_{jc} \rightarrow pp_{ijk} = 0, \tilde{Z}_{jc} > Z_{jc} \rightarrow pp_{ijk} < 0 . \\
\tilde{A}_{kc} < A_{kc} &\rightarrow pp_{ijk} > 0, \tilde{A}_{kc} = A_{kc} \rightarrow pp_{ijk} = 0, \tilde{A}_{kc} > A_{kc} \rightarrow pp_{ijk} < 0
\end{aligned} \tag{5.19}$$

Wenn die a-priori-Verkehrsaufkommen kleiner als die a-posteriori-Verkehrsaufkommen sind, dann sind die Pseudo-Potentiale positiv. Das bedeutet, dass durch die Pseudo-Potentiale ein zusätzlicher positiver Nutzen modelliert werden muss, damit die vorgegebenen Verkehrsaufkommen erzielt werden. Umgekehrt gilt, dass die Pseudo-Potentiale negativ sind, wenn die a-priori-Verkehrsaufkommen die a-posteriori-Verkehrsaufkommen übersteigen. Die Pseudo-Potentiale fungieren dann faktisch als zusätzlicher negativer Nutzen, der die a-priori-Nachfrage der Verkehrsteilnehmer z. B. nach einem Ziel reduziert. Entsprechen sich a-priori- und a-posteriori-Lösungen, dann nehmen die Pseudo-Potentiale den Wert Null an.

Hinsichtlich des Vorzeichens und der Größe der Pseudo-Potentiale besitzen im Besonderen die Potentiale eine große Bedeutung. Werden z. B. keine Potentiale in der Nutzenfunktion beachtet, dann kann i. Allg. davon ausgegangen werden, dass die a-priori-Verkehrsaufkommen geringer als die a-posteriori-Verkehrsaufkommen sind, infolgedessen die Pseudo-Potentiale als positive Werte bestimmt werden. Wenn hingegen Potentiale beachtet werden, dann **können** – in Abhängigkeit der Größe der Potentiale – die a-priori-Verkehrsaufkommen größer als die a-posteriori-Verkehrsaufkommen sein und folglich die Pseudo-Potentiale ein negatives Vorzeichen aufweisen. Somit gilt festzuhalten, dass die Absolutwerte der Pseudo-Potentiale nur bedingt interpretierbar sind. Im Rahmen dieser Arbeit sind projektinduzierte **Veränderungen** der Pseudo-Potentiale von Interesse, aus denen aber wichtige Informationen abgeleitet werden können.

## 5.2.2 Prognoseansatz

Für die Prognoseberechnung ist der Modal-Split unbekannt. Die für die Prognose notwendigen Informationen werden im EVA-Grundmodell aus der Analyseberechnung gewonnen. Demnach lautet der Verkehrsmittelanteil an einem Verkehrsstrom  $y_{ijkc}$  für den Analysefall:

$$y_{ijkc} = \frac{v_{ijkc}}{\sum_{k'} v_{ijk'c}} = \frac{e^{(-ga_{ijkc} + \psi_{kc})}}{\sum_{k'} e^{(-ga_{ijk'c} + \psi_{k'c})}} = \frac{e^{(-ga_{ijkc})} \cdot e^{\psi_{kc}}}{\sum_{k'} e^{(-ga_{ijk'c})} \cdot e^{\psi_{k'c}}}. \quad (5.20)$$

Für die Prognoseberechnung werden hieraus die Verkehrsmittelkonstanten  $C_{kc}$  bestimmt:

$$C_{kc} = \frac{e^{\psi_{kc}}}{\sum_{k'} e^{\psi_{k'c}}}. \quad (5.21)$$

Die Verkehrsmittelkonstanten entsprechen normierten Verkehrsmittelgewichten, von denen i. Allg. angenommen wird, dass sie im Prognosezeitraum konstant sind und daher in der Prognoseberechnung als verkehrsmittelspezifische Präferenzen in die Nutzenfunktion einfließen können. Da diese Konstanten  $C_{kc}$  dann für den Prognosefall bekannt sind,

reduziert sich die Berechnung auf einen bi-linearen Modellansatz. Dieser lautet für den Fall unelastischer Randsummenbedingungen:

$$\begin{aligned}
 v_{ijkc} &= \frac{e^{(-ga_{ijkc} + \ln(C_{kc}) - \theta_{ic} - \tau_{jc})}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} e^{(-ga_{i'j'k'c} + \ln(C_{k'c}) - \theta_{i'c} - \tau_{j'c})}} \cdot V_c \\
 \sum_j \sum_k v_{ijkc} &= Q_{ic} \\
 \sum_i \sum_k v_{ijkc} &= Z_{jc}
 \end{aligned} \tag{5.22}$$

Durch Umstellung ergibt sich schließlich die bekannte Schreibweise des EVA-Grundmodells:

$$\begin{aligned}
 v_{ijkc} &= \frac{B_{ijkc} \cdot C_{kc} \cdot fq_{ic} \cdot fz_{jc}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} B_{i'j'k'c} \cdot C_{k'c} \cdot fq_{i'c} \cdot fz_{j'c}} \cdot V_c \\
 &= B_{ijkc} \cdot C_{kc} \cdot fq_{ic} \cdot fz_{jc}
 \end{aligned} \tag{5.23}$$

Für die weiteren Überlegungen ist es allerdings vorteilhaft, auf die Normierung (5.21) zu verzichten. Die Prognoseberechnung erfolgt dann unmittelbar auf den in der Analyse bestimmten Pseudo-Potentialen der Verkehrsmittel  $\psi_{kc}^A$ . Diese werden dann unverändert in die Prognoseberechnung übernommen und führen zum gleichen Ergebnis wie mit den Faktoren  $\ln(C_{kc})$ . Die Berechnung der Verkehrsströme für den Prognosefall lautet dann:

$$\begin{aligned}
 v_{ijkc} &= \frac{e^{(-ga_{ijkc} + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc}^A)}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} e^{(-ga_{i'j'k'c} + \theta_{i'c} + \tau_{j'c} + \psi_{k'c}^A)}} \cdot V_c \\
 \sum_j \sum_k v_{ijkc} &= Q_{ic} \\
 \sum_i \sum_k v_{ijkc} &= Z_{jc}
 \end{aligned} \tag{5.24}$$

In der Nutzenberechnung werden allgemein statt „Analyse“ und „Prognose“ die Begriffe „Ohnefall“ und „Mitfall“ verwendet. Es werden, da im weiteren Verlauf der Arbeit die Nutzenberechnung im Vordergrund steht, im Folgenden ausschließlich die Begriffe „Ohnefall“ und „Mitfall“ verwendet.

### 5.2.3 Bewertung von Aufwänden

Die Bewertung von Aufwänden in Zufallsnutzenmodellen erfolgt mittels einer inneren und einer äußeren Bewertungsfunktion (siehe Kapitel 3.2.2.3). Die äußere Bewertungsfunktion entspricht im Logit-Modell einer Exponentialfunktion, deren alleinige Nutzung das menschliche Bewertungsverhalten jedoch ungenügend abbildet. Zur Erhöhung der

Abbildungsqualität des menschlichen Verhaltens müssen EVA-Transformationen in der inneren Bewertungsfunktion, d. h. in der deterministischen Nutzenfunktion des EVA-Logit-Modells, Eingang finden.

### 5.2.3.1 EVA-Transformationen

Zunächst sollen die Aufwandstransformationen bestimmt werden, mittels derer das Logit-Modell die gleichen Aufwandsbewertungen wie die EVA-2-Bewertungsfunktion liefert.<sup>64</sup> Die Gesamtbewertung der Aufwände im EVA-Grundmodell lautet:

$$B_{ijkc} = \prod_m \left( 1 + \left( \frac{a_{mijkc}}{C_{mc}} \right)^{\beta_{mc}} \right)^{-\alpha_{mc}} \quad (5.25)$$

und kann transformiert zu:

$$B_{ijkc} = \prod_m \exp \left( \ln \left( 1 + \left( \frac{a_{mijkc}}{C_{mc}} \right)^{\beta_{mc}} \right)^{-\alpha_{mc}} \right) = \exp \left( \sum_m \ln \left( 1 + \left( \frac{a_{mijkc}}{C_{mc}} \right)^{\beta_{mc}} \right)^{-\alpha_{mc}} \right). \quad (5.26)$$

Durch Umstellen ergibt sich:

$$B_{ijkc} = \exp \left( - \sum_m \alpha_{mc} \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{a_{mijkc}}{C_{mc}} \right)^{\beta_{mc}} \right) \right). \quad (5.27)$$

Die resultierende deterministische EVA-Nutzenfunktion lautet (ohne (Pseudo-)Potentiale) somit:

$$\bar{\Phi}_{ijkc} = - \sum_m \alpha_{mc} \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{a_{mijkc}}{C_{mc}} \right)^{\beta_{mc}} \right). \quad (5.28)$$

In Abbildung 5-2 sind Varianten der EVA-Nutzenfunktion in Abhängigkeit eines Aufwandes  $a$  dargestellt. Es gelten für alle Kurvenverläufe die Parameter  $\alpha = 2$  und  $C = 10$ . Zu beachten ist dabei der EVA-typische, nahezu horizontale Kurvenverlauf im niedrigen Aufwandsbereich, der die Wahrnehmungs- und Bewertungsschwelle der Verkehrsteilnehmer gegenüber geringen Aufwänden widerspiegelt.

---

<sup>64</sup> Im Folgenden wird zur Vereinfachung nur der Begriff „EVA“ statt „EVA-2“ verwendet.

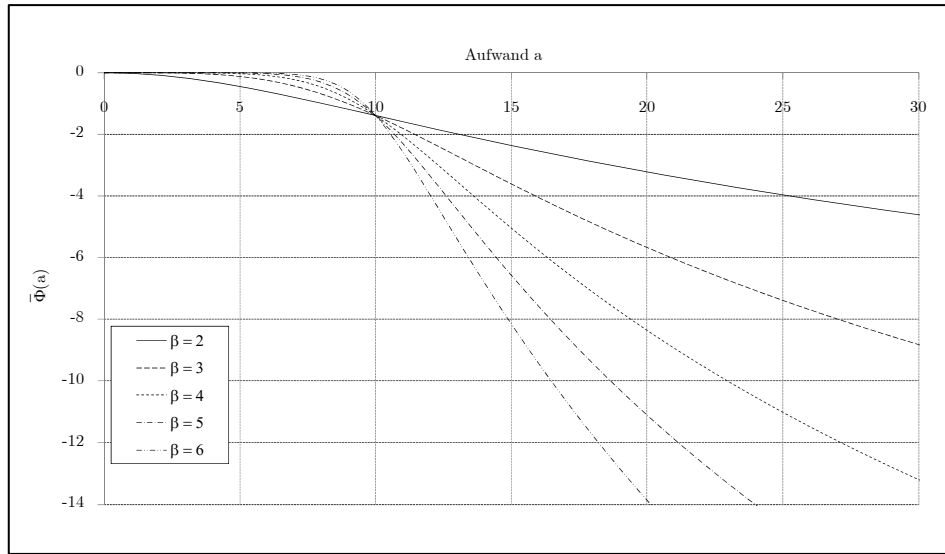


Abbildung 5-2: EVA-Nutzenfunktionen in Abhängigkeit eines Aufwandes a

Für die Modellierung der Verkehrsnachfrage sind keine weiteren Überlegungen notwendig. Zur Bestimmung der Änderung des internen Nutzens muss (5.28) jedoch eine indirekte Nutzenfunktion sein. Da durch nichtlineare Transformationen bei  $a_m = rk$  Einkommenseffekte modelliert werden, ist für die mikroökonomische Konsistenz das Einkommen **explizit** als Modellvariable zu berücksichtigen. Die deterministische EVA-Nutzenfunktion lautet dann mit den Aufwänden Reisekosten und Reisezeit:

$$\bar{\Phi}_{ijkc} = \alpha_{(rk)c} \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{y_{n_c} - rk_{ijkc}}{C_{(rk)c}} \right)^{\beta_{(rk)c}} \right) - \alpha_{(rz)c} \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{rz_{ijkc}}{C_{(rz)c}} \right)^{\beta_{(rz)c}} \right). \quad (5.29)$$

Die Funktion repräsentiert somit eine konkrete Form der allgemeinen nichtlinearen bedingten indirekten Nutzenfunktion (siehe Kapitel 4.2.4):

$$\bar{\Phi}_{ijkc} = \beta_{(rk)c} \cdot f(y_{n_c} - rk_{ijkc}) - \beta_{(rz)c} \cdot h(rz_{ijkc}). \quad (5.30)$$

Die in (5.29) formulierte EVA-Nutzenfunktion impliziert Einkommenseffekte, die jedoch im Verkehr im Normalfall ( $rk \ll y$ ) nicht auftreten. Eine Möglichkeit nichtlineare Transformationen der Reisekosten ohne das Einkommen und folglich ohne Einkommenseffekte zu begründen, wird im nachfolgenden Unterkapitel vorgestellt.

### 5.2.3.2 Mehrere Reisekosten- und Reisezeitkomponenten

Die Funktion in (5.29) umfasst, wie auch alle Überlegungen in Kapitel 4, die Reisekosten und Reisezeiten als jeweils einen aggregierten Wert. Dies entspricht jedoch nicht dem Verhalten der Verkehrsteilnehmer, die die Einzelaufwände unterschiedlich wahrnehmen

und bewerten. Somit sind die Reisekosten und die Reisezeit in ihre jeweiligen Einzelkomponenten zu zerlegen und in der Nutzenfunktion zu berücksichtigen.

Die Zerlegung der Reisezeit (in Fahrzeit, Zu- und Abgangszeit etc.) ist dabei ohne Weiteres möglich, da die einzelnen Zeitkomponenten ebenfalls als Alternativencharakteristika aufgefasst werden. Demgegenüber gehen die Reisekosten über die Einkommensrestriktion ein. Eine Disaggregation in z. B. Kraftstoffkosten, Maut, Parkgebühren etc. mit jeweils unterschiedlichen Präferenzen führt dabei zu theoretischen Problemen, da daraus verschiedene Grenznutzen des Einkommens resultieren.

Aus mikroökonomischer Sicht sind unterschiedlich zu bewertende Kostenkomponenten unplausibel, da sie in der gleichen monetären Skala gemessen werden und der Verkehrsteilnehmer als rational betrachtet wird. Dennoch ist dieses Phänomen real und folglich zu berücksichtigen. Für den Fall linearer Präferenzen führt daher MCFADDEN „behavioral weights“ als psychologische Gewichte ein (vgl. MCFADDEN [105] S. 14 f.). Es gilt dann:

$$\bar{\Phi}_{ijkc} = \beta_{(rk)c} \cdot \left( y_{n_c} - \sum_b \beta_{bc} \cdot \kappa_{bijkc} \right) - \sum_d \beta_{dc} \cdot \zeta_{dijkc} \quad (5.31)$$

$\kappa$	Reisekostenkomponente	$b$	Laufindex der Reisekostenkomponenten $\kappa$
$\zeta$	Reisezeitkomponente	$d$	Laufindex der Reisezeitkomponenten $\zeta$

Weiterhin kann für die Reisekostenkomponenten geschrieben werden:

$$\beta_{(rk)c} \cdot \left( y_{n_c} - \sum_b \beta_{bc} \cdot \kappa_{bijkc} \right) = \beta_{(rk)c} \cdot y_{n_c} - \sum_b \beta_{(rk)c} \cdot \beta_{bc} \cdot \kappa_{bijkc} \quad (5.32)$$

Wie in Kapitel 4.1.1 gezeigt wurde, besitzt der lineare Term  $\beta_{(rk)c} \cdot y_{n_c}$  zur Bestimmung der Auswahlwahrscheinlichkeiten keinen Einfluss und kann vernachlässigt werden. Der Parameter  $\beta_{(rk)c}$  geht im zweiten Term der rechten Seite als konstanter Faktor ein und muss zur Identifizierung von  $\beta_{bc}$  fixiert werden. Mit  $\beta_{(rk)c} = 1$  resultiert:

$$\bar{\Phi}_{ijkc} = - \sum_b \beta_{bc} \cdot \kappa_{bijkc} - \sum_d \beta_{dc} \cdot \zeta_{dijkc} \quad (5.33)$$

Der Ansatz der psychologischen Gewichtung unterschiedlicher Reisekosten- und Reisezeitkomponenten kann auch mittels nichtlinearer Gewichtungsfunktionen erfolgen:

$$\bar{\Phi}_{ijkc} = \beta_{(rk)c} \cdot \left( y_{n_c} - \sum_b \beta_{bc} \cdot h(\kappa_{bijkc}) \right) - \sum_d \beta_{dc} \cdot h(\zeta_{dijkc}) \quad (5.34)$$

Werden die oben abgeleiteten EVA-Transformationen zur Definition von  $h$  verwendet, so ergibt sich:



$$\bar{\Phi}_{ijkc} = \beta_{(rk)c} \cdot \left( y_{n_c} - \sum_b \alpha_{bc} \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{\kappa_{bijkc}}{C_{bc}} \right)^{\beta_{bc}} \right) \right) - \sum_d \alpha_{dc} \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{\zeta_{dijkc}}{C_{dc}} \right)^{\beta_{dc}} \right). \quad (5.35)$$

Für die Reisekostenkomponenten gilt wiederum:

$$\beta_{(rk)c} \cdot \left( y_{n_c} - \sum_b \alpha_{bc} \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{\kappa_{bijkc}}{C_{bc}} \right)^{\beta_{bc}} \right) \right) = \left( \beta_{(rk)c} \cdot y_{n_c} - \sum_b \beta_{(rk)c} \cdot \alpha_{bc} \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{\kappa_{bijkc}}{C_{bc}} \right)^{\beta_{bc}} \right) \right). \quad (5.36)$$

Mit  $\beta_{(rk)c} = 1$  und Vernachlässigung von  $\beta_{(rk)c} \cdot y_{n_c}$  resultiert schließlich:

$$\bar{\Phi}_{ijkc} = - \sum_b \alpha_{bc} \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{\kappa_{bijkc}}{C_{bc}} \right)^{\beta_{bc}} \right) - \sum_d \alpha_{dc} \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{\zeta_{dijkc}}{C_{dc}} \right)^{\beta_{dc}} \right). \quad (5.37)$$

Nach diesem Ansatz unterliegt das Einkommen im Unterschied zu (5.29) keiner (nichtlinearen) Transformation und geht nicht in die Nutzenfunktion ein. Somit werden in der Funktion keine „echten“ Einkommenseffekte berücksichtigt und die nichtlinearen Kostentransformationen dienen der Abbildung (zusätzlicher) psychologischer Effekte.<sup>65</sup> Zu beachten ist aber, dass in den Bewertungspräferenzen der Reisekostenkomponenten die (linearen) Einkommenspräferenzen implizit enthalten sind. Sollen hingegen tatsächlich Einkommenseffekte abgebildet werden, dann ist die Funktion  $f$  in (5.30) zusätzlich nicht-linear (wie in (5.29)) zu definieren. Allerdings ist das nur für spezielle Anwendungsfälle sinnvoll (siehe Kapitel 4.2.4).

### 5.2.3.3 Verkehrsmittelspezifische Bewertung

Aufwände werden von den Verkehrsteilnehmern in Abhängigkeit des genutzten Verkehrsmittels unterschiedlich wahrgenommen und bewertet. So wird die Reisezeit mit dem Fahrrad u. a. wegen der Anstrengung anders erlebt als die Reisezeit im Pkw. Im EVA-Grundmodell wird das durch verkehrsmittelspezifische Präferenzen je Aufwand beachtet. Diese differenzierte Bewertung ist auf die EVA-Nutzenfunktion zu übertragen und es resultiert:

$$\bar{\Phi}_{ijkc} = - \sum_b \alpha_{bkc} \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{\kappa_{bijkc}}{C_{bkc}} \right)^{\beta_{bkc}} \right) - \sum_d \alpha_{dkc} \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{\zeta_{dijkc}}{C_{dkc}} \right)^{\beta_{dkc}} \right). \quad (5.38)$$

Durch die verkehrsmittelspezifische Indizierung der Präferenzparameter wird ausgedrückt, dass die Parameter, neben den Aufwänden und Quelle-Ziel-Gruppen, ebenfalls je

<sup>65</sup> Der Ansatz kann natürlich auch bei nur einer Reisekostenkomponente herangezogen werden.

Verkehrsmittel zu bestimmen sind. Unter Berücksichtigung aller differenzierten Bewertungen lautet das EVA-Logit-Modell mit unelastischen Randsummenbedingungen folglich:

$$v_{ijk} = \frac{e^{\left(-\sum_b \alpha_{bkc} \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{\kappa_{bijkc}}{C_{bkc}}\right)^{\beta_{bkc}}\right) - \sum_d \alpha_{dkc} \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{\zeta_{dijkc}}{C_{dkc}}\right)^{\beta_{dkc}}\right) + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc}\right)}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} e^{\left(-\sum_{b'} \alpha_{b'k'c} \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{\kappa_{b'i'j'k'c}}{C_{b'k'c}}\right)^{\beta_{b'k'c}}\right) - \sum_{d'} \alpha_{d'k'c} \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{\zeta_{d'i'j'k'c}}{C_{d'k'c}}\right)^{\beta_{d'k'c}}\right) + \theta_{i'c} + \tau_{j'c} + \psi_{k'c}\right)}} \cdot V_c \quad (5.39)$$

$$\sum_j \sum_k v_{ijk} = Q_{ic}$$

$$\sum_i \sum_k v_{ijk} = Z_{jc}$$

$$\sum_i \sum_j v_{ijk} = A_{kc}$$

### 5.2.4 Eigenschaften der EVA-Nutzenfunktion

Für eine konsistente Nutzenberechnung muss das EVA-Logit-Modell den in Kapitel 4.1 erläuterten Bedingungen genügen. Die Eigenschaften des Zufallsnutzenmodells und die damit verbundene Integrierbarkeit werden durch das Logit-Modell gewährleistet. Zu prüfen ist hingegen, ob die EVA-Nutzenfunktion die Eigenschaften indirekter Nutzenfunktionen aufweist.

Die vollständige EVA-Nutzenfunktion lautet:

$$\Phi_{ijk} = -\sum_b \alpha_{bkc} \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{\kappa_{bijkc}}{C_{bkc}}\right)^{\beta_{bkc}}\right) - \sum_d \alpha_{dkc} \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{\zeta_{dijkc}}{C_{dkc}}\right)^{\beta_{dkc}}\right), \quad (5.40)$$

$$+ \sum_l \beta_{lkc} \cdot X_{lijkc} + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc} + \varepsilon_{ijk}$$

wobei die stochastischen Nutzenkomponenten unabhängig und identisch Gumbel-verteilt sind. Die Pseudo-Potentiale stellen erklärende Variablen dar, die den Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer zugrunde liegen, dem Modellierer jedoch nicht bekannt sind. Durch die Einhaltung beobachtbarer Verkehrsaufkommen (Randsummenbedingungen) werden die Pseudo-Potentiale iterativ bestimmt. Mittels der zusätzlichen Variablen  $X$  können beobachtbare Alternativencharakteristika, wie z. B. Potentiale oder Komfort, Eingang finden. Gleiches gilt grundsätzlich auch für die Zeitaufwände, deren spezielle Transformationen sich durch die EVA-Bewertungsfunktion ergeben.

Aus ökonomischer Sicht sind die Reisekostenkomponenten, die speziellen EVA-Transformationen unterliegen, von größter Bedeutung. Die Kosten stellen die ökonomischen

Variablen der Funktion dar und determinieren die mikroökonomische Kompatibilität. Diese ist gewährleistet, wenn die Funktion in (5.40) die Eigenschaften indirekter Nutzenfunktionen besitzt. Dabei ist zu beachten, dass alle Reisekostenkomponenten bei der Prüfung zu berücksichtigen sind. Zur Vereinfachung der Darstellung gilt im Folgenden für die Pseudo-Potentiale:  $pp_{ijkc} = \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc}$ .

**(1) Nicht zunehmend in allen  $\kappa_{bijkc}$  sowie nicht abnehmend in  $y_{n_c}$**

Es wird untersucht, ob gilt:

$$\frac{\partial \Phi_{ijkc} \left( y_{n_c} - \sum_b h(\kappa_{bijkc}), \mathbf{X}_{ijkc}, pp_{ijkc}, \varepsilon_{ijkc} \right)}{\partial \kappa_{bijkc}} \leq 0 \quad \text{für } ijk \in A_c. \quad (5.41)$$

Die erste partielle Ableitung der EVA-Nutzenfunktion nach  $\kappa_{bijkc}$  liefert:

$$\frac{\partial \Phi_{ijkc}}{\partial \kappa_{bijkc}} = - \frac{\alpha_{bkc} \cdot \left( \frac{\kappa_{bijkc}}{C_{bkc}} \right)^{(\beta_{bkc} - 1)} \cdot \beta_{bkc}}{C_{bkc} \cdot \left( \left( \frac{\kappa_{bijkc}}{C_{bkc}} \right)^{\beta_{bkc}} + 1 \right)}. \quad (5.42)$$

Für den relevanten Aufwandsbereich von  $\kappa_{bijkc} \geq 0$  und den Parameterbedingungen  $\alpha_{bkc} > 0 \wedge \beta_{bkc} > 0 \wedge C_{bkc} > 0$  ist (5.42) stets negativ und weist nur bei  $\kappa_{bijkc} = 0$  eine Nullstelle auf. Die Bedingung (5.41) ist folglich erfüllt.

Analog ist zu prüfen, dass die Funktion nicht abnehmend im Einkommen ist:

$$\frac{\partial \Phi_{ijkc} \left( y_{n_c} - \sum_b h(\kappa_{bijkc}), \mathbf{X}_{ijkc}, pp_{ijkc}, \varepsilon_{ijkc} \right)}{\partial y_{n_c}} \geq 0 \quad \text{für } ijk \in A_c. \quad (5.43)$$

Das Einkommen geht linear in die Funktion ein und wird daher vernachlässigt. Grundsätzlich lautet die erste Ableitung für den linearen Fall:

$$\frac{\partial \Phi_{ijkc}}{\partial y_{n_c}} = \beta_{(rk)c}. \quad (5.44)$$

Entsprechend (5.35) weist  $\beta_{(rk)c}$  ein positives Vorzeichen auf, wodurch (5.43) stets gewährleistet wird.

**(2) Stetig bei allen  $\kappa_{bijkc} \gg 0$ ,  $y_{n_c} > 0$** 

Die Transformationen der Reisekostenkomponenten setzten sich ausschließlich aus stetigen Einzelfunktionen zusammen. Es handelt sich dabei um:

- Division durch einen positiven Divisor:  $\kappa_{bijkc} / C_{bkc}$ ,
- Potenzieren mit einem positiven Exponenten:  $\left(\kappa_{bijkc} / C_{bkc}\right)^{\beta_{bkc}}$ ,
- Addition mit Eins:  $1 + \left(\kappa_{bijkc} / C_{bkc}\right)^{\beta_{bkc}}$ ,
- Logarithmieren:  $\ln\left(1 + \left(\kappa_{bijkc} / C_{bkc}\right)^{\beta_{bkc}}\right)$  und
- Multiplikation mit einem Multiplikator:  $\alpha_{bkc} \cdot \ln\left(1 + \left(\kappa_{bijkc} / C_{bkc}\right)^{\beta_{bkc}}\right)$ .

Da sowohl  $\kappa_{bijkc}$  als auch die Einzelfunktionen stetig sind, ist auch die Nutzenfunktion in  $\kappa_{bijkc}$  stetig. Das Einkommen geht, wenn es berücksichtigt wird, additiv in die Funktion ein und genügt somit ebenfalls der Anforderung.

**(3) Homogen vom Grade Null in  $(y_{n_c}, \kappa_{bijkc})$** 

Betrachtet sei zunächst die Budgetbedingung des individuellen Optimierungsprogramms, das die Reisekostenkomponenten als objektive Größen beinhaltet:

$$y_{n_c} \geq p_{0c} \cdot x_{0c} + \sum_b \kappa_{bijkc} \cdot \quad (5.45)$$

Durch Umstellung nach dem Numéraire-Gut ergeben sich das Einkommen und die einzelnen Reisekostenkomponenten relativ zum Numéraire-Preis:

$$x_{0c} \leq \frac{y_{n_c}}{p_{0c}} - \frac{\sum_b \kappa_{bijkc}}{p_{0c}}, \quad (5.46)$$

wodurch das Einkommen und die Kosten stets durch  $p_{0c}$  dividiert werden. Hieraus resultiert, dass die Multiplikation aller Preise/Reisekosten mit einem konstanten Faktor  $k$  die Budgetmenge nicht verändert. In der indirekten Nutzenfunktion ist  $p_{0c}$  folglich zu berücksichtigen und es gilt dann:

$$\begin{aligned} & \Phi_{ijkc} \left( \frac{y_{n_c} \cdot k}{p_{0c} \cdot k} - \sum_b h \left( \frac{\kappa_{bijkc} \cdot k}{p_{0c} \cdot k} \right), \mathbf{X}_{ijkc}, pp_{ijkc}, \varepsilon_{ijkc} \right) \\ &= \Phi_{ijkc} \left( \left( \frac{y_{n_c}}{p_{0c}} - \sum_b h \left( \frac{\kappa_{bijkc}}{p_{0c}} \right) \right), \mathbf{X}_{ijkc}, pp_{ijkc}, \varepsilon_{ijkc} \right). \end{aligned} \quad (5.47)$$

Aufgrund der Annahme:  $p_{0c} = 1$ , erscheint  $p_{0c}$  nicht in der indirekten Nutzenfunktion, ist jedoch stets implizit enthalten und (5.47) gewährleistet. Unter dieser Voraussetzung erfüllt die EVA-Nutzenfunktion die Homogenität vom Grade Null in den Reisekosten.

**(4) Quasikonvex in allen  $\kappa_{bijk}$  und  $p_{0c}$**

Zum Nachweis der Quasikonvexität der Preise/Reisekosten in der indirekten Nutzenfunktion kann die Prüfung der Konvexität in  $\kappa_{bijk}$  herangezogen werden. Die Nutzenfunktion ist konvex in den Reisekosten, wenn gilt:

$$\frac{\partial^2 \Phi_{ijk} \left( y_{n_c} - \sum_b h(\kappa_{bijk}), \mathbf{X}_{ijk}, PP_{ijk}, \varepsilon_{ijk} \right)}{\partial \kappa_{bijk}^2} \geq 0 \quad \text{für } ijk \in A_c. \quad (5.48)$$

Die zweite partielle Ableitung der EVA-Nutzenfunktion nach  $\kappa_{bijk}$  lautet:

$$\frac{\partial^2 \Phi_{ijk}}{\partial \kappa_{bijk}^2} = \frac{\alpha_{bkc} \cdot \left( \frac{\kappa_{bijk}}{C_{bkc}} \right)^{(2 \cdot \beta_{bkc} - 2)} \cdot \beta_{bkc}^2 - \alpha_{bkc} \cdot (\beta_{bkc} - 1) \cdot \left( \frac{\kappa_{bijk}}{C_{bkc}} \right)^{(\beta_{bkc} - 2)} \cdot \beta_{bkc}}{C_{bkc}^2 \cdot \left( \left( \frac{\kappa_{bijk}}{C_{bkc}} \right)^{\beta_{bkc}} + 1 \right)^2} \quad (5.49)$$

Das Vorzeichen dieser Funktion und damit die Krümmung der EVA-Nutzenfunktion hängt wesentlich vom Parameter  $\beta_{bkc}$  ab. Zur Verdeutlichung sind zwei Verläufe mit den Parametern  $\alpha_{bkc} = 2$ ,  $C_{bkc} = 10$  und  $\beta_{bkc} = 3$  (links) und  $\beta_{bkc} = 1$  (rechts) in Abbildung 5-3 dargestellt.

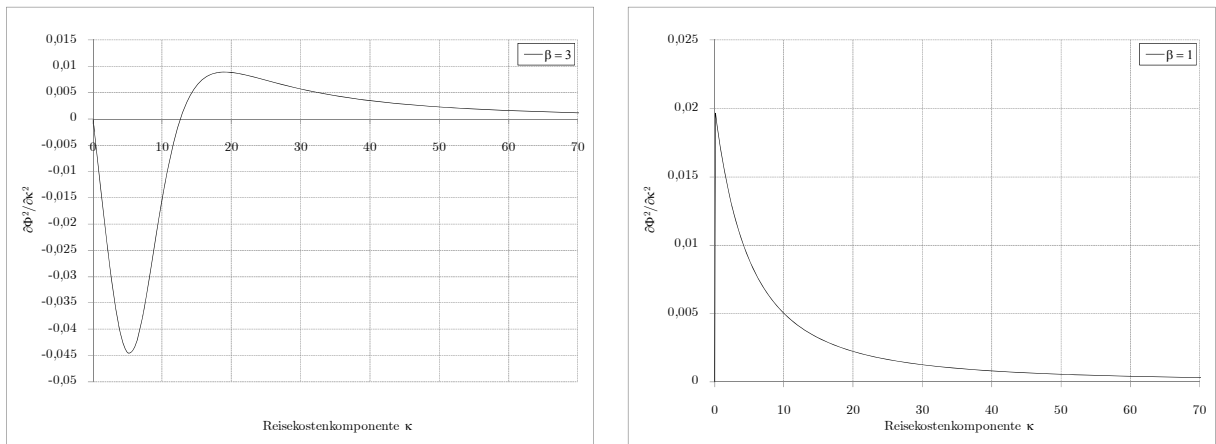


Abbildung 5-3: Verlauf der zweiten Ableitung der EVA-Nutzenfunktion nach der Reisekostenkomponente  $\kappa$

Das linke Diagramm repräsentiert den Verlauf für Parametersätze mit  $\beta_{bkc} > 1$ . Demnach ist die EVA-Nutzenfunktion im Nahbereich konkav und im mittleren und Fernbereich konvex. Durch den konkaven Verlauf erfüllt die EVA-Nutzenfunktion für  $\beta_{bkc} > 1$

nicht die Anforderung der globalen Konvexität. Allerdings bilden die EVA-Transformationen das Bewertungsverhalten der Verkehrsteilnehmer im Nahbereich sehr realistisch ab.

Das rechte Diagramm zeigt analog den grundsätzlichen Verlauf für alle  $\beta_{bkc} \leq 1$ . Für diese Fälle genügt die EVA-Nutzenfunktion der Anforderung der globalen Konvexität. Problematisch dabei ist, dass durch die Einschränkung des Definitionsbereichs von  $\beta_{bkc}$  die Aufwandsbewertung im Nahbereich, ähnlich der negativen Exponentialfunktion als äußere Bewertungsfunktion, stark abfällt.

Der konkave Bereich für  $\beta_{bkc} > 1$  wird durch die beiden Nullstellen der Funktion begrenzt. Die Nullstellen ergeben sich allgemein für den relevanten Bereich von  $\kappa_{bijkc} \geq 0$  und die Parameter  $\alpha_{bkc} > 0 \wedge \beta_{bkc} > 0 \wedge C_{bkc} > 0$  zu:

$$\begin{cases} \{0\} & \text{mit } \beta_{bkc} \leq 1 \\ \{0, C_{bkc} \cdot \beta_{bkc} \sqrt{\beta_{bkc} - 1}\} & \text{mit } \beta_{bkc} > 1 \end{cases} \quad (5.50)$$

Aus den Nullstellen wird ersichtlich, dass der Parameter  $\alpha_{bkc}$  keinen Einfluss auf die Krümmung der Nutzenfunktion besitzt. Der Bereich, für den die EVA-Nutzenfunktion konkav ist, wird im Wesentlichen durch den Parameter  $C_{bkc}$  vorgegeben und zusätzlich durch den multiplikativen Wurzelausdruck leicht beeinflusst.

Der teilweise konkave Verlauf der EVA-Nutzenfunktion impliziert partielle konkave Indifferenzkurvenbereiche. Durch die Kombination konkaver und konvexer Bereiche der Indifferenzkurven resultieren im Rahmen der Nutzenmaximierung multiple Optima, d. h. die Budgetgerade könnte zwei (oder mehr) unterschiedliche Indifferenzkurven tangieren. Es besteht dann theoretisch die Möglichkeit, dass die unterstellte indirekte Nutzenfunktion nicht der global optimalen Lösung des individuellen Optimierungsprogramms entspricht, sondern lediglich ein lokales Maximum beschreibt.

Die Bedingung der Globalität der Krümmung stellt eine Grundannahme der klassischen mikroökonomischen Konsumtheorie zur modelltheoretisch eindeutigen Bestimmung des Optimums dar. Sie ist somit eine Hypothese über das menschliche Verhalten, welche nicht psychologisch, sondern vielmehr mathematisch gerechtfertigt wird. In vielen Anwendungsbereichen der Mikroökonomie ist das vertretbar und bewährt. Im Gegensatz dazu ist diese Annahme im Rahmen der multimodalen Verkehrsnachfragemodellierung, bei der oft auch Grenzaufwandsbereiche von großer Bedeutung sind, problematisch.

Trotz dieses theoretischen Widerspruchs soll der Definitionsbereich von  $\beta_{bkc}$  der Reisekosten nicht eingeschränkt werden. Ist durch  $\beta_{bkc} > 1$  die Realität besser abbildbar, so sind entsprechende Werte zu verwenden, da dies das Ziel einer jeden Nachfragemodellierung sein sollte. Widersprüche zwischen den Annahmen der Konsumtheorie und

beobachteten Präferenzen von Konsumenten traten bereits in der Vergangenheit auf. Beispielsweise stehen empirisch nachweisbare Schwellenwerte und Grenzbereiche in der Wahrnehmung im Gegensatz zur unterstellten vollständigen Informiertheit der Konsumenten. Dieses Problem wurde jedoch mikroökonomisch analysiert und in die Theorie eingeführt (siehe COOMBS ET AL. [30] und GEORGESCU-ROEGEN [59]) sowie bereits in diskreten Wahlmodellen umgesetzt (siehe z. B. CANTILLO ET AL. [25]), was zeigt, dass die Konsumtheorie Weiterentwicklungen unterliegt.

Es wäre somit zum einen eine zukünftige Forschungsaufgabe, die oben aufgezeigte Problematik mikroökonomisch eingehend zu beleuchten und, wenn möglich, zu lösen.<sup>66</sup> Das kann im Rahmen dieser Arbeit nicht geleistet werden, da es sich dabei um mikroökonomische Grundlagenforschung handelt. Zum anderen sollte in verkehrsplanerischen Untersuchungen geprüft werden, ob mit der (derzeit mikroökonomisch geforderten) Einschränkung des Definitionsbereichs von  $\beta_{bkc}$  der Reisekosten realistische Ergebnisse erzielt werden können.

### 5.3 Änderung des internen Nutzens

Nachfolgend werden die Berechnungsansätze des Bewertungsmoduls dargelegt. Grundlage dafür sind die in Kapitel 4.2 vorgestellten Ansätze, die hinsichtlich der Anwendbarkeit bei Beachtung von Randsummenbedingungen und nichtlinearen Präferenzen zu prüfen und anzupassen sind. Zur Vereinfachung und klaren Strukturierung wird zunächst die Änderung des internen Nutzens (unter Beachtung von Randsummenbedingungen) bestimmt und in den nachfolgenden Kapiteln 5.4 und 5.5 die Thematiken der Monetarisierung (mit nichtlinearen Präferenzen) und der Bestimmung der Änderung der Konsumentenrente behandelt.

#### 5.3.1 Korrigierte Logsum-Differenz zur Bestimmung der Änderung des internen Nutzens

##### 5.3.1.1 Methodische Problematik der Logsum-Differenz

Die Differenz der Logsum-Terme des Mit- und Ohnefalls (Logsum-Differenz) stellt, wie in Kapitel 4.2.1 erläutert, ein exaktes Nutzenmaß dar, falls die Auswahlwahrscheinlichkeiten mittels eines Logit-Modells bestimmt werden. Grundlage hierfür sind die sich ändernden und quantifizierbaren Komponenten des deterministischen Nutzens der Alternativen. Das EVA-Logit-Modell weist jedoch neben den a priori bestimmbar Generalisierten

---

<sup>66</sup> Es sollte dabei beachtet werden, dass die modellierten Nichtlinearitäten lediglich Folge psychologischer Gewichtungen sind.

Aufwänden und Alternativencharakteristika Pseudo-Potentiale zur Einhaltung der Randsummenbedingungen auf, deren Einfluss auf das Nutzenergebnis noch zu untersuchen ist.

Die Stammfunktion des EVA-Logit-Modells ist ebenso wie beim Logit-Modell durch den Logsum-Term definiert. Da jedoch in diesem Ansatz die Pseudo-Potentiale enthalten sind, wird zur nachfolgenden Unterscheidung das resultierende Ergebnis als Erwartungswert des maximalen Pseudo-Nutzens  $E(\Phi_{n_c}^{**})$  bezeichnet. Die Differenz zwischen Mit- und Ohnefall entspricht dann  $\Delta E(\Phi_{n_c}^{**})$ . Die Wirkung der Pseudo-Potentiale auf das Nutzenergebnis wird nachfolgend anhand eines einfachen Rechenbeispiels mit drei Verkehrsbezirken in Abbildung 5-4 erläutert. Das Beispiel ist zur Vereinfachung auf die Zielwahl bei Beachtung unelastischer Randsummenbedingungen beschränkt und es erfolgt keine Unterteilung in einzelne Quelle-Ziel-Gruppen.

Ohnefall					Mitfall					
<b>Generalisierte Aufwände</b>					<b>Pseudo-Potentiale</b>					
i / j	1	2	3		i / j	1	2	3		
1	3,00	4,00	5,00		1	3,00	4,00	3,00		
2	4,00	2,00	2,00		2	4,00	2,00	2,00		
3	5,00	2,00	2,00		3	3,00	2,00	2,00		
					Σ	8,186			9,371	
<b>Verkehrsströme</b>					<b>Verkehrsströme</b>					
i / j	1	2	3	Q <sub>i</sub>	i / j	1	2	3	Q <sub>i</sub>	
1	43,73	11,09	5,18	60,00	1	28,56	8,85	22,59	60,00	
2	3,18	16,22	20,60	40,00	2	3,06	19,05	17,89	40,00	
3	3,08	42,69	54,22	100,00	3	18,38	42,10	39,52	100,00	
Z <sub>j</sub>	50,00	70,00	80,00		Z <sub>j</sub>	50,00	70,00	80,00		
				V	200,00				V	200,00
				E(Φ <sub>n<sup>**</sup>)</sub>	5,298				E(Φ <sub>n<sup>**</sup>)</sub>	5,298

Abbildung 5-4: Beispiel – Zielwahl mit unelastischen Randsummenbedingungen

Gegeben sind die Generalisierten Aufwände  $ga_{ij}$  für den Ohne- und Mitfall, wobei die Aufwände auf den Relationen 1-3 und 3-1 infolge einer Projektrealisierung sinken. Der Berechnungsansatz lautet:

$$\begin{aligned}
 v_{ij} &= \frac{e^{(-ga_{ij} + \theta_i + \tau_j)}}{\sum_{i'} \sum_{j'} e^{(-ga_{i'j'} + \theta_{i'} + \tau_{j'})}} \cdot V \\
 \sum_j v_{ij} &= Q_i \\
 \sum_i v_{ij} &= Z_j
 \end{aligned} \tag{5.51}$$



Die Verkehrsströme ergeben sich im Lösungsverfahren mit dem Ansatz der Informationsgewinnminimierung unter Einhaltung der Randsummenbedingungen (z. B. mit dem Multi-Modell). Weiterhin wird angenommen, dass die Aufwandsreduzierungen im Mitfall ausschließlich zu verlagertem Verkehr führen, Neuverkehr wird nicht realisiert ( $V^O = V^M$ ).

Die Pseudo-Potentiale werden im Ohne- und im Mitfall jeweils so bestimmt, dass die Einhaltung der Quell- und Zielverkehrsaufkommen sowie des Gesamtverkehrsaufkommens gewährleistet wird. Durch die Verringerung der Aufwände im Mitfall sinken die Pseudo-Potentiale der von der Aufwandsreduzierung betroffenen Quellen und Ziele (Verkehrsbezirk 1 und 3). Die Pseudo-Potentiale des Verkehrsbezirks 2 steigen hingegen, da für diesen Verkehrsbezirk, im Gegensatz zu den Verkehrsbezirken 1 und 3, keine Erreichbarkeitsverbesserung resultiert, die vorgegebenen Quell- und Zielverkehrsaufkommen aber eingehalten werden müssen. In der Gesamtsumme sinken die Pseudo-Potentiale, da insgesamt eine Verbesserung der Erreichbarkeiten innerhalb des Untersuchungsgebietes erzielt wird.

Aus Kapitel 5.2 ist bekannt, dass  $\sum_i \sum_j e^{(-ga_{ij} + \theta_i + \tau_j)} = V$  gilt, woraus sich die Logsum-Differenz bei konstantem Gesamtverkehrsaufkommen ( $V^O = V^M$ ) ergibt:

$$\begin{aligned} \Delta E(\Phi_n^{**}) &= \ln \left( \sum_i \sum_j e^{(-ga_{ij}^M + \theta_i^M + \tau_j^M)} \right) - \ln \left( \sum_i \sum_j e^{(-ga_{ij}^O + \theta_i^O + \tau_j^O)} \right) \\ &= \ln(V^M) - \ln(V^O) = \ln \left( \frac{V^M}{V^O} \right) = \ln(1) = 0 \end{aligned}$$

Auf das obige Beispiel angewandt resultiert:

$\Delta E(\Phi_n^{**}) = \ln(V^M) - \ln(V^O) = \ln(200) - \ln(200) = 5,298 - 5,298 = 0$ . Der Ansatz der Nutzenermittlung mittels der Logsum-Differenz scheitert somit bei der Beachtung von Randsummenbedingungen, da damit offensichtlich keine Nutzenänderung quantifiziert wird, die Verkehrsteilnehmer jedoch infolge der Reduzierung der Generalisierten Aufwände eine reale Nutzenerhöhung erzielen. Diese gesuchte und zu quantifizierende Nutzenänderung ist  $\Delta E(\Phi_n^*)$ . Es gilt folglich bei Beachtung von Randsummenbedingungen:

$$E(\Phi_n^*) \neq E(\Phi_n^{**}) \quad (5.52)$$

und damit:

$$\Delta E(\Phi_n^*) \neq \Delta E(\Phi_n^{**}). \quad (5.53)$$

Die Änderung des Erwartungswertes des maximalen Pseudo-Nutzens entspricht somit **nicht** der Änderung des Erwartungswertes des maximalen Nutzens.

Die obigen Aussagen sind auf den Fall elastischer Randsummenbedingungen übertragbar. Grundsätzlich gilt bei konstantem Gesamtverkehrsaufkommen  $V$ , sowohl bei elastischen als auch unelastischen Randsummenbedingungen, dass die Logsum-Differenz den Wert Null liefert. Ändert sich hingegen das Gesamtverkehrsaufkommen, dann gibt  $\Delta E(\Phi_n^{**})$  eine zusätzliche Nutzenänderung an. Die aufgezeigte Problematik bedarf einer genaueren Analyse, die in den nächsten Unterkapiteln durchgeführt wird.

Derzeit existieren nur wenige Ansätze, bei denen aus einem Verkehrsnachfragemodell mit Randsummenbedingungen unmittelbar der Nutzen ermittelt wird; dazu zählen vor allem NEUBURGER/WILCOX [112], WILLIAMS [155], MARTÍNEZ/ARAYA [103] und SIMMONDS/BATES [33]. Diese Ansätze beruhen jedoch alle auf dem Zielwahlmodell auf Basis der Entropiemaximierung und unterscheiden sich von den folgenden Untersuchungen sowohl hinsichtlich des Verkehrsnachfragemodells als auch in der methodischen Herangehensweise zur Nutzenbestimmung.<sup>67</sup>

### 5.3.1.2 Korrigierte Logsum-Differenz für unelastische Randsummenbedingungen

Zur Bestimmung der Änderung des internen Nutzens mittels des EVA-Logit-Modells dient als Ausgangspunkt die folgende Differentialbetrachtung für einen repräsentativen Verkehrsteilnehmer  $n$  der Quelle-Ziel-Gruppe  $c$ :

$$\Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) = E(\Phi_{n_c}^{**M}) - E(\Phi_{n_c}^{**O}) = \int_{PF} dE(\Phi_{n_c}^{**}). \quad (5.54)$$

Unter Beachtung der Zusammenhänge in (2.11) und (4.25) kann das Differential  $dE(\Phi_{n_c}^{**})$  ausgedrückt werden durch:

$$dE(\Phi_{n_c}^{**}) = \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijk}(\bar{\Phi}_{A_c}) d\bar{\Phi}_{ijk} \quad (5.55)$$

und es ergibt sich:

$$\Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) = \int_{PF} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijk}(\bar{\Phi}_{A_c}) d\bar{\Phi}_{ijk}. \quad (5.56)$$

Es handelt sich dabei um ein Linienintegral, das allgemein vom Integrationspfad  $PF$  abhängt (siehe Kapitel 2.5.2). Da für das EVA-Logit-Modell die Stammfunktion (Logsum-Term) bekannt ist, kann (5.56) jedoch pfadunabhängig gelöst werden. Allerdings liefert die Logsum-Differenz, wie oben gezeigt, nicht die gesuchte Nutzendifferenz. Es ist somit

---

<sup>67</sup> Der Ansatz von SIMMONDS und BATES besitzt zu den hier aufgeführten Darlegungen einen ähnlichen methodischen Grundgedanken zur Nutzenbestimmung (nicht bzgl. des Verkehrsnachfragemodells), wobei deren Zielgröße jedoch die Konsumentenrente und nicht (wie hier) deren Änderung ist.

für die weiteren Betrachtungen eine eingehende Analyse des Integrals des EVA-Logit-Modells notwendig.

Für den Fall unelastischer Randsummenbedingungen gilt  $\bar{\Phi}_{ijkc} = -ga_{ijkc} + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc}$ . Darüber hinaus kann das totale Differential  $d\bar{\Phi}_{ijkc}$  durch die Summe der partiellen Differentiale ausgedrückt werden (vgl. CHIANG/WAINWRIGHT [29] S. 184 ff.):

$$d\bar{\Phi}_{ijkc} = -\frac{\partial \bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial ga_{ijkc}} dga_{ijkc} + \frac{\partial \bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial \theta_{ic}} d\theta_{ic} + \frac{\partial \bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial \tau_{jc}} d\tau_{jc} + \frac{\partial \bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial \psi_{kc}} d\psi_{kc}. \quad (5.57)$$

Aufgrund der additiven und ungewichteten Aggregation des Generalisierten Aufwands<sup>68</sup> und der Pseudo-Aufwände in der EVA-Nutzenfunktion gilt:

$$\frac{\partial \bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial ga_{ijkc}} = \frac{\partial \bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial \theta_{ic}} = \frac{\partial \bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial \tau_{jc}} = \frac{\partial \bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial \psi_{kc}} = 1 \quad (5.58)$$

und (5.57) kann vereinfacht werden zu:

$$d\bar{\Phi}_{ijkc} = -dga_{ijkc} + d\theta_{ic} + d\tau_{jc} + d\psi_{kc}. \quad (5.59)$$

Mit  $P_{ijkc} = P_{ijkc}(\bar{\Phi}_{A,c})$  gilt dann:

$$dE(\Phi_{n_c}^{**}) = \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} (-dga_{ijkc} + d\theta_{ic} + d\tau_{jc} + d\psi_{kc}) \quad (5.60)$$

und in (5.56) unter Beachtung der Integrationsgrenzen eingesetzt resultiert:

$$\Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) = \int_{\bar{\Phi}_{A,c}^O}^{\bar{\Phi}_{A,c}^M} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} (-dga_{ijkc} + d\theta_{ic} + d\tau_{jc} + d\psi_{kc}). \quad (5.61)$$

Weiterhin ist die Zerlegung des Integrals (5.61) notwendig. Da die Stammfunktion des EVA-Logit-Modells existiert, kann der Ausdruck  $\Delta E(\Phi_{n_c}^{**})$  zwischen  $\bar{\Phi}_{A,c}^O = (ga_{A,c}^O, \theta_{A,c}^O, \tau_{A,c}^O, \psi_{A,c}^O)$  als festem Ausgangspunkt (Ohnefall) und  $\bar{\Phi}_{A,c}^M = (ga_{A,c}^M, \theta_{A,c}^M, \tau_{A,c}^M, \psi_{A,c}^M)$  als variablem Punkt (Mitfall), die durch einen beliebigen Pfad (pfadunabhängig) miteinander verbunden sind, eindeutig bestimmt werden durch (vgl. MERZIGER ET AL. [106] S. 148):

<sup>68</sup> Die Einzelaufwände sind untereinander nichtlinear gewichtet.

$$\begin{aligned}
\Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right) = & - \int_{g a_{A_c}^O}^{g a_{A_c}^M} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} \left( g a_{A_c}^M, \theta_{A_c}^O, \tau_{A_c}^O, \psi_{A_c}^O \right) d g a_{ijkc} \\
& + \int_{\theta_{A_c}^O}^{\theta_{A_c}^M} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} \left( g a_{A_c}^M, \theta_{A_c}^M, \tau_{A_c}^O, \psi_{A_c}^O \right) d \theta_{ic} \\
& + \int_{\tau_{A_c}^O}^{\tau_{A_c}^M} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} \left( g a_{A_c}^M, \theta_{A_c}^M, \tau_{A_c}^M, \psi_{A_c}^O \right) d \tau_{jc} \\
& + \int_{\psi_{A_c}^O}^{\psi_{A_c}^M} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} \left( g a_{A_c}^M, \theta_{A_c}^M, \tau_{A_c}^M, \psi_{A_c}^M \right) d \psi_{kc}
\end{aligned} \tag{5.62}$$

$\Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right)$  resultiert aus der Summe der Integrale über die einzelnen Einflussgrößen, deren Werte mittels der Logsum-Differenz, unter Konstanthaltung aller anderen Integrationsvariablen, nacheinander bestimmt werden können. Allerdings sind die berechneten Nutzenanteile der Integrale abhängig von der Integrationsreihenfolge und eine Nutzenzuweisung je Einflussgröße ist nicht sinnvoll möglich (siehe Kapitel 4.2.1.2). Auf das Gesamtergebnis hat die Reihenfolge der Integration jedoch keinen Einfluss und es kann vereinfacht geschrieben werden:

$$\begin{aligned}
\Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right) = & - \int_{g a_{A_c}^O}^{g a_{A_c}^M} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} d g a_{ijkc} + \int_{\theta_{A_c}^O}^{\theta_{A_c}^M} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} d \theta_{ic} \\
& + \int_{\tau_{A_c}^O}^{\tau_{A_c}^M} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} d \tau_{jc} + \int_{\psi_{A_c}^O}^{\psi_{A_c}^M} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} d \psi_{kc}
\end{aligned} \tag{5.63}$$

Die gesuchte Größe der Änderung des Erwartungswertes des internen Nutzens eines repräsentativen Verkehrsteilnehmers infolge der Realisierung einer Verkehrsmaßnahme entspricht allgemein dem Integral der Nachfragefunktion in den Grenzen der Generalisierten Aufwände des Mit- und Ohnefalls (vgl. WILLIAMS [155] S. 154):

$$\Delta E\left(\Phi_{n_c}^*\right) = - \int_{g a_{A_c}^O}^{g a_{A_c}^M} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} d g a_{ijkc} . \tag{5.64}$$

Zur Bestimmung von (5.64) wird zunächst (5.63) umgestellt und (5.64) implizit ausgedrückt:

$$\begin{aligned} \Delta E\left(\Phi_{n_c}^*\right) &= \Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right) - \int_{\theta_{A_c^c}^O}^{\theta_{A_c^c}^M} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} d\theta_{ic} - \int_{\tau_{A_c^c}^O}^{\tau_{A_c^c}^M} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} d\tau_{jc} \\ &\quad - \int_{\psi_{A_c^c}^O}^{\psi_{A_c^c}^M} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} d\psi_{kc} \end{aligned} \quad (5.65)$$

Die mittels der Logsum-Differenz eindeutig bestimmbare Größe  $\Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right)$  wird somit formal um den Anteil der Pseudo-Potentiale bereinigt, deren Beträge jedoch von der Integrationsreihenfolge abhängen. Ausdruck (5.65) kann weiterhin vereinfacht werden, da, wie in Kapitel 5.2 gezeigt wurde, für das EVA-Logit-Modell

$$\psi_{kc}^O = \psi_{kc}^M \quad (5.66)$$

gilt. Die Pseudo-Potentiale gehen folglich als im Ohnefall bestimmte verkehrsmittel-spezifische Präferenzen in den Mitfall ein. Das dritte Integral in (5.65) liefert somit den Wert Null und kann vernachlässigt werden:

$$\Delta E\left(\Phi_{n_c}^*\right) = \Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right) - \int_{\theta_{A_c^c}^O}^{\theta_{A_c^c}^M} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} d\theta_{ic} - \int_{\tau_{A_c^c}^O}^{\tau_{A_c^c}^M} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} d\tau_{jc} \quad (5.67)$$

Die Eindeutigkeit von  $\Delta E\left(\Phi_{n_c}^*\right)$  hängt somit nur von den Integralen nach den quell- und zielspezifischen Pseudo-Potentialen ab. Diese Integrale sind eindimensional und weisen nur die Dimension der Quell- oder Zielwahl auf. Da eine Änderung von  $\theta_{ic}$  keinen Einfluss auf die Auswahlwahrscheinlichkeiten der Ziele und Verkehrsmittel besitzt (gleiches gilt reziprok für die Zielseite), kann geschrieben werden:

$$\Delta E\left(\Phi_{n_c}^*\right) = \Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right) - \int_{PF} \sum_i P_{ic} d\theta_{ic} - \int_{PF} \sum_j P_{jc} d\tau_{jc} \quad (5.68)$$

$P_{ic}$       Auswahlwahrscheinlichkeit der Quelle  $i$   
 $P_{jc}$       Auswahlwahrscheinlichkeit des Ziels  $j$

$P_{ic}$  und  $P_{jc}$  entsprechen der Nachfrage eines repräsentativen Verkehrsteilnehmers der Quelle-Ziel-Gruppe  $c$  nach den Quellen und Zielen. Die (Gesamt)Nachfragefunktionen<sup>69</sup> zur Bestimmung von  $P_{ic}$  und  $P_{jc}$  sind nicht explizit definiert und deren Stammfunktionen unbekannt. Aufgrund möglicher multipler Änderungen der Pseudo-Potentiale sind die Werte der Integrale der Nachfragefunktionen abhängig vom Integrationspfad.

---

<sup>69</sup> Es handelt sich dabei um **eine** Funktion zur Bestimmung der Auswahlwahrscheinlichkeiten der Quellen und **eine** Funktion zur Bestimmung der Auswahlwahrscheinlichkeiten der Ziele. Die Einzelwerte sind implizit durch die Summierung der Auswahlwahrscheinlichkeiten  $P_{ijkc}$  über die jeweils nicht betrachteten Dimensionen gegeben.

Der Ansatz (5.68) stellt die Grundlage für die Berechnung der Änderung des internen Nutzens eines repräsentativen Verkehrsteilnehmers der Quelle-Ziel-Gruppe  $c$  dar. Zur Bestimmung der gesuchten Nutzenänderung aller Verkehrsteilnehmer einer Quelle-Ziel-Gruppe muss die Nutzenänderung des repräsentativen Verkehrsteilnehmers mit dem Gesamtverkehrsaufkommen multipliziert werden, wobei nachfolgend in drei relevante Fälle zu unterscheiden ist:

- (1) keine Änderung der Verkehrsaufkommen,
- (2) einheitliche Änderung der Verkehrsaufkommen und
- (3) verkehrsbezirksspezifische Änderung der Verkehrsaufkommen.

**Ad (1):**

Bei diesem Fall sind die Quell-, Ziel- und Gesamtverkehrsaufkommen konstant:

$$Q_{ic}^O = Q_{ic}^M = Q_{ic}, \quad Z_{jc}^O = Z_{jc}^M = Z_{jc}, \quad V_c^O = V_c^M = V_c. \quad (5.69)$$

Daraus resultieren die Auswahlwahrscheinlichkeiten  $P_{ic}$  und  $P_{jc}$ :

$$\begin{aligned} P_{ic}^O &= P_{ic}^M = P_{ic} = \frac{Q_{ic}}{V_c} \\ P_{jc}^O &= P_{jc}^M = P_{jc} = \frac{Z_{jc}}{V_c} \end{aligned} \quad (5.70)$$

Es handelt sich somit um konstante, durch die Verkehrserzeugung eindeutig bestimmte und vorgegebene Werte. Für diesen Sonderfall sind die Werte der Integrale in (5.68) pfadunabhängig<sup>70</sup>, weshalb die Summierungen über  $i$  und  $j$  und die entsprechenden Auswahlwahrscheinlichkeiten aus den Integralen herausgezogen werden können:

$$\Delta E(\Phi_{n_c}^*) = \Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) - \sum_i P_{ic} \cdot \int_{\theta_{ic}^O}^{\theta_{ic}^M} d\theta_{ic} - \sum_j P_{jc} \cdot \int_{\tau_{jc}^O}^{\tau_{jc}^M} d\tau_{jc}. \quad (5.71)$$

Die Lösung der Integrale liefert dann:

$$\Delta E(\Phi_{n_c}^*) = \Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) - \sum_i P_{ic} \cdot (\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O) - \sum_j P_{jc} \cdot (\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O). \quad (5.72)$$

Aufgrund von  $V_c^O = V_c^M$  gilt  $\Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) = 0$  und es resultiert:

$$\Delta E(\Phi_{n_c}^*) = - \sum_i P_{ic} \cdot (\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O) - \sum_j P_{jc} \cdot (\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O). \quad (5.73)$$

---

<sup>70</sup> Pfadunabhängigkeit ist gewährleistet, da eine Änderung der Pseudo-Potentiale keinen Einfluss auf die Nachfrage hat, wodurch die JACOBI-Matrix der Gesamtnachfragefunktionen  $P_{ic}$  und  $P_{jc}$  symmetrisch ist (siehe Kapitel 4.1.2).

Die Änderung des Erwartungswertes des maximalen Nutzens eines repräsentativen Verkehrsteilnehmers wird somit durch die Änderung der Pseudo-Potentiale ausgedrückt.

Zur Bestimmung der Änderung des internen Nutzens aller Verkehrsteilnehmer der Quelle-Ziel-Gruppe  $c$  muss (5.73) mit  $V_c$  multipliziert werden:

$$\Delta E(\Phi_c^*) = - \left( \sum_i P_{ic} \cdot (\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O) + \sum_j P_{jc} \cdot (\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O) \right) \cdot V_c, \tag{5.74}$$

woraus durch Ausmultiplizieren und Umstellen folgt:

$$\Delta E(\Phi_c^*) = \sum_i Q_{ic} \cdot (\theta_{ic}^O - \theta_{ic}^M) + \sum_j Z_{jc} \cdot (\tau_{jc}^O - \tau_{jc}^M). \tag{5.75}$$

Das Ergebnis liefert ein exaktes Nutzenmaß, das genau der Nutzenänderung infolge der verkehrsprojektinduzierten Änderung der Generalisierten Aufwände entspricht. Dabei wird die Nutzenänderung je Quell- und Zielverkehrsaufkommen und damit je Verkehrsbezirk in Abhängigkeit der Änderung der Pseudo-Potentiale quantifiziert. Zur Verdeutlichung ist die Ermittlung der Nutzenänderung als Fläche unterhalb der unelastischen Nachfragekurve des Zielverkehrsaufkommens in Abbildung 5-5 dargestellt, wobei O und M die berechneten Gleichgewichtssituationen repräsentieren.

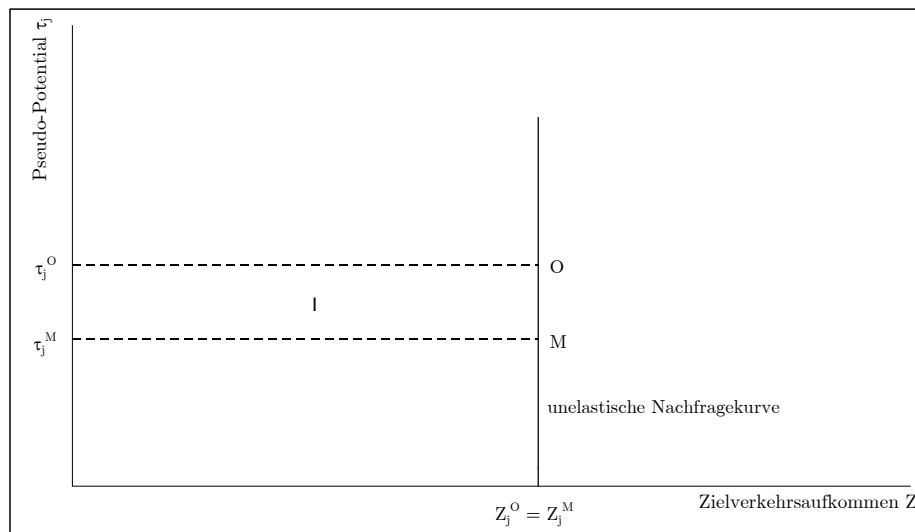


Abbildung 5-5: Nutzenänderung bei konstantem Zielverkehrsaufkommen

Die Abbildung zeigt, dass die Nutzenänderung durch die Reduzierung der Pseudo-Potentiale repräsentiert wird (Fläche I). Ist beispielsweise der Verkehrsbezirk 1 durch eine Verkehrsinvestition besser (als Ziel) erreichbar, so sinkt das Pseudo-Potential des Ziels, um das Zielverkehrsaufkommen konstant zu halten. Die projektinduzierte Reduzierung der Pseudo-Potentiale führt so zu einem Nutzensgewinn (siehe (5.75)), da die Verkehrsteilnehmer (im Modell) weniger „gezwungen“ werden, das Ziel zu wählen. Die Zusammenhänge gelten analog für den Nutzenanteil des Quellverkehrsaufkommens.

**Ad (2):**

Im Unterschied zu (1) verursacht die Verkehrsmaßnahme eine Änderung des Verkehrsverhaltens der Verkehrsteilnehmer in Form der Erhöhung/Reduzierung der Anzahl an Wegen pro Zeiteinheit. Die Änderung der (elastischen) Produktionsraten der Verkehrsteilnehmer ist dabei im gesamten Untersuchungsgebiet konstant. Daraus resultieren um einen einheitlichen Steigerungsfaktor  $k$  geänderte Quell-, Ziel- und Gesamtverkehrsaufkommen und es gilt:

$$Q_{ic}^M = k \cdot Q_{ic}^O, \quad Z_{jc}^M = k \cdot Z_{jc}^O, \quad V_c^M = k \cdot V_c^O. \quad (5.76)$$

Die in der Verkehrserzeugung bestimmten veränderten Quell-, Ziel- und Gesamtverkehrsaufkommen sind für die Nutzenberechnung zu berücksichtigen.

Da jedes Quell- und Zielverkehrsaufkommen sowie das Gesamtverkehrsaufkommen des Mitfalls ein um den einheitlichen Faktor  $k$  erhöhtes Verkehrsaufkommen des Ohnefalls darstellt, gilt für die Auswahlwahrscheinlichkeiten der Quellen und Ziele:

$$P_{ic} = \frac{Q_{ic}^M}{V_c^M} = \frac{Q_{ic}^O}{V_c^O}, \quad P_{jc} = \frac{Z_{jc}^M}{V_c^M} = \frac{Z_{jc}^O}{V_c^O}. \quad (5.77)$$

Durch die Konstanz von  $P_{ic}$  und  $P_{jc}$  sind die Werte der Integrale in (5.68) wiederum pfadunabhängig und es resultiert (5.71):

$$\Delta E(\Phi_{n_c}^*) = \Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) - \sum_i P_{ic} \cdot \int_{\theta_{ic}^O}^{\theta_{ic}^M} d\theta_{ic} - \sum_j P_{jc} \cdot \int_{\tau_{jc}^O}^{\tau_{jc}^M} d\tau_{jc}.$$

Die Lösung der Integrale liefert dann analog (5.72):

$$\Delta E(\Phi_{n_c}^*) = \Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) - \sum_i P_{ic} \cdot (\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O) - \sum_j P_{jc} \cdot (\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O).$$

Für den hier betrachteten Fall  $V_c^O \neq V_c^M$  ergibt sich jedoch im Unterschied zu (1)  $\Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) \neq 0$ . Die Logsum-Differenz darf somit nicht vernachlässigt werden. Unter Beachtung des Zusammenhangs:

$$\begin{aligned} \Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) &= \ln \left( \sum_i \sum_j \sum_k e^{-g a_{ijk}^M + \theta_{ic}^M + \tau_{jc}^M + \psi_{kc}^O} \right) - \ln \left( \sum_i \sum_j \sum_k e^{-g a_{ijk}^O + \theta_{ic}^O + \tau_{jc}^O + \psi_{kc}^O} \right) \\ &= \ln(V_c^M) - \ln(V_c^O) \\ &= \ln \left( \frac{V_c^M}{V_c^O} \right) \end{aligned} \quad (5.78)$$

kann dann  $\Delta E(\Phi_{n_c}^*)$  formuliert werden:



$$\Delta E(\Phi_{n_c}^*) = \ln\left(\frac{V_c^M}{V_c^O}\right) - \sum_i P_{ic} \cdot (\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O) - \sum_j P_{jc} \cdot (\tau_{ic}^M - \tau_{ic}^O). \quad (5.79)$$

Die Berechnung der Nutzenänderung aller Verkehrsteilnehmer einer Quelle-Ziel-Gruppe ergibt sich durch die Multiplikation mit dem Gesamtverkehrsaufkommen, für das bei Beachtung von Neuverkehr der Mittelwert der Verkehrsaufkommen des Mit- und Ohnefalls (siehe Kapitel 4.2.1) verwendet wird:

$$\Delta E(\Phi_c^*) = \left[ \ln\left(\frac{V_c^M}{V_c^O}\right) - \sum_i P_{ic} \cdot (\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O) - \sum_j P_{jc} \cdot (\tau_{ic}^M - \tau_{ic}^O) \right] \cdot \left( \frac{V_c^O + V_c^M}{2} \right). \quad (5.80)$$

Durch Ausmultiplizieren und Umstellen resultiert:

$$\begin{aligned} \Delta E(\Phi_c^*) = & \ln\left(\frac{V_c^M}{V_c^O}\right) \cdot \left(\frac{V_c^O + V_c^M}{2}\right) + \sum_i \left(\frac{Q_{ic}^O + Q_{ic}^M}{2}\right) \cdot (\theta_{ic}^O - \theta_{ic}^M) \\ & + \sum_j \left(\frac{Z_{jc}^O + Z_{jc}^M}{2}\right) \cdot (\tau_{ic}^O - \tau_{ic}^M) \end{aligned} \quad (5.81)$$

Das Ergebnis ist wiederum – unter Annahme einer linearen Nachfragefunktion des Gesamtverkehrsaufkommens – ein exaktes Nutzenmaß. Zur Verdeutlichung wird der Zusammenhang für den Nutzenanteil des Zielverkehrsaufkommens in Abbildung 5-6 dargestellt, wobei die modellierten Gleichgewichtssituationen des Mit- und Ohnefalls durch die Punkte O und M markiert sind.

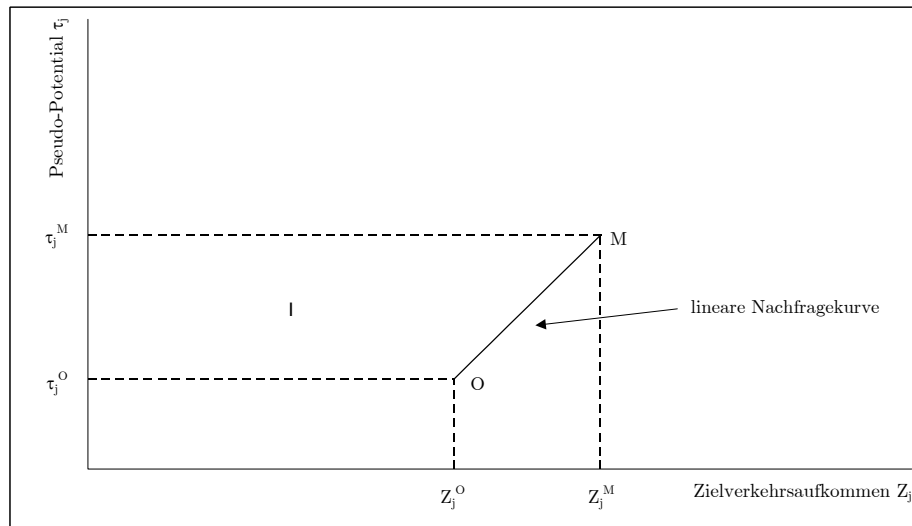


Abbildung 5-6: Nutzenänderung bei Erhöhung des Zielverkehrsaufkommens

Die Nutzenänderung wird in der obigen Abbildung durch die Fläche I repräsentiert. Die in der Verkehrserzeugung bestimmten höheren Verkehrsaufkommen (Neuverkehr) im

Mitfall werden im EVA-Logit-Modell durch höhere Pseudo-Potentiale eingehalten. Die Erhöhung der Pseudo-Potentiale führt zu einer Nutzenreduzierung. Die Zusammenhänge gelten analog für den Nutzenanteil des Quellverkehrsaufkommens.

Der Neuverkehr verursacht im Modell eine Erhöhung respektive eine (gegenüber einem Mitfall ohne Neuverkehr) geringere Reduzierung der Pseudo-Potentiale. Durch diesen quell- und zielspezifischen negativen Nutzen des Neuverkehrs wird die zusätzliche Konkurrenz der neu hinzukommenden Verkehrsteilnehmer für die vorher bereits vorhandenen Verkehrsteilnehmer ausgedrückt. Der (positive) Nutzen der Verkehrsteilnehmer des Neuverkehrs wird durch den ersten Term der rechten Seite in (5.81) quantifiziert und resultiert direkt aus der Logsum-Differenz. Dieser Wert ist für  $V_c^M > V_c^O$  stets größer Null.

**Ad (3):**

Dieser Fall unterscheidet sich zu (2) dahingehend, dass die Produktionsraten in der Verkehrserzeugung in Abhängigkeit der Betroffenheit von der Änderung der Generalisierten Aufwände je Verkehrsbezirk variieren können. Die Quell- und Zielverkehrsaufkommen ändern sich folglich um verkehrsbezirksspezifische Faktoren  $k$ :

$$Q_{ic}^M = k_{Q_{ic}} \cdot Q_{ic}^O, \quad Z_{jc}^M = k_{Z_{jc}} \cdot Z_{jc}^O. \quad (5.82)$$

Das Gesamtverkehrsaufkommen setzt sich aus der Summe der Quell- und Zielverkehrsaufkommen zusammen und es resultiert:

$$\begin{aligned} \sum_i Q_{ic}^O &= \sum_j Z_{jc}^O = V_c^O \\ \sum_i Q_{ic}^M &= \sum_j Z_{jc}^M = V_c^M \end{aligned} \quad (5.83)$$

Daraus folgt der Steigerungsfaktor des Gesamtverkehrsaufkommens:

$$k_{V_c} = \frac{V_c^M}{V_c^O}. \quad (5.84)$$

Die Steigerungsfaktoren der Quell-, Ziel- und des Gesamtverkehrsaufkommens unterscheiden sich und es gilt:

$$P_{ic}^O \neq P_{ic}^M, \quad P_{jc}^O \neq P_{jc}^M. \quad (5.85)$$

Im Gegensatz zu den Fällen (1) und (2) sind  $P_{ic}$  und  $P_{jc}$  somit nicht unabhängig von den Pseudo-Potentiale und die Werte der Integrale in (5.68) sind pfadabhängig. Zur Integration von  $P_{ic}$  über  $\theta_{ic}$  und  $P_{jc}$  über  $\tau_{jc}$  sind die Gesamtnachfragefunktionen nach  $P_{ic}$  und  $P_{jc}$  heranzuziehen, die jedoch nicht bekannt sind.

Der funktionale Zusammenhang zwischen den Auswahlwahrscheinlichkeiten und den Pseudo-Potentialen ist im EVA-Logit-Modell nicht formal geschlossen bestimmbar, da er das Resultat eines iterativen Lösungsalgorithmus ist. Somit sind alle einzelnen  $P_{ic}$  und  $P_{jc}$  nur für die Gleichgewichtssituationen des Ohne- und Mitfalls bekannt. Unter der Annahme linearer Nachfragefunktionen können die Mittelwerte der Auswahlwahrscheinlichkeiten bestimmt werden und die Integrale in (5.68) lassen sich vereinfachen zu:

$$\Delta E(\Phi_{n_c}^*) = \Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) - \sum_i \left( \frac{P_{ic}^O + P_{ic}^M}{2} \right) \cdot \int_{\theta_{ic}^O}^{\theta_{ic}^M} d\theta_{ic} - \sum_j \left( \frac{P_{jc}^O + P_{jc}^M}{2} \right) \cdot \int_{\tau_{jc}^O}^{\tau_{jc}^M} d\tau_{jc}. \quad (5.86)$$

Die Lösung der Integrale liefert dann:

$$\Delta E(\Phi_{n_c}^*) = \Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) - \sum_i \left( \frac{P_{ic}^O + P_{ic}^M}{2} \right) \cdot (\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O) - \sum_j \left( \frac{P_{jc}^O + P_{jc}^M}{2} \right) \cdot (\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O). \quad (5.87)$$

Die Nutzenänderung für alle Verkehrsteilnehmer der Quelle-Ziel-Gruppe  $c$  resultiert aus der Multiplikation mit dem Gesamtverkehrsaufkommen, für die analog zu (2) wiederum eine lineare Nachfragekurve angenommen wird. Im zweiten und dritten Term der rechten Seite in (5.87) sind bereits die linearen Übergänge zwischen Ohne- und Mitfall formal berücksichtigt, weshalb die Auswahlwahrscheinlichkeiten mit den entsprechenden Gesamtverkehrsaufkommen des Ohne- und Mitfalls multipliziert werden. Unter Beachtung von (5.78) resultiert:

$$\begin{aligned} \Delta E(\Phi_c^*) = \ln \left( \frac{V_c^M}{V_c^O} \right) \cdot \left( \frac{V_c^O + V_c^M}{2} \right) + \sum_i \left( \frac{Q_{ic}^O + Q_{ic}^M}{2} \right) \cdot (\theta_{ic}^O - \theta_{ic}^M) \\ + \sum_j \left( \frac{Z_{jc}^O + Z_{jc}^M}{2} \right) \cdot (\tau_{jc}^O - \tau_{jc}^M) \end{aligned} \quad (5.88)$$

Die Lösung entspricht dem Ansatz in (5.81) und stellt damit die allgemeine Lösung im Fall unelastischer Randsummenbedingungen dar. Die Lösung enthält ebenfalls Fall (1) als Sonderfall, mit  $Q_{ic}^O = Q_{ic}^M$ ,  $Z_{jc}^O = Z_{jc}^M$  und  $V_c^O = V_c^M$ . In Anhang D wird gezeigt, wie die Nutzenberechnung verkehrstrombasiert erfolgen kann, wobei die Pseudo-Potentiale auf die Verkehrsströme verteilt werden.

### 5.3.1.3 Korrigierte Logsum-Differenz für elastische Randsummenbedingungen

Aufgrund der erst in der simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahl endgültig bestimmten Quell- und Zielverkehrsaufkommen, bedarf die Nutzenberechnung bei der Einhaltung von elastischen Randsummenbedingungen einer gesonderten Betrachtung. Dabei ist auch zu beachten, dass Quell- und/oder Zielpotentiale in die EVA-Nutzenfunktion eingehen. Die methodische Herangehensweise ist jedoch mit den Ausführungen zu den unelastischen

Randsummenbedingungen identisch, weshalb nur die abweichenden Aspekte nachfolgend dargestellt werden.

Ausgangspunkt sind die Ansätze (5.54) bis (5.56), wobei hier der allgemeine Fall mit quell- und zieleseitigen Potentialen betrachtet wird und  $\bar{\Phi}_{ijkc} = -ga_{ijkc} + h(Q_{ic}^P) + h(Z_{jc}^P) + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc}$  gilt. Das totale Differential  $d\bar{\Phi}_{ijkc}$  wird gebildet durch:

$$\begin{aligned} d\bar{\Phi}_{ijkc} = & -\frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial ga_{ijkc}} dga_{ijkc} + \frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial h(Q_{ic}^P)} dh(Q_{ic}^P) + \frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial h(Z_{jc}^P)} dh(Z_{jc}^P) \\ & + \frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial\theta_{ic}} d\theta_{ic} + \frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial\tau_{jc}} d\tau_{jc} + \frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial\psi_{kc}} d\psi_{kc} \end{aligned} \quad (5.89)$$

Die Quell- und Zielpotentiale spiegeln die Attraktivität und die Flächennutzung der Verkehrsbezirke wider. Die Potentiale können grundsätzlich zwischen dem Mit- und Ohnefall differieren, allerdings sind im Rahmen der Bewertung von Verkehrsmaßnahmen nur jene Änderungen zu berücksichtigen, die durch diese Maßnahme hervorgerufen werden. Potentialänderungen werden hier nicht betrachtet (siehe dazu Kapitel 5.7) und es gilt  $dh(Q_{ic}^P) = 0$  sowie  $dh(Z_{jc}^P) = 0$ . Folglich resultiert wiederum (5.57) und (5.59):

$$d\bar{\Phi}_{ijkc} = -dga_{ijkc} + d\theta_{ic} + d\tau_{jc} + d\psi_{kc}.$$

Durch Einsetzen ergibt sich (5.61):

$$\Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) = \int \sum_{PF} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} (-dga_{ijkc} + d\theta_{ic} + d\tau_{jc} + d\psi_{kc}).$$

Die Pseudo-Potentiale haben bei elastischen Randsummenbedingungen die gleichen Auswirkungen auf die Nutzenberechnung wie bei unelastischen Randsummenbedingungen. Die Ableitungen und Umstellungen zur Bestimmung von  $\Delta E(\Phi_{n_c}^*)$  im Rahmen der Betrachtung unelastischer Randsummenbedingungen lassen sich somit auch auf den Fall elastischer Randsummenbedingungen übertragen und es resultiert der Ansatz (5.68):

$$\Delta E(\Phi_{n_c}^*) = \Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) - \int \sum_{PF} P_{ic} d\theta_{ic} - \int \sum_{PF} P_{jc} d\tau_{jc}.$$

Bei elastischen Randsummenbedingungen sind die Auswahlwahrscheinlichkeiten der Quell- und Zielverkehrsaufkommen nicht durch die Verkehrserzeugung fixiert und neben den Raumstrukturgrößen auch – in den Grenzen der minimalen und maximalen Verkehrsaufkommen – von der Lagegunst und damit den Aufwänden abhängig. Es gelten somit, analog zu Fall (3) bei unelastischen Randsummenbedingungen, die Ungleichungen (5.85):

$$P_{ic}^O \neq P_{ic}^M, \quad P_{jc}^O \neq P_{jc}^M.$$

Die Lösungen der Integrale sind folglich wiederum pfadabhängig. Da nur für den Mit- und Ohnefall die Wahrscheinlichkeiten bekannt sind, muss eine Annahme über den Integrationsweg zwischen den Gleichgewichtssituationen getroffen werden. Hierfür wird erneut ein linearer Pfad gewählt und es ergibt sich (5.86):

$$\Delta E(\Phi_{n_c}^*) = \Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) - \sum_i \left( \frac{P_{ic}^O + P_{ic}^M}{2} \right) \cdot \int_{\theta_{ic}^O}^{\theta_{ic}^M} d\theta_{ic} - \sum_j \left( \frac{P_{jc}^O + P_{jc}^M}{2} \right) \cdot \int_{\tau_{jc}^O}^{\tau_{jc}^M} d\tau_{jc}.$$

Der Ansatz ist formal identisch mit Fall (3) bei unelastischen Randsummenbedingungen. Die Nutzenänderung aller Verkehrsteilnehmer einer Quelle-Ziel-Gruppe  $c$  lautet dann gemäß (5.88):

$$\begin{aligned} \Delta E(\Phi_c^*) = & \ln \left( \frac{V_c^M}{V_c^O} \right) \cdot \left( \frac{V_c^O + V_c^M}{2} \right) + \sum_i \left( \frac{Q_{ic}^O + Q_{ic}^M}{2} \right) \cdot (\theta_{ic}^O - \theta_{ic}^M) \\ & + \sum_j \left( \frac{Z_{jc}^O + Z_{jc}^M}{2} \right) \cdot (\tau_{jc}^O - \tau_{jc}^M). \end{aligned}$$

Wenn kein projektinduzierter Neuverkehr entsteht, d. h.  $V_c^O = V_c^M$  gilt, dann resultiert:

$$\Delta E(\Phi_c^*) = \sum_i \left( \frac{Q_{ic}^O + Q_{ic}^M}{2} \right) \cdot (\theta_{ic}^O - \theta_{ic}^M) + \sum_j \left( \frac{Z_{jc}^O + Z_{jc}^M}{2} \right) \cdot (\tau_{jc}^O - \tau_{jc}^M). \quad (5.90)$$

Die Ausweisung der verkehrsstromspezifischen Nutzenänderung ist analog zum Fall der unelastischen Randsummenbedingungen möglich, da der dort resultierende Ansatz unmittelbar aus (5.81) abgeleitet ist und demnach auch für elastische Randsummenbedingungen Gültigkeit besitzt (siehe Anhang D).

Die vorangegangenen Ableitungen erfolgten für jeweils quell- **und** zieleitige unelastische oder elastische Randsummenbedingungen. Für Quelle-Ziel-Gruppen mit quell- und zieleitig unterschiedlichen Randsummenbedingungen kann die Berechnung der Nutzenänderungen durch entsprechende Kombinationen erfolgen. Für eine Quelle-Ziel-Gruppe mit beispielsweise quellseitig unelastischer und zieleitig elastischer Randsummenbedingung ohne Neuverkehr resultiert:

$$\Delta E(\Phi_c^*) = \sum_i Q_{ic} \cdot (\theta_{ic}^O - \theta_{ic}^M) + \sum_j \left( \frac{Z_{jc}^O + Z_{jc}^M}{2} \right) \cdot (\tau_{jc}^O - \tau_{jc}^M). \quad (5.91)$$

Wenn projektinduzierter Neuverkehr entsteht, gilt allgemein Ansatz (5.88).

## 5.3.2 Halbierungsregel zur Bestimmung der Änderung des internen Nutzens

### 5.3.2.1 Halbierungsregel bei unelastischen Randsummenbedingungen

Ausgangspunkt sind die Überlegungen zur Korrektur der Logsum-Differenz um die Pseudo-Potentiale in Kapitel 5.3.1.2, die zum Ansatz (5.68) führen:

$$\Delta E\left(\Phi_{n_c}^*\right) = \Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right) - \int_{PF} \sum_i P_{ic} d\theta_{ic} - \int_{PF} \sum_j P_{jc} d\tau_{jc}.$$

Mit Hilfe der Halbierungsregel kann  $\Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right)$  genähert werden, wobei die relationsspezifischen Auswahlwahrscheinlichkeiten unter der Annahme eines linearen Integrationsweges einzeln integriert werden:

$$\Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right) = \sum_i \sum_j \sum_k \int_{\bar{\Phi}_{ijkc}^O}^{\bar{\Phi}_{ijkc}^M} P_{ijkc} \left(\bar{\Phi}_{A_c c}\right) d\bar{\Phi}_{ijkc}. \quad (5.92)$$

Die Lösung der Integrale lautet entsprechend der Halbierungsregel in (4.45):

$$\Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right) = \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left(P_{ijkc}^O + P_{ijkc}^M\right) \cdot \left(\bar{\Phi}_{ijkc}^M - \bar{\Phi}_{ijkc}^O\right). \quad (5.93)$$

Mit  $\bar{\Phi}_{ijkc} = -ga_{ijkc} + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc}$  und  $\psi_{kc}^O = \psi_{kc}^M$  ergibt sich:

$$\Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right) = \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left(P_{ijkc}^O + P_{ijkc}^M\right) \cdot \left(\left(-ga_{ijkc}^M + \theta_{ic}^M + \tau_{jc}^M\right) - \left(-ga_{ijkc}^O + \theta_{ic}^O + \tau_{jc}^O\right)\right). \quad (5.94)$$

Der Ausdruck kann umgeformt werden zu:

$$\begin{aligned} \Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right) &= \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left(P_{ijkc}^O + P_{ijkc}^M\right) \cdot \left(ga_{ijkc}^O - ga_{ijkc}^M\right) \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left(P_{ijkc}^O + P_{ijkc}^M\right) \cdot \left(\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O\right) \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left(P_{ijkc}^O + P_{ijkc}^M\right) \cdot \left(\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O\right) \end{aligned} \quad (5.95)$$

Durch Summierung der Auswahlwahrscheinlichkeiten des zweiten und dritten Terms kann der Ausdruck vereinfacht werden:

$$\begin{aligned} \Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right) &= \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left(P_{ijk}^O + P_{ijk}^M\right) \cdot \left(ga_{ijk}^O - ga_{ijk}^M\right) \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot \sum_i \left(P_{ic}^O + P_{ic}^M\right) \cdot \left(\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O\right) + \frac{1}{2} \cdot \sum_j \left(P_{jc}^O + P_{jc}^M\right) \cdot \left(\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O\right) \end{aligned} \quad (5.96)$$

Wird  $\Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right)$  in (5.68) substituiert, ergibt sich für die gesuchte Nutzenänderung eines repräsentativen Verkehrsteilnehmers der Quelle-Ziel-Gruppe  $c$ :

$$\begin{aligned} \Delta E\left(\Phi_{n_c}^*\right) &= \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left(P_{ijk}^O + P_{ijk}^M\right) \cdot \left(ga_{ijk}^O - ga_{ijk}^M\right) \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot \sum_i \left(P_{ic}^O + P_{ic}^M\right) \cdot \left(\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O\right) + \frac{1}{2} \cdot \sum_j \left(P_{jc}^O + P_{jc}^M\right) \cdot \left(\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O\right) \\ &\quad - \int_{PF} \sum_i P_{ic} d\theta_{ic} - \int_{PF} \sum_j P_{jc} d\tau_{jc} \end{aligned} \quad (5.97)$$

Zur Bestimmung der Nutzenänderung aller Verkehrsteilnehmer einer Quelle-Ziel-Gruppe ist wiederum in folgende drei relevante Fälle zu unterscheiden:

- (1) keine Änderung der Verkehrsaufkommen,
- (2) einheitliche Änderung der Verkehrsaufkommen und
- (3) verkehrsbezirksspezifische Änderung der Verkehrsaufkommen.

#### Ad (1):

Wenn kein projektinduzierter Neuverkehr entsteht, d. h. die Produktionsraten konstant sind, dann gilt (5.70) und die Auswahlwahrscheinlichkeiten der Quellen und Ziele sind im Mit- und Ohnefall gleich:

$$\begin{aligned} P_{ic}^O &= P_{ic}^M = P_{ic} = \frac{Q_{ic}}{V_c} \\ P_{jc}^O &= P_{jc}^M = P_{jc} = \frac{Z_{jc}}{V_c} \end{aligned}$$

Unter dieser Voraussetzung lauten die Lösungen der beiden Integrale in (5.97):

$$\int_{PF} \sum_i P_{ic} d\theta_{ic} = \sum_i \frac{Q_{ic}}{V_c} \cdot \left(\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O\right) \quad \text{und} \quad \int_{PF} \sum_j P_{jc} d\tau_{jc} = \sum_j \frac{Z_{jc}}{V_c} \cdot \left(\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O\right) \quad (5.98)$$

Durch Einsetzen in (5.97) resultiert:

$$\begin{aligned} \Delta E\left(\Phi_{n_c}^*\right) &= \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left(P_{ijk}^O + P_{ijk}^M\right) \cdot \left(ga_{ijk}^O - ga_{ijk}^M\right) \\ &\quad + \sum_i \frac{Q_{ic}}{V_c} \cdot \left(\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O\right) + \sum_j \frac{Z_{jc}}{V_c} \cdot \left(\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O\right) \\ &\quad - \sum_i \frac{Q_{ic}}{V_c} \cdot \left(\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O\right) - \sum_j \frac{Z_{jc}}{V_c} \cdot \left(\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O\right) \end{aligned} \quad (5.99)$$

und somit:

$$\Delta E\left(\Phi_{n_c}^*\right) = \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left(P_{ijk}^O + P_{ijk}^M\right) \cdot \left(ga_{ijk}^O - ga_{ijk}^M\right). \quad (5.100)$$

Die Nutzenänderung aller Verkehrsteilnehmer einer Quelle-Ziel-Gruppe ergibt sich durch Multiplikation mit dem Gesamterkehrsaufkommen:

$$\Delta E\left(\Phi_c^*\right) = \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left(v_{ijk}^O + v_{ijk}^M\right) \cdot \left(ga_{ijk}^O - ga_{ijk}^M\right). \quad (5.101)$$

Der Ausdruck entspricht exakt der Nutzenberechnung mittels der Halbierungsregel für Verkehrsnachfragemodelle ohne Randsummenbedingungen.

### Ad (2):

In diesem Fall variieren alle Verkehrsaufkommen um den gleichen Faktor  $k$  zwischen Mit- und Ohnefall und die Auswahlwahrscheinlichkeiten der Quellen und Ziele sind im Mit- und Ohnefall identisch (allerdings gilt  $\Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right) \neq 0$ ). Folglich resultiert:

$$\begin{aligned} \Delta E\left(\Phi_{n_c}^*\right) &= \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left(P_{ijk}^O + P_{ijk}^M\right) \cdot \left(ga_{ijk}^O - ga_{ijk}^M\right) \\ &\quad + \sum_i P_{ic} \cdot \left(\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O\right) + \sum_j P_{jc} \cdot \left(\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O\right) \\ &\quad - \sum_i P_{ic} \cdot \left(\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O\right) - \sum_j P_{jc} \cdot \left(\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O\right) \end{aligned} \quad (5.102)$$

Die letzten vier Terme der rechten Seite können gekürzt werden und es ergibt sich für alle Verkehrsteilnehmer der Quelle-Ziel-Gruppe  $c$  wiederum der Ansatz der Halbierungsregel in (5.101). Der Nutzen des Neuverkehrs ist, wie in Kapitel 4.2.2.2 gezeigt, in diesem Ansatz enthalten.

### Ad (3):

Verkehrsbezirksspezifische Änderungen der Verkehrsaufkommen infolge der projektinduzierten Änderung der Produktionsraten führen zu (5.85):

$$P_{ic}^O \neq P_{ic}^M, \quad P_{jc}^O \neq P_{jc}^M.$$



Analog der Überlegungen in Kapitel 5.3.1.2 werden auch hier vereinfachend lineare Nachfragefunktionen der Auswahlwahrscheinlichkeiten  $P_{ic}$  und  $P_{jc}$  angenommen, wodurch die Integrale in (5.97) gelöst werden können:

$$\begin{aligned} \int_{PF} \sum_i P_{ic} d\theta_{ic} &= \sum_i \left( \frac{P_{ic}^O + P_{ic}^M}{2} \right) \cdot (\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O) \\ \int_{PF} \sum_j P_{jc} d\tau_{jc} &= \sum_j \left( \frac{P_{jc}^O + P_{jc}^M}{2} \right) \cdot (\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O) \end{aligned} \quad (5.103)$$

Werden die Lösungen in (5.97) eingesetzt, so resultiert:

$$\begin{aligned} \Delta E(\Phi_{n_c}^*) &= \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k (P_{ijk}^O + P_{ijk}^M) \cdot (ga_{ijk}^O - ga_{ijk}^M) \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot \sum_i (P_{ic}^O + P_{ic}^M) \cdot (\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O) + \frac{1}{2} \cdot \sum_j (P_{jc}^O + P_{jc}^M) \cdot (\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O) \\ &\quad - \frac{1}{2} \cdot \sum_i (P_{ic}^O + P_{ic}^M) \cdot (\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O) - \frac{1}{2} \cdot \sum_j (P_{jc}^O + P_{jc}^M) \cdot (\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O) \end{aligned} \quad (5.104)$$

Wiederum können die letzten vier Terme gekürzt werden und der einfache Halbierungsregelansatz (5.101) liefert auch für diesen Fall die resultierende Approximation der Nutzenänderung für alle Verkehrsteilnehmer der Quelle-Ziel-Gruppe  $c$ .

### 5.3.2.2 Halbierungsregel bei elastischen Randsummenbedingungen

Die nachfolgenden Betrachtungen bauen auf den Überlegungen bzgl. der unelastischen Randsummenbedingungen auf. Der Unterschied besteht im Wesentlichen im zusätzlichen Einfluss der Quell- und Zielpotentiale und der erst in der simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahl endgültig bestimmten Verkehrsströme. Die Grundlage der Betrachtungen stellt wiederum Ansatz (5.68) dar:

$$\Delta E(\Phi_{n_c}^*) = \Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) - \int_{PF} \sum_i P_{ic} d\theta_{ic} - \int_{PF} \sum_j P_{jc} d\tau_{jc},$$

wobei  $\Delta E(\Phi_{n_c}^{**})$  mittels der Halbierungsregel genähert wird. Hierfür wird erneut der allgemeine Ausdruck in (4.45) herangezogen:

$$\Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) = \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k (P_{ijk}^O + P_{ijk}^M) \cdot (\bar{\Phi}_{ijk}^M - \bar{\Phi}_{ijk}^O).$$

Mit  $\bar{\Phi}_{ijk} = -ga_{ijk} + h(Q_{ic}^P) + h(Z_{jc}^P) + \theta_{ic} + \tau_{jc} + \psi_{kc}$  und  $\psi_{kc}^O = \psi_{kc}^M$  und der Summierung der Auswahlwahrscheinlichkeiten über die nicht betroffenen Dimensionen ergibt sich:

$$\begin{aligned}
\Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right) &= \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left(P_{ijk}^O + P_{ijk}^M\right) \cdot \left(ga_{ijk}^O - ga_{ijk}^M\right) \\
&+ \frac{1}{2} \cdot \sum_i \left(P_{ic}^O + P_{ic}^M\right) \cdot \left(h\left(Q_{ic}^P\right)^M - h\left(Q_{ic}^P\right)^O\right) \\
&+ \frac{1}{2} \cdot \sum_j \left(P_{jc}^O + P_{jc}^M\right) \cdot \left(h\left(Z_{jc}^P\right)^M - h\left(Z_{jc}^P\right)^O\right) \\
&+ \frac{1}{2} \cdot \sum_i \left(P_{ic}^O + P_{ic}^M\right) \cdot \left(\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O\right) + \frac{1}{2} \cdot \sum_j \left(P_{jc}^O + P_{jc}^M\right) \cdot \left(\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O\right)
\end{aligned} \quad . (5.105)$$

Da hier von konstanten Quell- und Zielpotentialen ausgegangen wird, also  $\Delta h\left(Q_{ic}^P\right) = 0$  und  $\Delta h\left(Z_{jc}^P\right) = 0$  gilt, ergibt sich formal der gleiche Ansatz wie im Fall unelastischer Randsummenbedingungen. Somit folgt daraus Ansatz (5.97):

$$\begin{aligned}
\Delta E\left(\Phi_{n_c}^*\right) &= \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left(P_{ijk}^O + P_{ijk}^M\right) \cdot \left(ga_{ijk}^O - ga_{ijk}^M\right) \\
&+ \frac{1}{2} \cdot \sum_i \left(P_{ic}^O + P_{ic}^M\right) \cdot \left(\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O\right) + \frac{1}{2} \cdot \sum_j \left(P_{jc}^O + P_{jc}^M\right) \cdot \left(\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O\right) \\
&- \int_{PF} \sum_i P_{ic} d\theta_{ic} - \int_{PF} \sum_j P_{jc} d\tau_{jc}
\end{aligned}$$

Die Lösung der Integrale erfolgt analog der Betrachtungen in Kapitel 5.3.1.3, in denen ein linearer Integrationspfad zwischen den Gleichgewichtslösungen gewählt wurde. Damit ergeben sich die Lösungen entsprechend (5.103):

$$\begin{aligned}
\int_{PF} \sum_i P_{ic} d\theta_{ic} &= \sum_i \left(\frac{P_{ic}^O + P_{ic}^M}{2}\right) \cdot \left(\theta_{ic}^M - \theta_{ic}^O\right) \\
\int_{PF} \sum_j P_{jc} d\tau_{jc} &= \sum_j \left(\frac{P_{jc}^O + P_{jc}^M}{2}\right) \cdot \left(\tau_{jc}^M - \tau_{jc}^O\right)
\end{aligned}$$

Wenn die Lösungen der Integrale in (5.97) eingesetzt werden, so führt das zum Ansatz (5.104), der durch Kürzen wiederum den Ansatz (5.101) liefert. Die Halbierungsregel gilt sowohl für unelastische als auch elastische Randsummenbedingungen und kann daher auch für Fälle mit quell- und zweiseitig unterschiedlichen Randsummenbedingungen herangezogen werden.

### 5.3.3 Erweiterte approximative Ansätze zur Bestimmung der Änderung des internen Nutzens

#### 5.3.3.1 Numerische Integration bei großen Aufwandsänderungen

Die Nutzenberechnung bei großen Aufwandsänderungen ist mittels der Numerischen Integration durchzuführen. Der Ansatz basiert, wie in Kapitel 4.2.3.1 gezeigt, unmittelbar auf der Halbierungsregel, weshalb die Numerische Integration ebenfalls zur Nutzenberechnung bei der Einhaltung von Randsummenbedingungen anwendbar ist. Es soll an dieser Stelle noch kurz auf zwei zu beachtende Aspekte eingegangen werden:

- (1) Zwischenpunkte als Gleichgewichte und
- (2) Entstehung von Neuverkehr.

#### Ad (1):

Gemäß der Numerischen Integration müssen die Zwischenpunkte für eine bestmögliche Näherung der Integrale äquidistant verteilt sein, wofür die entsprechenden Generalisierten Aufwände mittels des Ansatzes (4.53) unmittelbar festgelegt werden. Durch die direkte Anpassung der Generalisierten Aufwände ist jedoch nicht gewährleistet, dass die Zwischenpunkte (Nutzer)Gleichgewichte darstellen. Hierfür muss das Verkehrsangebot, z. B. über die Kapazität einer neuen Strecke, so verändert werden, dass die gesuchten Generalisierten Aufwände der Zwischenpunkte aller Alternativen resultieren. Es ist jedoch zum einen nicht a priori bestimmbar, um welchen Wert die Angebotsgröße geändert werden muss, damit die gesuchten Aufwände resultieren, zum anderen ist offensichtlich, dass sich dann nicht für alle Alternativen äquidistante Generalisierte Aufwände ergeben (müssen).

Dem Problem steht jedoch die Tatsache gegenüber, dass die Numerische Integration per se eine Näherungslösung darstellt und die Abweichungen zwischen den äquidistant verteilten Generalisierten Aufwänden und den sich im Gleichgewicht ergebenden Aufwänden nur gering sind. Eine Gleichgewichtsmodellierung für die Zwischenpunkte erscheint daher und vor dem Hintergrund des großen zusätzlichen Rechenaufwands nicht gerechtfertigt.

#### Ad (2):

Die Numerische Integration ist, wie die Halbierungsregel, bei Neuverkehr anwendbar. Es ist jedoch bei der praktischen Umsetzung zu beachten, dass für die Berechnung der Verkehrsströme der Zwischenpunkte ein Gesamtverkehrsaufkommen festgelegt werden muss. Entsprechend der bisherigen Annahmen in diesem Kapitel soll auch hierfür von einem linearen Zusammenhang im Fall von projektinduziertem Neuverkehr ausgegangen werden. Daraus resultiert die Berechnung der Verkehrsströme für drei Zwischenpunkte:

$$\begin{aligned}
v_{ijkc}^1 &= P_{ijkc}^1 \cdot \left( 0,25 \cdot (V_c^M - V_c^O) + V_c^O \right) \\
v_{ijkc}^2 &= P_{ijkc}^2 \cdot \left( 0,5 \cdot (V_c^M - V_c^O) + V_c^O \right) . \\
v_{ijkc}^3 &= P_{ijkc}^3 \cdot \left( 0,75 \cdot (V_c^M - V_c^O) + V_c^O \right)
\end{aligned} \tag{5.106}$$

### 5.3.3.2 Dreieck-Methode bei ungleichen Alternativenmengen

Der interne Nutzen kann bei einer veränderten Alternativenmenge im Mitfall mittels der Dreieck-Methode genähert werden. Der grundsätzliche theoretische Ansatz wurde bereits in Kapitel 4.2.3.2 dargelegt und kann auch hier angewendet werden. Es ist dabei jedoch zu beachten, dass eine steigende Anzahl neuer oder wegfallender Alternativen zu einem zunehmenden fehlerhaften Ergebnis führt.

Es gilt abschließend für die untersuchten Methodiken der Berechnung der Änderung des internen Nutzens festzuhalten, dass der in Kapitel 4.2.1 vorgestellte Ansatz der Logsum-Differenz für das EVA-Logit-Modell mit Randsummenbedingungen angepasst werden kann und ein exaktes Nutzenmaß liefert. Durch die Untersuchungen der approximativen Ansätze konnte gezeigt werden, dass diese bei der Beachtung von Randsummenbedingungen ohne Korrekturen angewendet werden können. Dabei gelten aber die gleichen Einschränkungen, die in Kapitel 4.2.3 erläutert wurden. Vor allem sind dabei große Aufwandsänderungen und ungleiche Alternativenmengen zwischen Mit- und Ohnefall zu beachten. Da die approximativen Ansätze i. Allg. stets nur eine Näherung des exakten Nutzenergebnisses darstellen, gilt grundsätzlich, dass das exakte Nutzenmaß (korrigierte Logsum-Differenz) **immer** zu berechnen ist und das **maßgebende** Resultat darstellt. Die approximativen Ansätze finden ihre Berechtigung zur zusätzlichen Anwendung jedoch, wenn die Zerlegung des Nutzens erforderlich ist (siehe Kapitel 5.5.2).

## 5.4 Grenznutzen des Einkommens

Zur Monetarisierung der Änderung des internen Nutzens, d. h. zur Bestimmung der Änderung der Konsumentenrente, ist es erforderlich, den Grenznutzen des Einkommens zu bestimmen. Eine harmonisierte Bewertung innerhalb des integrierten Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodells verlangt, dass der Grenznutzen des Einkommens im Rahmen der Bewertung aus den in der Verkehrsnachfrageberechnung abgebildeten Präferenzen der Verkehrsteilnehmer abgeleitet wird. Da das Einkommen keine explizite Eingangsvariable in der EVA-Nutzenfunktion darstellt, sind die in der Nutzenfunktion enthaltenen monetären Größen für die Bestimmung heranzuziehen.

Es sind zunächst die Grenznutzen der einzelnen Reisekostenkomponenten zu ermitteln, die der ersten Ableitung der Nutzenfunktion nach den einzelnen Komponenten

entsprechen.<sup>71</sup> Im EVA-Logit-Modell lautet der entsprechende Bewertungsteil der EVA-Nutzenfunktion für eine Reisekostenkomponente  $\kappa$ :

$$\bar{\Phi}(\kappa_{ijkc}) = -\alpha_{kc} \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{\kappa_{ijkc}}{C_{kc}} \right)^{\beta_{kc}} \right). \quad (5.107)$$

Die Präferenzparameter  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $C$  sind für jede Reisekostenkomponente je Quelle-Ziel-Gruppe und Verkehrsmittel zu bestimmen. Der jeweilige Grenznutzen lautet:

$$GN(\kappa_{ijkc}) = \frac{\partial \Phi_{ijkc}}{\partial \kappa_{ijkc}} = - \frac{\alpha_{kc} \cdot \left( \frac{\kappa_{ijkc}}{C_{kc}} \right)^{\beta_{kc}-1} \cdot \beta_{kc}}{C_{kc} \cdot \left( \left( \frac{\kappa_{ijkc}}{C_{kc}} \right)^{\beta_{kc}} + 1 \right)}. \quad (5.108)$$

Es ergeben sich daraus  $n$  unterschiedliche Präferenzfunktionen:

$$n = \sum_c \sum_{\tilde{k}} |B_{\tilde{k}c}|. \quad (5.109)$$

$\tilde{k} = 1 \dots \tilde{K}$     Laufindex Verkehrsmittel mit Reisekosten  
 $|B|$             Mächtigkeit der Menge  $B$ , d. h. Anzahl der Reisekostenkomponenten

Mittels jeder dieser Präferenzfunktionen ist in Abhängigkeit der aufzubringenden Reisekosten ein situativer (alternativenspezifischer) Grenznutzen der Reisekosten zu bestimmen. Die Einzelwerte sind weiterhin zu einem Erwartungswert zu aggregieren, wozu der in Kapitel 4.2.4 verwendete Ansatz (4.65) herangezogen wird. Der Erwartungswert entspricht dabei einem über alle Verkehrsströme gewichteten Mittelwert. Der Ansatz muss jedoch zusätzlich um die Dimension der unterschiedlichen Reisekostenkomponenten erweitert werden:

$$E(GN(\kappa_c)) = \frac{\sum_b \sum_i \sum_j \sum_{\tilde{k}} GN(\kappa_{bij\tilde{k}c}) \cdot v_{ij\tilde{k}c}}{\sum_i \sum_j \sum_{\tilde{k}} |B_{\tilde{k}c}| \cdot v_{ij\tilde{k}c}}. \quad (5.110)$$

Da sich die damit jeweils berechneten Erwartungswerte des Ohne- und Mitfalls unterscheiden können, ist analog dem Ansatz (4.66) der mittlere Erwartungswert des Mit- und Ohnefalls zu bestimmen:

---

<sup>71</sup> Die Verwendung des Begriffs **Grenznutzen** der **Reisekosten** erscheint nicht unmittelbar nahe liegend, ist jedoch in dem hier betrachteten Zusammenhang gängig in der Literatur.

$$\bar{E}(GN(\kappa_c)) = \frac{E^O(GN_c(\kappa_c)) + E^M(GN_c(\kappa_c))}{2}. \quad (5.111)$$

Dieser Wert entspricht dann faktisch dem gesamtheitlichen Grenznutzen der Reisekosten, dessen Pendant der gesuchte **Grenznutzen des Einkommens** ist (vgl. Kapitel 4.1.1.1). Somit gilt dann:

$$\lambda_c = -\bar{E}(GN(\kappa_c)). \quad (5.112)$$

Mit dem QZG-spezifischen Grenznutzen des Einkommens können auch die Änderungen des internen Nutzens von „Null-Kosten-Alternativen“, wie z. B. alle Fußgängerrelationen, monetarisiert werden.

Bei den bisherigen Darstellungen erfolgte keine Unterteilung der Quelle-Ziel-Gruppen in Einkommensklassen. Dadurch ist die Annahme implizit, dass die Bewertungspräferenzen für alle Personen einer Quelle-Ziel-Gruppe durch einen repräsentativen Verkehrsteilnehmer unabhängig vom Einkommen abgebildet werden können. Das Einkommen von Personen, z. B. Erwerbstätigen in der Quelle-Ziel-Gruppe W-A, unterliegt jedoch i. d. R. einer großen Streuung. Einkommensstarke Personen weisen aufgrund ihres höheren Einkommens eine geringere Reisekostensensibilität auf als einkommensschwache Personen. Wenn eine Differenzierung nach Einkommensklassen in den Quelle-Ziel-Gruppen erfolgt, dann können diese Effekte besser berücksichtigt werden, allerdings resultiert daraus ein deutlich erhöhter empirischer und Modellkalibrierungsaufwand. Die Anzahl der Präferenzfunktionen ergibt sich dann durch:

$$n = \sum_c \sum_e \sum_{\bar{k}} |B_{\bar{k}ec}|. \quad (5.113)$$

$e$                       Laufindex Einkommensklassen

Die Ermittlung der Erwartungswerte der Reisekosten und daraus abgeleitet des Grenznutzens des Einkommens erfolgt analog der obigen Darstellungen. Es ist möglich, den Grenznutzen des Einkommens für jede Einkommensklasse zu bestimmen. Allerdings wird dann eine zusätzliche Gewichtung zwischen den unterschiedlichen Klassen notwendig (siehe Kapitel 4.2.5 und Kapitel 5.5.1).

## 5.5 Änderung der Konsumentenrente

### 5.5.1 Ansätze zur Bestimmung der Änderung der Konsumentenrente

Die veränderte Konsumentenrente als monetäres Nutzenmaß stellt die gesuchte Größe des Bewertungsmoduls dar. Alle notwendigen Ansätze und Voraussetzungen wurden in den vorangegangenen Kapiteln dargelegt. Die Berechnungsmethoden auf Basis der korrigierten Logsum-Differenz (exakte Berechnung) und der Halbierungsregel (Näherung) sind in den beiden Tabellen 5-1 und 5-2 zusammengefasst. Alle Variablen innerhalb der Formeln stellen Ergebnisse des integrierten Modells dar, wodurch eine harmonisierte Bewertung der entscheidungsrelevanten Aufwände in der Verkehrsnachfrage und der wohlfahrtstheoretischen Gesamtbewertung gewährleistet ist.

Verkehrsnachfrage	$\Delta KR_c$ – exakte Berechnung
unelastische RSB ----- $V_c^O = V_c^M$	$\Delta KR_c = \frac{1}{\lambda_c} \cdot \left( \sum_i Q_{ic} \cdot (\theta_{ic}^O - \theta_{ic}^M) + \sum_j Z_{jc} \cdot (\tau_{jc}^O - \tau_{jc}^M) \right)$
unelastische RSB ----- $V_c^O \neq V_c^M$	$\Delta KR_c = \frac{1}{\lambda_c} \cdot \left( \ln \left( \frac{V_c^M}{V_c^O} \right) \cdot \left( \frac{V_c^O + V_c^M}{2} \right) + \sum_i \left( \frac{Q_{ic}^O + Q_{ic}^M}{2} \right) \cdot (\theta_{ic}^O - \theta_{ic}^M) \right. \\ \left. + \sum_j \left( \frac{Z_{jc}^O + Z_{jc}^M}{2} \right) \cdot (\tau_{jc}^O - \tau_{jc}^M) \right)$
elastische RSB ----- $V_c^O = V_c^M$ ,	$\Delta KR_c = \frac{1}{\lambda_c} \cdot \left( \sum_i \left( \frac{Q_{ic}^O + Q_{ic}^M}{2} \right) \cdot (\theta_{ic}^O - \theta_{ic}^M) + \sum_j \left( \frac{Z_{jc}^O + Z_{jc}^M}{2} \right) \cdot (\tau_{jc}^O - \tau_{jc}^M) \right)$
elastische RSB ----- $V_c^O \neq V_c^M$	$\Delta KR_c = \frac{1}{\lambda_c} \cdot \left( \ln \left( \frac{V_c^M}{V_c^O} \right) \cdot \left( \frac{V_c^O + V_c^M}{2} \right) + \sum_i \left( \frac{Q_{ic}^O + Q_{ic}^M}{2} \right) \cdot (\theta_{ic}^O - \theta_{ic}^M) \right. \\ \left. + \sum_j \left( \frac{Z_{jc}^O + Z_{jc}^M}{2} \right) \cdot (\tau_{jc}^O - \tau_{jc}^M) \right)$

Tabelle 5-1: Berechnungsansätze der Änderung der Konsumentenrente – exakte Berechnung mittels der Logsum-Differenz

Verkehrsnachfrage	$\Delta KR_c$ - Näherung
unelastische RSB <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> $V_c^O = V_c^M$ , $V_c^O \neq V_c^M$	$\Delta KR_c = \frac{1}{2 \cdot \lambda_c} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k (v_{ijk}^O + v_{ijk}^M) \cdot (ga_{ijk}^O - ga_{ijk}^M)$
elastische RSB <hr style="border-top: 1px dashed black;"/> $V_c^O = V_c^M$ , $V_c^O \neq V_c^M$	$\Delta KR_c = \frac{1}{2 \cdot \lambda_c} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k (v_{ijk}^O + v_{ijk}^M) \cdot (ga_{ijk}^O - ga_{ijk}^M)$

Tabelle 5-2: Berechnungsansätze der Änderung der Konsumentenrente – Näherung mittels der Halbierungsregel

Auf die Darstellung der Ansätze unterschiedlicher quell- und zieleitiger Randsummenbedingungen wird in den Tabellen verzichtet. Für den Fall der Logsum-Differenz ergeben sich die Berechnungsansätze aus den entsprechende Kombinationen der Ansätze für elastische und unelastische Randsummenbedingungen. Für die Näherungslösung sind keine Anpassungen notwendig.

Die Ansätze in den Tabellen liefern die veränderten Konsumentenrenten je Quelle-Ziel-Gruppe. Für die NKA ist jedoch deren aggregierter Wert notwendig. Dabei ist die Frage nach der Gewichtung der Quelle-Ziel-Gruppen zu klären, wie es bereits in Kapitel 4.2.5 diskutiert wurde. Ohne eine Unterteilung nach Einkommensklassen erscheint eine zusätzliche Gewichtung in der sozialen Wohlfahrtsfunktion nicht notwendig. Zwar äußern sich in den Grenznutzen der Einkommen je Quelle-Ziel-Gruppe auch die unterschiedlichen Einkommen der Bezugspersonengruppen – Erwerbstätige besitzen ein höheres Einkommen als Schüler –, allerdings ist es volkswirtschaftlich sinnvoll (und politisch vertretbar), wenn Nutzenänderungen (z. B. durch eingesparte Reisezeit) von Erwerbstätigen höher gewichtet werden als von Schülern. Somit ergibt sich das Gesamtergebnis über alle Quelle-Ziel-Gruppen (mit  $\alpha_c = 1$ ) durch:

$$\Delta KR = \sum_c \Delta KR_c. \tag{5.114}$$

Eine zweite „Gewichtungsproblematik“ entsteht aus interregionalen Vergleichen von zu bewertenden Verkehrsinvestitionen. Häufig konkurrieren Verkehrsmaßnahmen, die in unterschiedlichen Regionen realisiert werden sollen, um die gleichen finanziellen Ressourcen. Dabei sind unterschiedliche regionale Einkommensverteilungen zu beachten. Wenn die Änderung des internen Nutzens mittels des hier entwickelten Modells bestimmt wird, dann spiegelt sich die Einkommensverteilung in den unterschiedlichen Grenznutzen des Einkommens wider. Grundsätzlich kann dieses Problem auf zwei Arten gelöst werden:

- unterschiedliche Gewichtung in der sozialen Wohlfahrtsfunktion oder
- Mittelung der Grenznutzen des Einkommens über alle Projekte.



Der Ansatz der Mittelung verlangt die gleichzeitige Bewertung der Projekte wie beispielsweise im BVWP. Dann können aus den je Projekt intern berechneten Werten jeweils die Mittelwerte bestimmt werden. Durch diesen Ansatz ist ebenfalls eine harmonisierte Bewertung gewährleistet, da die für die Monetarisierung notwendigen Grenznutzen modellintern bestimmt werden.

### 5.5.2 Zerlegung der Änderung der Konsumentenrente

Die Ausweisung der Änderung der Konsumentenrente nach den Aufwandsgrößen oder verbleibendem und induziertem Verkehr ist nur mittels der approximativen Berechnungsansätze möglich. Für das entwickelte Modell wird das nachfolgend auf Grundlage der Halbierungsregel gezeigt. Ausgangspunkt sind die Generalisierten Aufwände, die für mehrere Reisekosten- und Reisezeitkomponenten definiert sind durch:

$$ga_{ijkc} = \sum_b \alpha_{bkc} \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{\kappa_{bijkc}}{C_{bkc}} \right)^{\beta_{bkc}} \right) + \sum_d \alpha_{dkc} \cdot \ln \left( 1 + \left( \frac{\zeta_{dijkc}}{C_{dkc}} \right)^{\beta_{dkc}} \right). \quad (5.115)$$

Zur Vereinfachung gilt im Folgenden:

$$\ln \left( 1 + \left( \frac{\kappa_{bijkc}}{C_{bkc}} \right)^{\beta_{bkc}} \right) = h(\kappa_{bijkc}) \quad \text{und} \quad \ln \left( 1 + \left( \frac{\zeta_{dijkc}}{C_{dkc}} \right)^{\beta_{dkc}} \right) = h(\zeta_{dijkc}). \quad (5.116)$$

Die veränderte Konsumentenrente infolge der Änderung der Reisekostenkomponente  $b$  ergibt sich zu:

$$\Delta KR_{bc} = \frac{1}{2 \cdot \lambda_c} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k (v_{ijkc}^O + v_{ijkc}^M) \cdot \alpha_{bkc} \cdot \left( h(\kappa_{bijkc}^O) - h(\kappa_{bijkc}^M) \right) \quad (5.117)$$

sowie infolge der Änderung der Reisezeitkomponente  $d$  zu:

$$\Delta KR_{dc} = \frac{1}{2 \cdot \lambda_c} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k (v_{ijkc}^O + v_{ijkc}^M) \cdot \alpha_{dkc} \cdot \left( h(\zeta_{dijkc}^O) - h(\zeta_{dijkc}^M) \right). \quad (5.118)$$

Die Präferenzparameter  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $C$  sind konstant, weshalb  $\alpha$  aus der Klammer herausgezogen werden kann.

Die Zerlegung ermöglicht die Ausweisung der Wirkung je Aufwandskomponente auf die Änderung der Konsumentenrente. Dabei ist jedoch zu beachten, dass nicht die Differenz der originären Aufwandsgrößen gebildet wird, sondern von deren nichtlinearen Transformationen. Der Grenznutzen der einzelnen Reisekosten- und Reisezeitkomponenten ist abhängig vom situativen Aufwand und unterscheidet sich zwischen Mit- und Ohnefall. An dieser Stelle wird der Unterschied zu aufwandsunabhängigen Präferenzen deutlich, bei

denen die originären Aufwandsdifferenzen mittels der konstanten MRS zwischen Einkommen und den einzelnen Aufwänden monetarisiert werden. Die MRS sind im obigen Ansatz implizit enthalten und abhängig vom Aufwand. Zur Verdeutlichung wird das am Beispiel der subjektiven Werte der Einsparungen der einzelnen Reisezeitkomponenten gezeigt, die sich formal durch:

$$svtts_{dijkc} = \frac{\alpha_{dkc} \cdot \left( \frac{\zeta_{dijkc}}{C_{dkc}} \right)^{(\beta_{dkc}-1)} \cdot \beta_{dkc}}{C_{dkc} \cdot \left( \left( \frac{\zeta_{dijkc}}{C_{dkc}} \right)^{\beta_{dkc}} + 1 \right)} \cdot \lambda_c \tag{5.119}$$

ergeben. Deren Verläufe sind in Abbildung 5-7 beispielhaft dargestellt, wobei die Parameter  $\lambda_c = 0,8$ ,  $\alpha = 2$  und  $C = 20$  gelten.

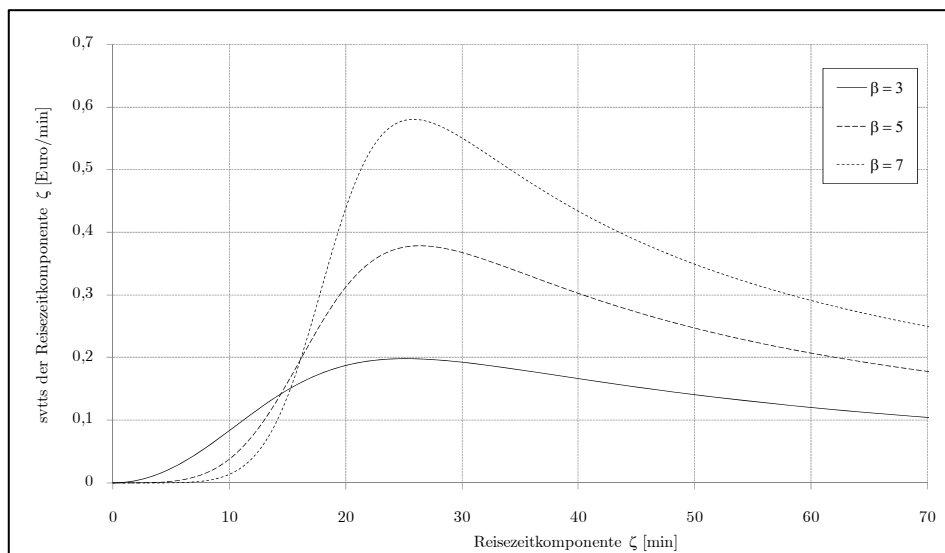


Abbildung 5-7: Subjektiver Wert der Reisezeiteinsparung der Komponente  $\zeta$

Aus der Abbildung wird deutlich, dass im Nahbereich der *svtts* gering ist und nur langsam steigt. Im mittleren Aufwandsbereich nimmt der *svtts* den höchsten Wert an, während für hohe Aufwände der Wert wieder sinkt. Es wird dadurch abgebildet, dass die Verkehrsteilnehmer bei mittleren Aufwänden die höchste Zahlungsbereitschaft zur Verringerung der Reisezeit besitzen. Der Wert der Reisezeiteinsparung je Reisezeitkomponente ist ein Ergebnis der Modellkalibrierung und abhängig von den Präferenzparametern. Liegen für den betrachteten Untersuchungsraum aktuelle Zeitwertschätzungen vor, so können und sollten diese Ergebnisse zur Kalibrierung herangezogen werden.

Neben der Zerlegung der Änderung der Konsumentenrente nach den Aufwandskomponenten ist ebenfalls die Unterteilung nach verbleibendem und induziertem Verkehr möglich (mit  $v_{ijkc}^{min} = \min\{v_{ijkc}^O, v_{ijkc}^M\}$  und  $v_{ijkc}^{max} = \max\{v_{ijkc}^O, v_{ijkc}^M\}$ ):

$$\begin{aligned} \Delta KR_c = & \frac{1}{\lambda_c} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left( ga_{ijkc}^O - ga_{ijkc}^M \right) \cdot v_{ijkc}^{min} \\ & + \frac{1}{2 \cdot \lambda_c} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left( ga_{ijkc}^O - ga_{ijkc}^M \right) \cdot \left( v_{ijkc}^{max} - v_{ijkc}^{min} \right) \end{aligned} \quad (5.120)$$

Der erste Term repräsentiert den Anteil des verbleibenden und der zweite Term den Anteil des induzierten Verkehrs, der, wie in Kapitel 3.4 definiert, sowohl den verlagerten als auch den Neuverkehr umfasst.

Die Zerlegung der Änderung der Konsumentenrente stellt den letzten Schritt im Rahmen des Bewertungsmoduls dar. In Abbildung 5-1 wurde die Grundstruktur des integrierten Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodells abgebildet. In Abbildung 5-8 ist eine detailliertere Darstellung des Bewertungsmoduls zusammenfassend dargestellt, wobei ersichtlich wird, dass in die Berechnung ausschließlich Ergebniswerte der Verkehrsmodellierung einfließen, wodurch eine harmonisierte Bewertung gewährleistet ist. Weiterhin ist zu beachten, dass die Nutzenberechnung mit Hilfe der approximativen Berechnungsansätze nur **optional** erfolgt, wenn eine Nutzenzerlegung gewünscht ist. Das exakte Ergebnis ist stets zu berechnen und stellt das maßgebende Resultat dar.

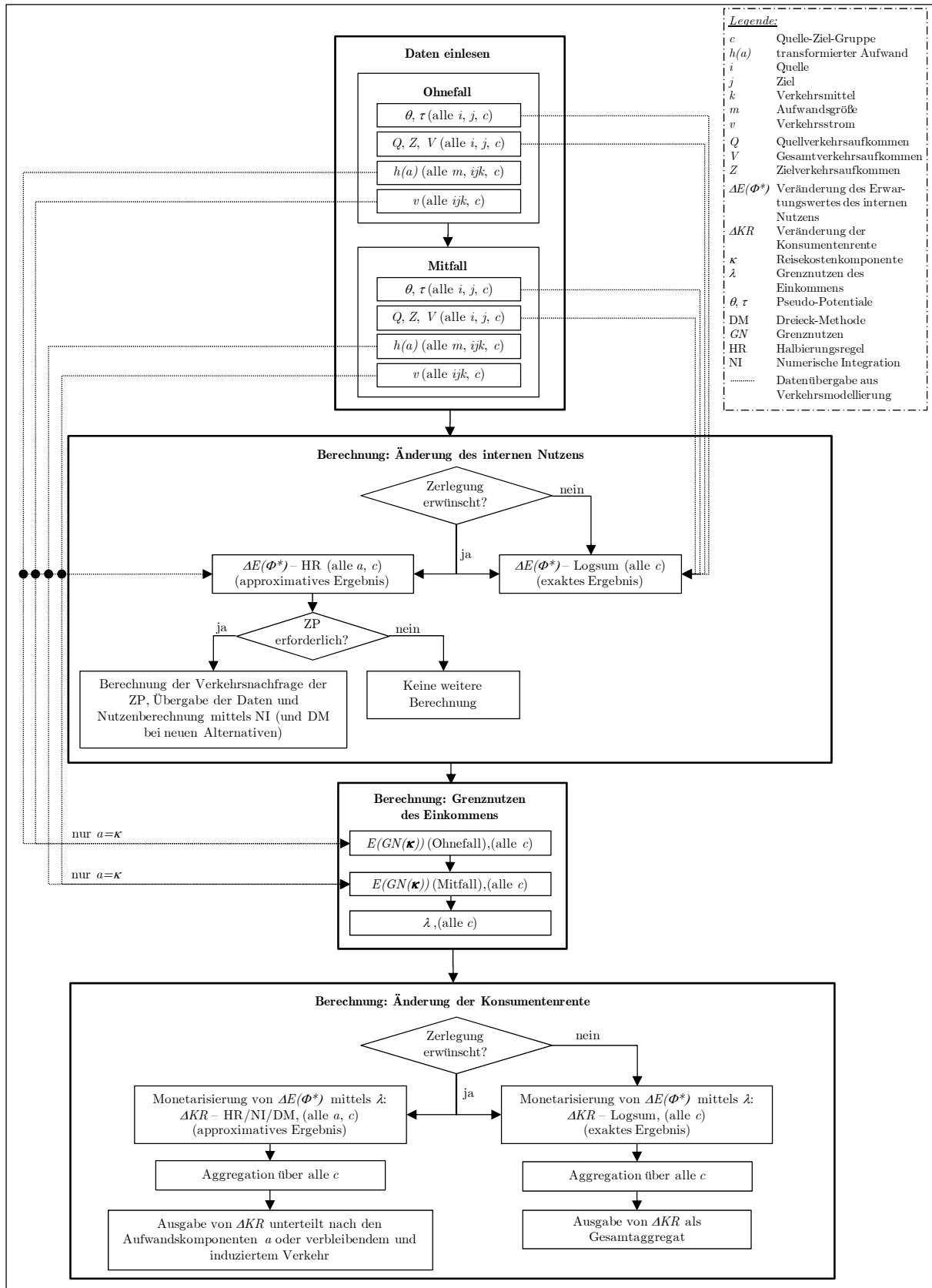


Abbildung 5-8: Schematische Darstellung des Bewertungsmoduls

## 5.6 Berücksichtigung tageszeitabhängiger Aufwands- und Verkehrsnachfrageänderungen

Die Änderung der Konsumentenrente ist abhängig von der Größenordnung der Aufwands- und der Verkehrsnachfrageänderung. Die Aufwände resultieren dabei aus der Wechselwirkung des Verkehrsangebots und der Verkehrsnachfrage. Da die Nachfrage nach Verkehr infolge der Ausübung einer Aktivität an einem anderen Ort entsteht und die Aktivitäten (Arbeiten, Einkaufen etc.) von unterschiedlicher Dauer und zu unterschiedlichen Zeiten durchgeführt werden, variiert die Verkehrsnachfrage in Abhängigkeit der Tageszeit.<sup>72</sup> Durch diese Schwankungen ändern sich wiederum die kapazitätsabhängigen Aufwände des MIV. Die Aufwände im ÖPV ergeben sich durch das ÖPV-Angebot (Linien, Takt etc.), welches aufgrund wirtschaftlicher Aspekte der ÖPV-Unternehmen in nachfrageschwächeren Tageszeiten reduziert wird. Die Aufwände im Rad- und Fußverkehr sind hingegen i. d. R. tageszeitunabhängig.

Für strategische Planungen sind i. Allg. tagesfeine (Umfang beträgt 24 Stunden) Verkehrsnachfrageberechnungen ausreichend. Im Rahmen einer wohlfahrtstheoretischen Gesamtbewertung in Form der NKA ist hingegen die Änderung der Konsumentenrente möglichst genau zu bestimmen, weshalb die tageszeitabhängigen Aufwands- und Nachfrageschwankungen berücksichtigt werden müssen. Wegen der im hier konzipierten Modell angestrebten harmonisierten Bewertung ist folglich sowohl die Verkehrsnachfrage als auch die Änderung der Konsumentenrente unter Beachtung des tageszeitlichen Aspekts zu berechnen.

Tageszeitabhängige Aufwands- und Verkehrsnachfrageänderungen sind durch eine zeitscheibenfeine Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung abbildbar. Für das EVA-Modell stellte SCHILLER in [123] erstmalig die zeitscheibenfeine Modellierung ausführlich dar. Die grundsätzliche Methodik der Verkehrsnachfrageberechnung wird dabei nicht verändert und die zeitscheibenfeine Modellierung kann auch mittels des EVA-Logit-Modells durchgeführt werden. Eine Zeitscheibe sollte wenigstens eine Stunde umfassen (vgl. SCHILLER [123] S. 81). Die grundsätzliche Problematik besteht in der Bestimmung der notwendigen Daten, da gegenüber der tagesfeinen Modellierung ein höherer Datenbedarf besteht. Auf Basis der zeitscheibenfeinen Verkehrsnachfragemodellierung kann im integrierten Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodell die Änderung der Konsumentenrente je Zeitscheibe abgeleitet werden. Nachfolgend werden die entscheidenden

---

<sup>72</sup> Darüber hinaus ist aufgrund unterschiedlicher Aktivitätenmuster zwischen Werktagen und Wochenenden zu unterscheiden. Eine dritte Ebene stellen signifikante Aufwands- und Verkehrsnachfrageänderungen über die Jahre des gesamten Bewertungszeitraums dar. Die Auswirkungen sind durch zusätzliche Modellrechnungen für die entsprechenden Tage und Jahre zu quantifizieren.

Punkte kurz erläutert. Für eine ausführliche Darstellung der zeitscheibenspezifischen Verkehrsnachfragemodellierung sei auf die erwähnte Arbeit von SCHILLER verwiesen.

### Ermittlung der Aufwände

Zeitscheibenfeine Aufwände und deren Bewertungen können bei der Verkehrsnachfragemodellierung zu erheblichen Asymmetrien in den aggregierten tagesfeinen Verkehrsstrommatrizen je Quelle-Ziel-Gruppe führen, die nicht mittels des Randsummenausgleichs korrigiert werden können (vgl. DUGGE [42] S. 160). Allerdings stellt SCHILLER fest, dass die Verkehrsteilnehmer die Aufwände von QZG-Paaren (z. B. W-A/A-W) nicht getrennt voneinander bewerten, sondern beide Fahrten bzgl. der Ziel- und Verkehrsmittelwahl im Zusammenhang beurteilen und danach ihre Entscheidung treffen (vgl. SCHILLER [123] S. 76). Es sind somit die Aufwandsmittelwerte der Hin- und Rückfahrten zu bestimmen, die für die einzelnen Aufwände  $a_m$  lauten:

$$\bar{a}_{mijkc} = \frac{a_{mijktc} + a_{mijk\tilde{t}c}}{2}. \quad (5.121)$$

$t$       Index für Zeitscheibe der Hinfahrt       $\tilde{t}$       Index für Zeitscheibe der Rückfahrt

Die gemittelten Aufwände gehen schließlich in die EVA-Nutzenfunktionen der Zeitscheiben  $t$  und  $\tilde{t}$  ein. Voraussetzung für die Bildung der Mittelwerte ist jedoch die Kenntnis des Rückfahrtzeitpunktes, die aus der Verteilung der Aktivitätendauer in Abhängigkeit vom Ankunftszeitpunkt gewonnen werden kann.<sup>73</sup>

### Verkehrserzeugung

Eine weitere zu beachtende Problematik besteht in der Bestimmung der Quell- und Zielverkehrsaufkommen je Zeitscheibe, wofür die entsprechenden tagesfeinen Größen vorausgesetzt werden. Mit Hilfe QZG-spezifischer, empirisch erhobener Tagesganglinien können die Tageswerte auf die Zeitscheiben aufgeteilt werden. Dabei ist zunächst für jede Quelle-Ziel-Gruppe festzulegen, ob die Verkehrsteilnehmer ihre Ortsveränderungen zeitlich abfahrts- oder ankunftsorientiert planen. Zum Beispiel sind Fahrten der Quelle-Ziel-Gruppe W-A ankunftsorientiert, da der Arbeitsbeginn entscheidend ist und nicht das Verlassen der Wohnung. Je nach Quelle-Ziel-Gruppe sind folglich abfahrts- oder ankunftsorientierte Tagesganglinien zu erheben.<sup>74</sup>

Für abfahrtsorientierte Tagesganglinien ergeben sich die zeitscheibenfeinen Quellverkehrsaufkommen mit Hilfe der relativen Häufigkeit der Zeitscheibe  $t$  am Gesamtverkehr des Tages je Quelle-Ziel-Gruppe  $\eta_{itc}$  zu:

$$Q_{itc} = Q_{ic} \cdot \eta_{itc}. \quad (5.122)$$

<sup>73</sup> Die Verteilung kann aus verschiedenen Erhebungen, wie z. B. SrV, gewonnen werden. Das Verfahren zur Bestimmung des Rückfahrtzeitpunktes wird in SCHILLER [123] beschrieben.

<sup>74</sup> Wenn keine ankunftsorientierten Tagesganglinien vorliegen, so können diese aus abfahrtsorientierten Tagesganglinien bestimmt werden. Ausführungen hierzu finden sich z. B. in LOHSE [89].

Das Zielverkehrsaufkommen je Zeitscheibe ergibt sich dann durch die zeitscheibenfeinen Verkehrsströme:

$$Z_{jtc} = \sum_i v_{ijc} \cdot \eta_{itc}. \quad (5.123)$$

Die Berechnung der Verkehrsaufkommen unter Verwendung ankunftsorientierter Tagesganglinien erfolgt analog, ausgehend von der Berechnung der Zielverkehrsaufkommen.<sup>75</sup>

Wie bei der tagesfeinen Berechnung können auch bei der Betrachtung von Zeitscheiben Asymmetrien bei den Quell- und Zielverkehrsaufkommen je Verkehrsbezirk über einen gesamten Tag auftreten. Dann gilt über alle Quelle-Ziel-Gruppen und Zeitscheiben (mit  $i = j$ ):

$$\sum_t \sum_c Q_{itc} \neq \sum_t \sum_c Z_{itc}. \quad (5.124)$$

Zur Korrektur ist ein Randsummenausgleich durchzuführen, wofür alle Zeitscheiben zu aggregieren sind, da beim Ausgleich die Quell- und Zielverkehrsaufkommen der Quelle-Ziel-Gruppen Typ 3 eines gesamten Tages geändert werden (Die Berechnung erfolgt analog zu den Darstellungen in Kapitel 3.2.1.3 und Anhang A). Darüber hinaus wird vorausgesetzt, dass sich alle Personen zum Zeitpunkt der Verkehrsruhe (beispielsweise drei Uhr) an ihrem Heimatstandort befinden (vgl. SCHILLER [123] S. 86). Die Tagesverkehrsaufkommen der Quelle-Ziel-Gruppen des Typs 3 werden anschließend mittels der entsprechenden Tagesganglinien auf die einzelnen Zeitscheiben aufgeteilt.

### Zeitscheibenfeine Änderung der Konsumentenrente

Unter der Voraussetzung der zeitscheibenfeinen Verkehrsnachfrageberechnung ist die entsprechende Bestimmung der Änderung der Konsumentenrente je Zeitscheibe durchführbar. Zu beachten ist dabei lediglich die Erweiterung der Berechnung um die Dimension der Zeitscheibe. Die exakte Berechnung auf Basis der korrigierten Logsum-Differenz liefert je Zeitscheibe und Quelle-Ziel-Gruppe für den allgemeinen Lösungsansatz:

$$\Delta KR_{tc} = \frac{1}{\lambda_c} \cdot \left( \ln \left( \frac{V_{tc}^M}{V_{tc}^O} \right) \cdot \left( \frac{V_{tc}^O + V_{tc}^M}{2} \right) + \sum_i \left( \frac{Q_{itc}^O + Q_{itc}^M}{2} \right) \cdot (\theta_{itc}^O - \theta_{itc}^M) \right. \\ \left. + \sum_j \left( \frac{Z_{jtc}^O + Z_{jtc}^M}{2} \right) \cdot (\tau_{jtc}^O - \tau_{jtc}^M) \right). \quad (5.125)$$

<sup>75</sup> Unter bestimmten Umständen (z. B. bei einer dynamischen Umlegung) ist es notwendig, ankunftsorientierte in abfahrtsorientierte Tagesganglinien zu transformieren. Ein entsprechender Ansatz ist z. B. in DUGGE [42] beschrieben.

Für die Halbierungsregel ergibt sich:

$$\Delta KR_{tc} = \frac{1}{2 \cdot \lambda_c} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left( v_{ijktc}^O + v_{ijktc}^M \right) \cdot \left( ga_{ijktc}^O - ga_{ijktc}^M \right). \quad (5.126)$$

Der Grenznutzen des Einkommens wird analog den Ausführungen in Kapitel 5.4 bestimmt, wobei zusätzlich die Dimension der Zeitscheibe zu berücksichtigen ist.

## 5.7 Berücksichtigung projektinduzierter Raumstrukturänderungen

In den bisherigen Überlegungen wurden langfristige Auswirkungen der Verkehrsmaßnahme auf die Raumordnung nicht explizit betrachtet, da diesbezüglich Siedlungsstrukturänderungen kaum eindeutig bestimmbar sind und daher in der Praxis nicht berücksichtigt werden können. Allerdings wird diesen Änderungen zunehmend größere Beachtung geschenkt, da es erste modelltheoretische Ansätze zur Quantifizierung solcher Effekte durch integrierte Flächennutzungs- und Verkehrsmodelle gibt (für einen theoretischen Überblick siehe z. B. MARTÍNEZ in [68] und WEGENER/FÜRST [154]). Inwiefern diese Ansätze tatsächlich in der Lage sind, für einzelne Verkehrsmaßnahmen realistische Änderungen der Siedlungsstrukturen zu bestimmen, wird in der Fachwelt z. T. sehr kritisch betrachtet (siehe z. B. SCHILLER [124] S. 35 ff.) und kann an dieser Stelle nicht geklärt werden. Unter der Voraussetzung, dass durch zukünftige Weiterentwicklungen projektinduzierte Änderungen der Flächennutzungs- und Siedlungsstrukturen eindeutig bestimmt werden können, soll dargelegt werden, ob das entwickelte integrierte Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodell in der Lage ist, sich daraus ergebende interne Nutzenänderungen zu quantifizieren.

Im EVA-Logit-Modell werden geänderte Siedlungsstrukturen durch veränderte Raumstrukturdaten und Quell- und/oder Zielpotentiale beachtet. Zum einen fließen die neuen Raumstrukturdaten in die Verkehrserzeugung ein, woraus veränderte Verkehrsaufkommen resultieren. Zum anderen bewirken Änderungen der Quell- und Zielpotentiale eine angepasste Quell- und Zielwahl bei elastischen Randsummenbedingungen.

Bei unelastischen Randsummenbedingungen verursachen Raumstrukturänderungen in der Verkehrsnachfrageberechnung ausschließlich veränderte Verkehrsaufkommen der Verkehrsbezirke. Das hat den gleichen Effekt wie projektinduzierte veränderte Produktionsraten, wie für die Nutzenberechnung mittels der korrigierten Logsum-Differenz in Kapitel 5.3.1.2 diskutiert wurde. Folglich sind die entsprechenden abgeleiteten Ansätze auch für veränderte Raumstrukturdaten anwendbar.



Quell- und Zielpotentiale werden bei unelastischen Randsummenbedingungen i. d. R. nicht beachtet. Allerdings ist die Berücksichtigung grundsätzlich möglich und im Rahmen einer Projektbewertung mit zu erwartenden projektinduzierten Raum- und Siedlungsstrukturänderungen sinnvoll. Zwar haben die Potentiale keinen Einfluss auf die resultierenden Verkehrsaufkommen, eine Änderung der Potentiale im Mitfall wirkt sich jedoch auf die Änderung der Pseudo-Potentiale und damit auf den quantifizierbaren Nutzen aus.

Die Nutzenberechnung bei Berücksichtigung von Änderungen der Quell- und Zielpotentiale erfordert eine etwas genauere Betrachtung, welche sowohl für den Fall elastischer als auch unelastischer Randsummenbedingungen mit veränderten Potentialen Gültigkeit besitzt. Zur Beachtung der Potentialänderungen gilt  $dh(Q_{ic}^P) \neq 0$  und/oder  $dh(Z_{jc}^P) \neq 0$ . Ausgangspunkt der Betrachtungen stellt Gleichung (5.89) für den Fall sich ändernder quell- und zieleitig elastischer Randsummenbedingungen dar:

$$\begin{aligned} d\bar{\Phi}_{ijkc} = & -\frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial ga_{ijkc}} dga_{ijkc} + \frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial h(Q_{ic}^P)} dh(Q_{ic}^P) + \frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial h(Z_{jc}^P)} dh(Z_{jc}^P) \\ & + \frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial \theta_{ic}} d\theta_{ic} + \frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial \tau_{jc}} d\tau_{jc} + \frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial \psi_{kc}} d\psi_{kc} \end{aligned}$$

und mit

$$\frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial ga_{ijkc}} = \frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial h(Q_{ic}^P)} = \frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial h(Z_{jc}^P)} = \frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial \theta_{ic}} = \frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial \tau_{jc}} = \frac{\partial\bar{\Phi}_{ijkc}}{\partial \psi_{kc}} = 1 \quad (5.127)$$

folgt

$$d\bar{\Phi}_{ijkc} = -dga_{ijkc} + dh(Q_{ic}^P) + dh(Z_{jc}^P) + d\theta_{ic} + d\tau_{jc} + d\psi_{kc}. \quad (5.128)$$

Der allgemeine Ansatz ist dann gegeben durch:

$$\Delta E(\Phi_{n_c}^{**}) = \int \sum_{PF} \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijkc} \left( -dga_{ijkc} + dh(Q_{ic}^P) + dh(Z_{jc}^P) + d\theta_{ic} + d\tau_{jc} + d\psi_{kc} \right). \quad (5.129)$$

Unter Berücksichtigung der Zusammenhänge zur Zerlegung des Integrals in Kapitel 5.3.1.2 ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 \Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right) = & - \int \sum_{i,j,k} \sum_{g_{A,c}^O} \sum_{g_{A,c}^M} P_{ijkc} \, dg_{ijkc} + \int \sum_{i,j,k} \sum_{Q_{A,c}^{PO}} \sum_{Q_{A,c}^{PM}} P_{ijkc} \, dh\left(Q_{ic}^P\right) \\
 & + \int \sum_{i,j,k} \sum_{Z_{A,c}^{PO}} \sum_{Z_{A,c}^{PM}} P_{ijkc} \, dh\left(Z_{jc}^P\right) + \int \sum_{i,j,k} \sum_{\theta_{A,c}^O} \sum_{\theta_{A,c}^M} P_{ijkc} \, d\theta_{ic} \\
 & + \int \sum_{i,j,k} \sum_{\tau_{A,c}^O} \sum_{\tau_{A,c}^M} P_{ijkc} \, d\tau_{jc} + \int \sum_{i,j,k} \sum_{\psi_{A,c}^O} \sum_{\psi_{A,c}^M} P_{ijkc} \, d\psi_{kc} \quad . \quad (5.130)
 \end{aligned}$$

Gesucht sind die realen Nutzenänderungen infolge der Projektrealisierung, die neben den Aufwandsänderungen ebenfalls infolge der Potentialänderungen erzielt werden. Somit gilt:

$$\begin{aligned}
 \Delta E\left(\Phi_{n_c}^*\right) = & - \int \sum_{i,j,k} \sum_{g_{A,c}^O} \sum_{g_{A,c}^M} P_{ijkc} \, dg_{ijkc} + \int \sum_{i,j,k} \sum_{Q_{A,c}^{PO}} \sum_{Q_{A,c}^{PM}} P_{ijkc} \, dh\left(Q_{ic}^P\right) \\
 & + \int \sum_{i,j,k} \sum_{Z_{A,c}^{PO}} \sum_{Z_{A,c}^{PM}} P_{ijkc} \, dh\left(Z_{jc}^P\right) \quad . \quad (5.131)
 \end{aligned}$$

Demzufolge sind auch hier lediglich die Auswirkungen der Pseudo-Potentiale in (5.130) zu extrahieren und es resultiert – wiederum mit  $\psi_{kc}^O = \psi_{kc}^M$  – der allgemeine Ansatz (5.68):

$$\Delta E\left(\Phi_{n_c}^*\right) = \Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right) - \int_{PF} \sum_i P_{ic} \, d\theta_{ic} - \int_{PF} \sum_j P_{jc} \, d\tau_{jc} \, ,$$

der die Grundlage aller Berechnungsansätze in Kapitel 5.3 darstellt. Die (zusätzliche) Nutzenänderung durch veränderte Potentiale ist in  $\Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right)$  enthalten. Zur Einhaltung der Randsummenbedingungen im Mitfall werden jedoch infolge der veränderten Aufwände **und** veränderten Potentiale die Pseudo-Potentiale angepasst. Somit wird auch der durch die Quell- und Zielpotentialänderungen resultierende Nutzen unmittelbar durch die abgeleiteten Ansätze quantifiziert.

Für die approximativen Berechnungsansätze sei die Problematik am Beispiel der Halbierungsregel gezeigt. Der Ausgangspunkt ist wieder (5.68), wobei  $\Delta E\left(\Phi_{n_c}^{**}\right)$  durch (5.105) definiert ist. Die Pseudo-Potentiale können mit Hilfe von (5.103) eliminiert werden und es resultiert:

$$\begin{aligned}
 \Delta E\left(\Phi_{n_c}^*\right) = & \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left( P_{ijkc}^O + P_{ijkc}^M \right) \cdot \left( g_{ijkc}^O - g_{ijkc}^M \right) \\
 & + \frac{1}{2} \cdot \sum_i \left( P_{ic}^O + P_{ic}^M \right) \cdot \left( h\left(Q_{ic}^P\right)^M - h\left(Q_{ic}^P\right)^O \right) \quad . \quad (5.132) \\
 & + \frac{1}{2} \cdot \sum_j \left( P_{jc}^O + P_{jc}^M \right) \cdot \left( h\left(Z_{jc}^P\right)^M - h\left(Z_{jc}^P\right)^O \right)
 \end{aligned}$$

Durch Multiplikation mit dem Gesamtverkehrsaufkommen kann die Nutzenänderung aller Verkehrsteilnehmer der Quelle-Ziel-Gruppe  $c$  bestimmt werden:

$$\begin{aligned} \Delta E(\Phi_c^*) &= \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k (v_{ijk}^O + v_{ijk}^M) \cdot (ga_{ijk}^O - ga_{ijk}^M) \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot \sum_i (Q_{ic}^O + Q_{ic}^M) \cdot \left( h(Q_{ic}^P)^M - h(Q_{ic}^P)^O \right) \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot \sum_j (Z_{jc}^O + Z_{jc}^M) \cdot \left( h(Z_{jc}^P)^M - h(Z_{jc}^P)^O \right) \end{aligned} \quad (5.133)$$

Da die Potentiale quell- und zielspezifische Größen sind, ergibt sich die entsprechende Nutzenänderung in Abhängigkeit der Änderung der Quell- und Zielverkehrsaufkommen. Allerdings kann der Ansatz auch auf Basis der Verkehrsströme formuliert werden:

$$\begin{aligned} \Delta E(\Phi_c^*) &= \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k (v_{ijk}^O + v_{ijk}^M) \cdot (ga_{ijk}^O - ga_{ijk}^M) \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k (v_{ijk}^O + v_{ijk}^M) \cdot \left( h(Q_{ic}^P)^M - h(Q_{ic}^P)^O \right) \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k (v_{ijk}^O + v_{ijk}^M) \cdot \left( h(Z_{jc}^P)^M - h(Z_{jc}^P)^O \right) \end{aligned} \quad (5.134)$$

Die Monetarisierung der Nutzenänderungen erfolgt analog der Ausführungen in Kapitel 5.5.

Es ist festzuhalten, dass das entwickelte integrierte Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodell auch Nutzenänderungen infolge langfristiger Struktureffekte quantifizieren kann. Voraussetzung ist jedoch, dass die entsprechenden Daten vorliegen. Dabei ist zu beachten, dass gerade für die Beachtung langfristiger Wirkungen Verkehrsnachfrage- und Nutzenberechnungen für mehrere Jahre durchzuführen sind, wobei es notwendig ist, die Siedlungsstrukturänderungen im Untersuchungsgebiet **infolge der Maßnahme** über den gesamten Bewertungszeitraum von den Wirkungen anderer Maßnahmen zu unterscheiden.

## 5.8 Einordnung in die ökonomische Gesamtbewertung

Die folgenden Darstellungen sollen der Einordnung des integrierten Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodells in eine gesamtheitliche Projektbewertung dienen und zusätzliche Hinweise für eine konsistente Gesamtbewertung geben. Das in dieser Arbeit entwickelte Modell umfasst, neben der Verkehrsnachfragemodellierung, die Ermittlung der Änderung des monetären internen Nutzens. Die ökonomische Gesamtbewertung einer Verkehrsmaßnahme bedarf jedoch, wie bereits zu Beginn des Kapitels 4 aufgezeigt wurde, stets der Berücksichtigung aller monetarisierbaren Projektwirkungen. Die notwendigen

verkehrsplanerischen und ökonomischen Komponenten einer Gesamtbewertung einschließlich des hier entwickelten Modells sind in Abbildung 5-9 dargestellt.

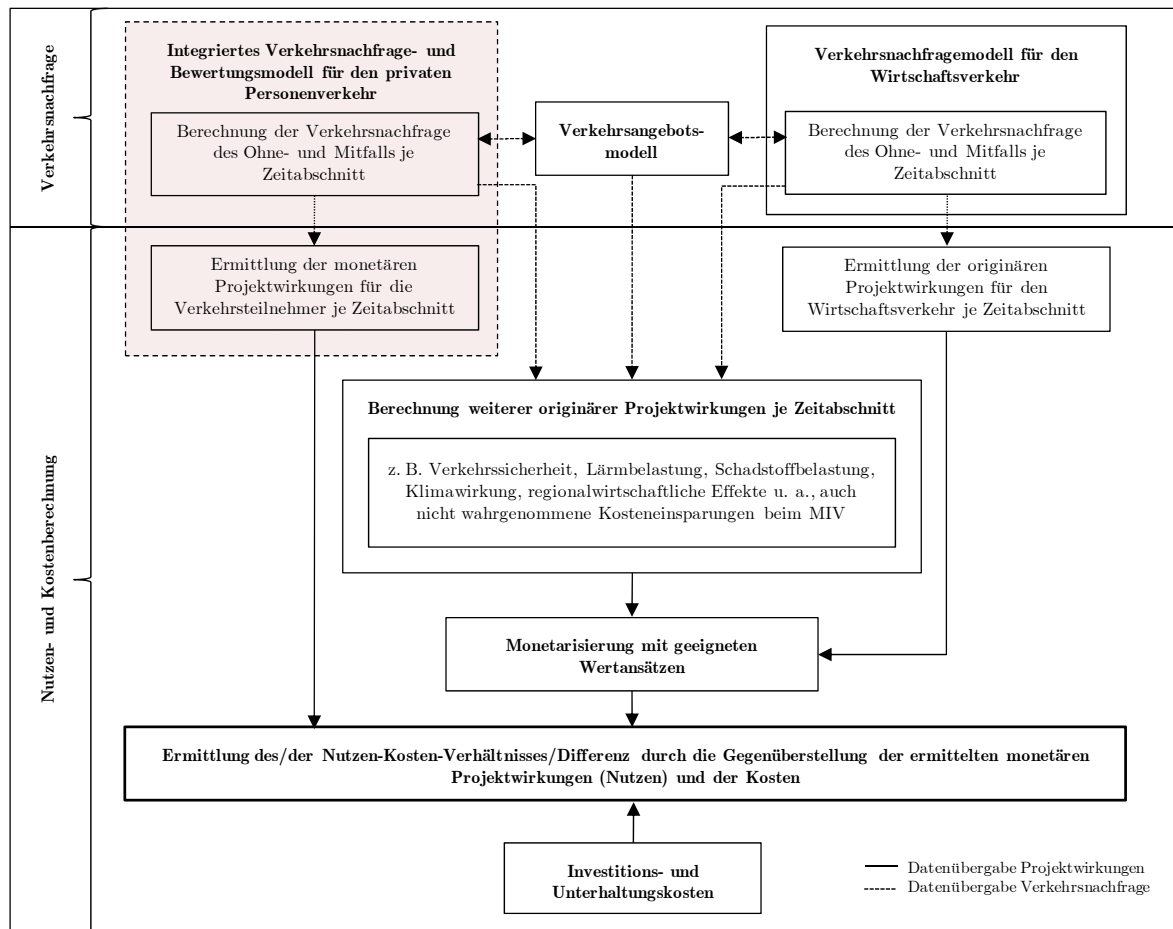


Abbildung 5-9: Verkehrsplanerische und ökonomische Komponenten in einer ökonomischen Gesamtbewertung

In den bisher angewandten (standardisierten) Bewertungsverfahren erfolgt die Berechnung der Verkehrsnachfrage und der Änderung des monetären internen Nutzens unabhängig voneinander, wodurch keine theoriekonsistente harmonisierte Bewertung gewährleistet ist. Aus der Abbildung wird deutlich, dass das entwickelte Modell diese klare Trennung der verkehrsplanerischen Verkehrsnachfrageberechnung und der Nutzenberechnung für den Personenverkehr überwindet. Neben der Verkehrsnachfrage des privaten Personenverkehrs stellt aber auch die Verkehrsnachfrage des Wirtschaftsverkehrs eine wichtige Grundlage der ökonomischen Gesamtbewertung dar. Für den Wirtschaftsverkehr hat die Trennung zwischen Verkehrsnachfrageberechnung und Nutzenberechnung nach wie vor Bestand. Die Entwicklung eines entsprechenden integrierten Modells analog dem privaten Personenverkehr sollte eine zukünftige Forschungsaufgabe sein, um auch in diesem Bereich eine Weiterentwicklung der ökonomischen Gesamtbewertung zu erzielen.

Alle zu beachtenden Projektwirkungen sind abhängig von der Änderung der Verkehrsnachfrage. Deren hochwertiger Modellierung kommt somit eine überaus hohe Bedeutung zu. Dabei ist grundsätzlich zu beachten, dass bei der Verkehrsnachfragemodellierung ein

stochastisches Nutzergleichgewicht (sowohl für den privaten Personen- als auch den Wirtschaftsverkehr) zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage erzielt wird. Hierfür sind innere und äußere Rückkopplungen, wie sie in Kapitel 3.3 diskutierten wurden, notwendig. Die Verkehrsnachfrageberechnung und die ökonomische Gesamtbewertung sollten multimodal sein und alle relevanten Verkehrsmittel umfassen. Dafür ist aber auch die qualitativ hochwertige Modellierung des nichtmotorisierten Individualverkehrs notwendig.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Beachtung verschiedener Zeitabschnitte, deren Verkehrsnachfrage sich signifikant unterscheidet. In den derzeitigen Bewertungsverfahren in Deutschland erfolgt die Bestimmung der Verkehrsnachfrage je Zeitabschnitt auf Basis des modellierten Gesamttagesverkehrs mittels Hochrechnungsfaktoren. Zukünftig sollten und müssen zur Bestimmung der Pseudo-Potentiale die einzelnen Zeitabschnitte modelliert werden. Zwar steigt dadurch der Berechnungsaufwand, jedoch genügt es, einen (repräsentativen) Zeitabschnitt zu kalibrieren, da davon auszugehen ist, dass die Bewertungsparameter über die Zeitabschnitte konstant sind.

Neben den monetären Projektwirkungen der Verkehrsteilnehmer, sind alle weiteren monetarisierbaren Wirkungen zu erfassen. Dazu zählen auch die nicht wahrgenommenen Kosteneinsparungen der Verkehrsteilnehmer (vgl. Kapitel 4.6.2.2). Die berechneten weiteren originären Projektwirkungen werden anschließend – sofern nicht bereits monetär vorliegend – mittels geeigneter Wertansätze monetarisiert. Die Wertansätze sollten für eine harmonische Gesamtbewertung idealerweise auf einer einheitlichen methodischen Grundlage beruhen. Die Monetarisierung der Änderung des internen Nutzens erfolgt auf Basis der in der Verkehrsnachfrageberechnung modellierten Bewertungspräferenzen der Verkehrsteilnehmer und entspricht methodisch dem Zahlungsbereitschaftsansatz. Ob dieser Ansatz für alle Projektwirkungen herangezogen werden kann und sollte, stellt eine eigenständige Thematik dar und ist hier nicht abschließend beantwortbar. Allerdings sollte im Hinblick auf eine methodische Stringenz bei der konkreten Ausgestaltung angewandter ökonomischer Gesamtbewertungsverfahren diese Fragestellung beachtet werden.

Zur abschließenden Bestimmung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses bzw. der Nutzen-Kosten-Differenz ist keine weitere Gewichtung der verschiedenen monetären Projektwirkungen notwendig, da alle die gleiche monetäre Skala aufweisen. Die Projektwirkungen können somit den Kosten gegenübergestellt werden.

Auf die konkrete Ausgestaltung des Verfahrens, wie die Beachtung von Transfers, die Bestimmung der Diskontierungsrate, die Durchführung von Sensitivitätsanalysen etc. soll an dieser Stelle verzichtet werden, da das Aufgabe interdisziplinärer Gremien und Arbeitskreise ist. Gleiches gilt für verkehrsträgerspezifische Projektwirkungen, die je nach zu bewertender Maßnahme (Straßen-, Schienen-, Radverkehrsanlage etc.) zu beachten sind.

## 6 Beispielanwendung

### 6.1 Vorbemerkungen

Das im vorangegangenen Kapitel entwickelte integrierte Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodell soll an einem praktischen Beispiel angewandt werden. Den Bewertungsgegenstand stellt dabei der (hypothetische) Neubau einer Straße zur Schließung der Osttangente der Stadt Zwickau dar. Zwickau ist die viertgrößte Stadt in Sachsen und hat eine Einwohnerzahl von 94.340 Einwohnern auf einer Fläche von 102,54 km<sup>2</sup> (Stand 31.12.2009) (vgl. SLFS [134]). Die Stadt besitzt als Oberzentrum eine bedeutende Funktion für die Region und ist Teil der mitteldeutschen Metropolregion „Sachsendreieck“.

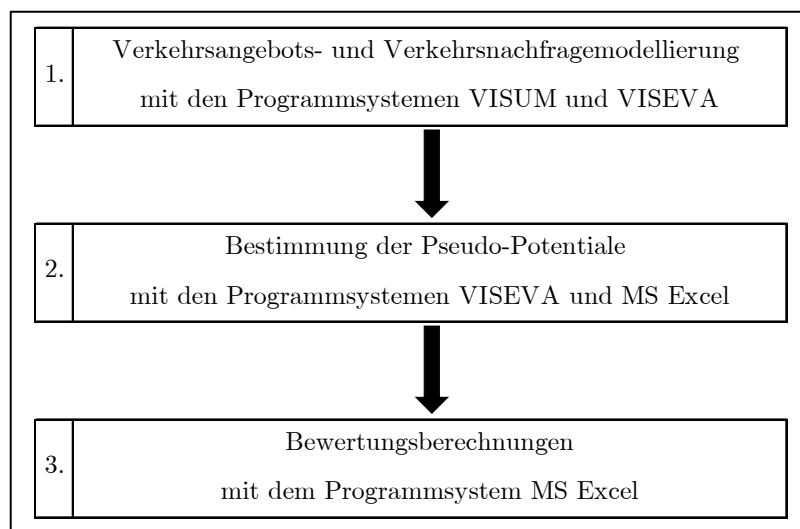


Abbildung 6-1: Berechnungsstufen

Die notwendigen Berechnungen erfolgen in drei Stufen (vgl. Abbildung 6-1). Zunächst wird in der ersten Stufe die Verkehrsnachfrageberechnung für den Ohne- und Mitfall durchgeführt. Hierfür werden die Programmsysteme VISUM [121] und VISEVA [119] der PTV AG genutzt. In VISUM erfolgt die Angebotsmodellierung und Routenwahl und in VISEVA die Verkehrserzeugung, Ziel- und Verkehrsmittelwahl. Das in VISEVA verwendete Verkehrsnachfragemodell ist das EVA-Modell (siehe Kapitel 3.2). Es wurde im vorangegangenen Kapitel gezeigt, dass daraus durch Umformungen das EVA-Logit-Modell aufgestellt werden kann. Deshalb können die Ergebnisse von VISEVA für die weiteren Nutzenberechnungen herangezogen werden. Allerdings sind nicht alle benötigten und in VISEVA enthaltenen Daten in der notwendigen Form derzeit auslesbar, weshalb – als

zweite Berechnungsstufe – Umrechnungen in VISEVA und MS Excel notwendig sind (siehe Kapitel 6.3).

Im Anschluss an die Verkehrsnachfrageberechnung und die Bestimmung aller notwendigen Daten werden darauf aufbauend in Stufe 3 (Kapitel 6.4) die Berechnungen des Bewertungsmoduls in MS Excel durchgeführt. Entsprechend dem integrierten Modellansatz erfolgen dabei zunächst die Berechnung der Änderung des internen Nutzens, daran anschließend die Ermittlung des Grenznutzens des Einkommens und schließlich die Bestimmung der Änderung der Konsumentenrente. Die Nutzenberechnung erfolgt zum einen auf Basis der korrigierten Logsum-Differenz (exaktes Ergebnis), zum anderen mittels der Halbierungsregel (Näherungslösung). Mit Hilfe der Näherungslösung erfolgt die Zerlegung des (genäherten) Gesamtergebnisses. Aus Vergleichszwecken wird abschließend zusätzlich die Berechnung der Ressourcenersparnis mittels des Ersparnisansatzes durchgeführt. Der große Arbeitsaufwand, der sich aus den Berechnungen der Stufen zwei und drei ergibt, begründet die Wahl der nicht zu großen Stadt Zwickau, für die darüber hinaus ein kalibriertes Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodell existiert.

Es soll an dieser Stelle betont werden, dass die folgenden Berechnungen im Wesentlichen der Verdeutlichung des integrierten Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodells dienen und nicht der untersuchten Maßnahme. Dafür wäre eine vollständige NKA notwendig, die sämtliche Projektwirkungen und einen Bewertungszeitraum von mehreren Jahren umfasst. Die in Kapitel 6.3 durchzuführenden Umrechnungen sind kein integraler Bestandteil des entwickelten Modells, sondern stellen eine zusätzliche Notwendigkeit dar, da die benötigten Pseudo-Potentiale aus der existierenden VISEVA-Version nicht direkt ausgelesen werden können. Durch eine entsprechende, noch zu programmierende Schnittstelle für eine Datenausgabe der Pseudo-Potentiale wären diese Umrechnungen zukünftig nicht notwendig.

## 6.2 Verkehrsmodellierung

Das Verkehrsangebotsmodell<sup>76</sup> der Stadt Zwickau in VISUM besteht im Wesentlichen aus 56 Verkehrsbezirken, 1134 Strecken mit ca. 568 km Länge, 450 Knoten, 207 Haltepunkten des ÖPV und 78 ÖPV-Linien. Das Verkehrsnachfragemodell in VISEVA umfasst die vier Verkehrsmittel Fuß, Rad, ÖPV und MIV. Weiterhin erfolgt die Berechnung für 13 Quelle-Ziel-Gruppen (vgl. Tabelle 6-2). Als Bewertungsfunktion wird die EVA2-Funktion verwendet. Bewertungsrelevante Aufwandsgrößen sind für alle Verkehrsmittel die Reisezeit(komponenten) sowie für den ÖPV und den MIV zusätzlich die Reisekosten (vgl. Tabelle 6-1). Die Fahrpreise des ÖPV ergeben sich aus einem einfachen

---

<sup>76</sup> Das Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodell wurde von POPP [118] übernommen und in wenigen Punkten angepasst.

entfernungsabhängigen Tarifmodell. Für den MIV werden die Treibstoffkosten herangezogen, wobei ein durchschnittlicher Verbrauch von 8 Litern je 100 Kilometer und ein Preis von 1,50 Euro je Liter angenommen wird.

	Fuß	Rad	ÖPV	MIV
<b>Zeitaufwand</b>	Reisezeit ( $t_0$ )	Reisezeit ( $t_0$ )	Zugangszeit Beförderungszeit (einschl. Warte- und Umsteigegehzeiten) Abgangszeit	Reisezeit (TM)
<b>Kosten</b>	-	-	Fahrpreis (1,30 Euro, 2,00 Euro, 3,50 Euro)	reiseweitenabhängige Reisekosten (0,12 Euro/km)

Tabelle 6-1: Bewertungsrelevante Aufwände im Beispiel

Entsprechend dem verwendeten EVA-Modell wird die Ziel- und Verkehrsmittelwahl simultan durchgeführt. Berechnungszeitraum ist ein gesamter Werktag (keine Beachtung von Zeitscheiben). Die im Ohne- und Mitfall ermittelten Fahrtenmatrizen werden in VISUM für den Fuß- und Radverkehr mittels eines sukzessiven Bestwegverfahrens mit 100 % in der ersten Schicht, für den ÖPV fahrplanfein und für den MIV mittels der stochastischen Umlegung durchgeführt. Als Aufteilungsregel der stochastischen Routenwahl kommt dabei das in VISUM integrierte Aufteilungsmodell „LOHSE“ (modifizierte KIRCHHOFFSche Aufteilungsregel) zur Anwendung. Die Ergebnisse im Ohne- und Mitfall stellen jeweils (nach der Durchführung notwendiger Rückkopplungen) ein stochastisches Nutzergleichgewicht zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage dar.

QZG-Nr.	QZG-Bezeichnung	Randsummenbedingungen	
		Quelle	Ziel
1	Wohnen-Arbeiten	unelastisch	unelastisch
2	Wohnen-Kindereinrichtung	unelastisch	unelastisch
3	Wohnen-Bildung	unelastisch	unelastisch
4	Wohnen-Einkaufen	unelastisch	elastisch
5	Wohnen-Sonstiges	unelastisch	elastisch
6	Arbeiten-Wohnen	unelastisch	unelastisch
7	Kindereinrichtung-Wohnen	unelastisch	unelastisch
8	Bildung-Wohnen	unelastisch	unelastisch
9	Einkaufen-Wohnen	elastisch	unelastisch
10	Sonstiges-Wohnen	elastisch	unelastisch
11	Arbeiten-Sonstiges	unelastisch	elastisch
12	Sonstiges-Arbeiten	elastisch	unelastisch
13	Sonstiges-Sonstiges	elastisch	elastisch

Tabelle 6-2: Quelle-Ziel-Gruppen im Beispiel



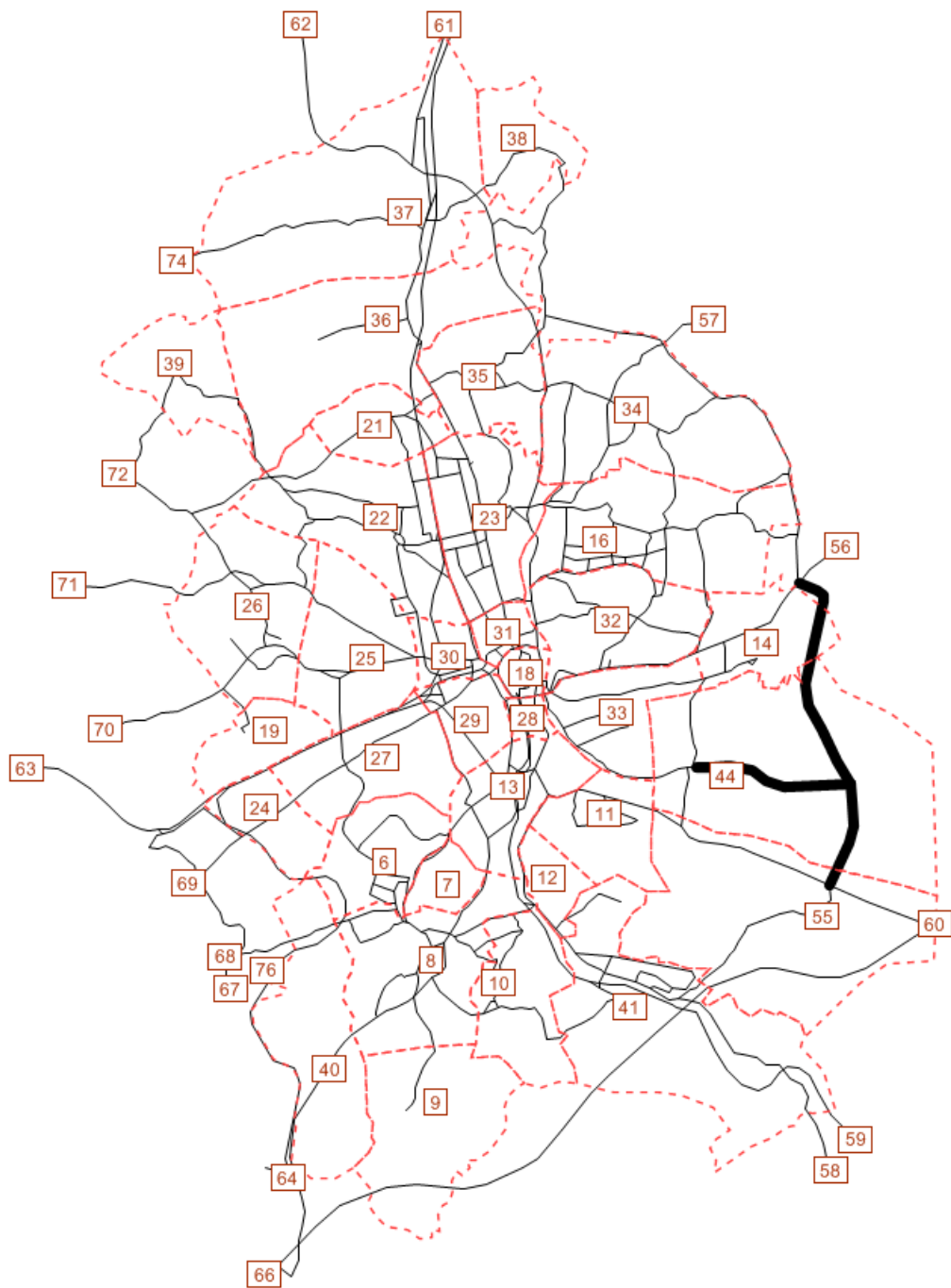


Abbildung 6-2: Verkehrsangebotsmodell der Stadt Zwickau  
(geplante Maßnahme ist fett dargestellt)

In Abbildung 6-2 ist das Verkehrsangebotsmodell einschließlich der zu bewertenden Maßnahme dargestellt. Die Maßnahme dient als Lückenschluss der östlichen Umfahrung der Stadt Zwickau, wobei es sich um eine außerörtliche Kreisstraße handelt. Das Modellierungsergebnis des MIV im **Ohnefall** ist in Abbildung 6-3 veranschaulicht. Es ist erkennbar, dass die höchsten Verkehrsstärken (mit abschnittsweise bis zu 30.000 Pkw/24h) auf der Nord-Süd-Relation erzielt werden.

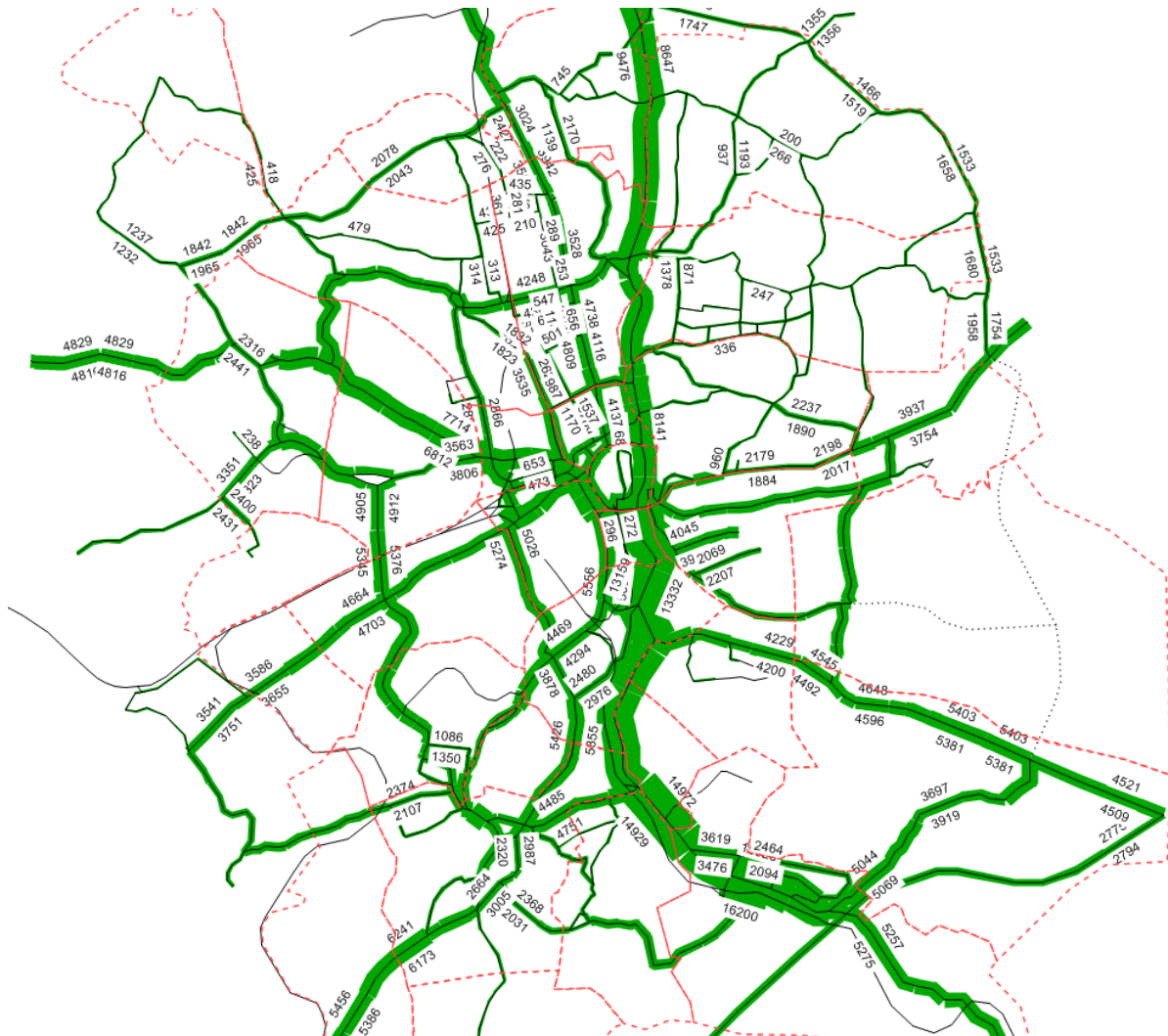


Abbildung 6-3: Umlegungsergebnis des MIV im Ohnefall  
(Angaben unter 200 Fahrzeugen sind ausgeblendet)

Der **Mitfall** unterscheidet sich angebotsseitig zum Ohnefall ausschließlich durch die zu bewertende Maßnahme, wodurch eine Verbesserung des Verkehrsangebots für den MIV erzielt wird. Da keine Veränderung des ÖPV-Liniennetzes erfolgt, bleibt das Verkehrsangebot des ÖPV unberührt. Durch die Maßnahme ist das relevante Verkehrsangebot der Verkehrsmittel Fuß und Rad ebenfalls faktisch nicht betroffen.

Neben der Aufwandsreduzierung wird unterstellt, dass sich die spezifischen Verkehrsaufkommen der Quelle-Ziel-Gruppen Wohnen-Sonstiges (QZG 5) und Sonstiges-Wohnen (QZG 10) infolge der Maßnahme um jeweils 0,002 Ortsveränderungen pro Bezugsperson und Tag erhöhen. Durch das Verkehrsprojekt wird somit Neuverkehr induziert. Diese (in ihrer Höhe willkürliche) Annahme dient ausschließlich der späteren Darstellung der verschiedenen Berechnungsansätze des Bewertungsmoduls und ist keineswegs als realistische (und empirisch gestützte) Konsequenz des Projektes aufzufassen. Das Umlegungsergebnis des MIV im Mitfall ist in Abbildung 6-4 dargestellt.

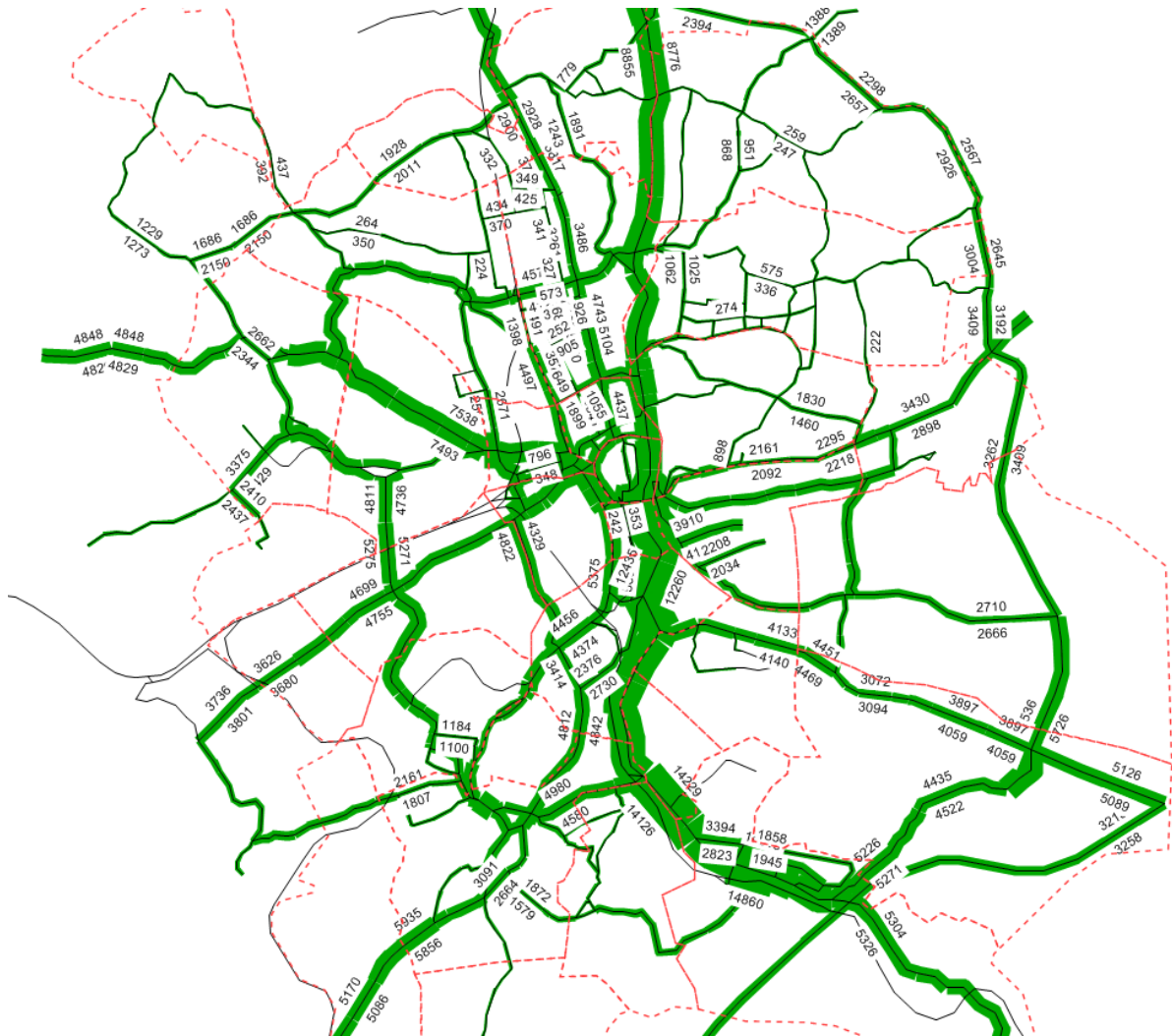


Abbildung 6-4: Umlegungsergebnis des MIV im Mitfall  
(Angaben unter 200 Fahrzeugen sind ausgeblendet)

Die Gegenüberstellung der Umlegungsergebnisse des MIV in Form eines Differenznetzes ist in Abbildung 6-5 abgebildet. Darin ist erkennbar, dass die größte Zunahme erwartungsgemäß auf der neuen Straße realisiert wird. Außerdem werden die sich nördlich und südlich anschließenden Strecken höher belastet. Trotz der erkennbaren einzelnen Abnahmen der Verkehrsstärken im Mitfall-Netz resultieren insgesamt höhere MIV-Verkehrsstärken, die durch den induzierten Neuverkehr und Modal-Split-Änderungen zugunsten des MIV zu erklären sind (siehe Anhang E).

Neben diesen direkt nachvollziehbaren Differenzen zwischen Mit- und Ohnefall treten an einzelnen Streckenabschnitten auch (kleinere) unplausible Änderungen auf. Im Rahmen einer praktischen Verkehrsnachfragemodellierung und Bewertung als Grundlage für politische Entscheidungen wären entsprechende Modellverfeinerungen und Nachkalibrierungen notwendig, womit allerdings ein sehr großer Zeitaufwand verbunden ist. Für die Darstellung der Anwendbarkeit und Funktionsfähigkeit des entwickelten Modells ist dies jedoch nicht erforderlich, weshalb für diese Arbeit darauf verzichtet wurde.

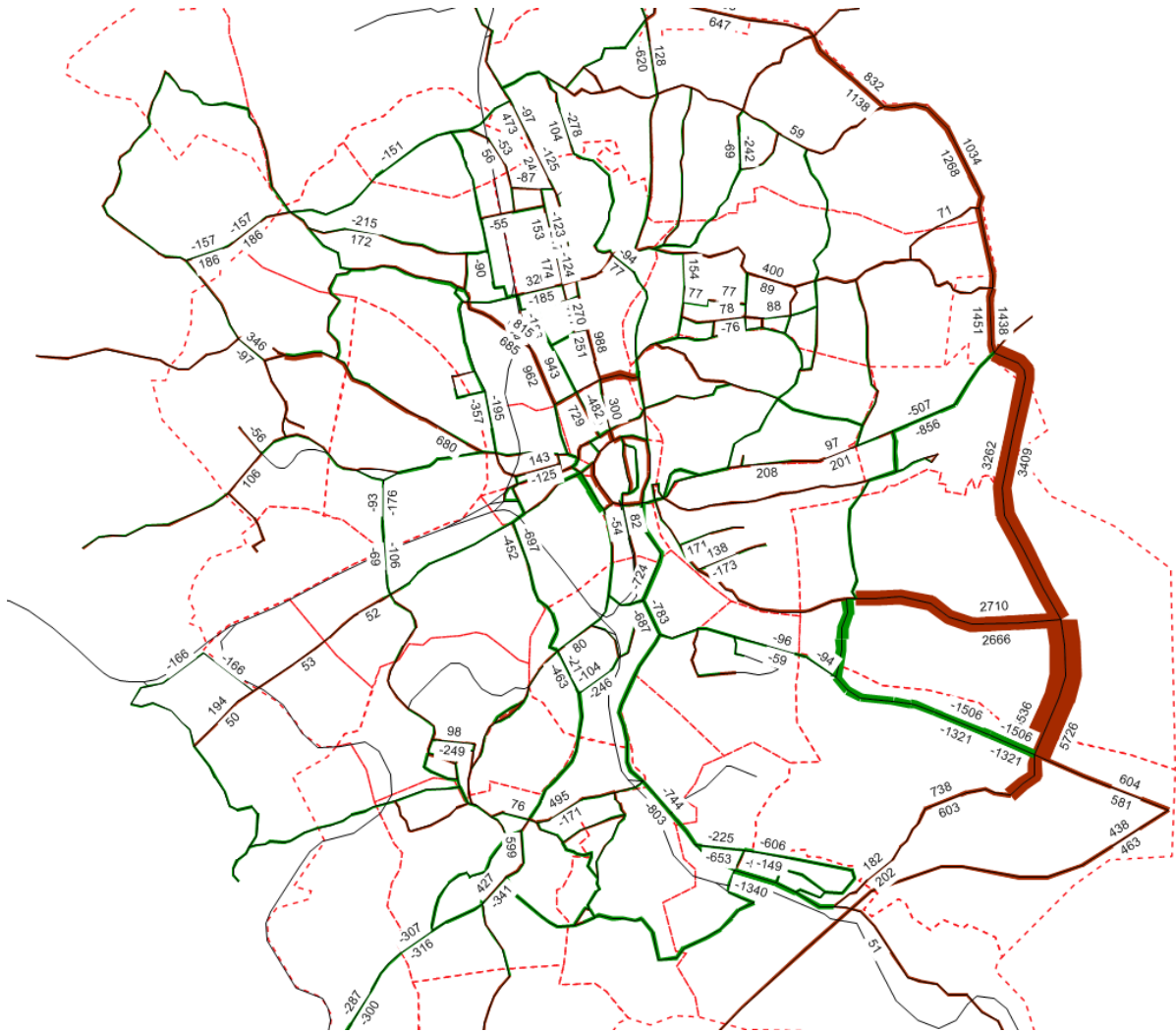


Abbildung 6-5: MIV-Differenznetz

(Angaben unter 50 Fahrzeugen sind ausgeblendet; rot – Zunahme, grün – Abnahme)

### 6.3 Bestimmung der Pseudo-Potentiale

Die exakte Nutzenberechnung auf Basis der korrigierten Logsum-Differenz benötigt, neben den der Verkehrsnachfrage zugrunde liegenden Präferenzen der Verkehrsteilnehmer, die Pseudo-Potentiale. Diese können grundsätzlich aus den Lösungsfaktoren des EVA-Grundmodells gewonnen werden, die in VISEVA enthalten sind. Allerdings ist derzeit keine externe Schnittstelle für diesen Datenexport programmiert. Es besteht jedoch die Möglichkeit, sogenannte Lagefaktoren<sup>77</sup> auszulesen, die für die Bestimmung der gesuchten Größen herangezogen werden können. Die Lagefaktoren stellen normierte Größen zur Beurteilung der Lage von Verkehrsbezirken dar. Sie werden in VISEVA allerdings momentan nur für den Fall unelastischer Randsummenbedingungen in der notwendigen Form bestimmt. Für diesen Fall gilt (vgl. LOHSE ET AL. [92] S. 49):

<sup>77</sup> Siehe hierzu Kapitel 3.2.2.1.2 und LOHSE ET AL. [92].

$$q_{ic} = \frac{fq_{ic} / \sum_{i'} fq_{i'c}}{Q_{ic} / V_c} \quad \text{und} \quad z_{jc} = \frac{fz_{jc} / \sum_{j'} fz_{j'c}}{Z_{jc} / V_c}. \quad (6.1)$$

Die Lagefaktoren ergeben sich für jede Quelle-Ziel-Gruppe unmittelbar aus den Lösungsfaktoren des EVA-Grundmodells und den Quell-, Ziel- und Gesamtverkehrsaufkommen. Mit Hilfe verschiedener Berechnungsprozeduren ist es möglich, die Pseudo-Potentiale für alle Quelle-Ziel-Gruppen zu bestimmen. Hierfür sind folgende Berechnungen notwendig:

- (1) VISEVA-Umrechnungen des Ohne- und des Mitfalls,
- (2) Ermittlung der Lösungsfaktoren  $fq_{ic}$  und  $fz_{jc}$  für den Ohne- und Mitfall und
- (3) Ermittlung der Pseudo-Potentiale für den Ohne- und Mitfall.

Die einzelnen Berechnungsschritte werden nachfolgend erläutert.

#### Ad (1):

Wie oben bereits erwähnt, können die Lagefaktoren nur für den Fall unelastischer Randsummenbedingungen aus den VISEVA-Berechnungen herausgezogen werden. Daher sind Umrechnungen in VISEVA sowohl für den Ohne- als auch den Mitfall durchzuführen, die es ermöglichen, die Verkehrsströme für alle 13 Quelle-Ziel-Gruppen mit dem Berechnungsansatz der unelastischen Randsummenbedingungen zu generieren. Hierfür ist es erforderlich, die sich in der Originalberechnung ergebenden Quell- und Zielverkehrsaufkommen in der Umrechnung als unelastische Randsummenbedingungen neu vorzugeben.

Des Weiteren ist es für die Berechnung des Ohnefalls (ebenso wie für den Mitfall) notwendig, den Prognose-Ansatz des EVA-Modells zu verwenden. Damit werden die im Originalmodell bestimmten Verkehrsmittelkonstanten  $C_{kc}$ , die aus den  $fa_{kc}$ -Faktoren gewonnen werden, vorgegeben (siehe Kapitel 3.2.2). Diese Notwendigkeit ergibt sich aus der anschließenden Nutzenberechnung, bei der sich der Betrag der Verkehrsmittelkonstanten – und damit der verkehrsmittelspezifischen Pseudo-Potentiale – zwischen Ohne- und Mitfall nicht ändern darf (siehe Kapitel 5.3). Es gilt somit:

$$C_{kc}^O = C_{kc}^M \quad (6.2)$$

und mit  $\psi_{kc} = \ln(C_{kc})$  (siehe Kapitel 5.2.2) resultiert

$$\psi_{kc}^O = \psi_{kc}^M. \quad (6.3)$$

Eine Übersicht über die notwendigen und angewandten Transformationen und Berechnungsvorschriften in VISEVA ist in Tabelle 6-3 gegeben. Aus den VISEVA-Umrechnungen können dann die Lagefaktoren  $q_{ic}$  und  $z_{jc}$  aller Quelle-Ziel-Gruppen ausgelesen werden.

	Originalmodell		Umrechnungsmodell
<b>Ohnefall</b>	$v_{ijkc} = B_{ijkc} \cdot fq_{ic} \cdot fz_{jc} \cdot fa_{kc}$ $(0 \leq) \sum_j \sum_k v_{ijkc} \leq Q_{ic}^{(max)}$ $(0 \leq) \sum_i \sum_k v_{ijkc} \leq Z_{jc}^{(max)}$ $\sum_i \sum_j v_{ijkc} = A_{kc}$	➔	$v_{ijkc} = B_{ijkc} \cdot fq_{ic} \cdot fz_{jc} \cdot C_{kc}$ $\sum_j \sum_k v_{ijkc} = Q_{ic}^R$ $\sum_i \sum_k v_{ijkc} = Z_{jc}^R$
<b>Mitfall</b>	$v_{ijkc} = B_{ijkc} \cdot fq_{ic} \cdot fz_{jc} \cdot C_{kc}$ $(0 \leq) \sum_j \sum_k v_{ijkc} \leq Q_{ic}^{(max)}$ $(0 \leq) \sum_i \sum_k v_{ijkc} \leq Z_{jc}^{(max)}$	➔	$v_{ijkc} = B_{ijkc} \cdot fq_{ic} \cdot fz_{jc} \cdot C_{kc}$ $\sum_j \sum_k v_{ijkc} = Q_{ic}^R$ $\sum_i \sum_k v_{ijkc} = Z_{jc}^R$
$Q_{ic}^R, Z_{jc}^R$ resultierende QZG-spezifische Quell- und Zielverkehrsaufkommen des Originalmodells Klammerausdrücke gelten nur für elastische Randsummenbedingungen			

Tabelle 6-3: Notwendige Umrechnungen in VISEVA

**Ad (2):**

Zur Bestimmung der Lösungsfaktoren sind grundlegende Zusammenhänge des EVA-Modells heranzuziehen. LOHSE ET AL. zeigen in [92], dass gilt (vgl. S. 61):

$$fq_{ic} \cdot fz_{jc} \cdot C_{kc} = \frac{fq_{ic}}{\sum_{i'} fq_{i'c}} \cdot \frac{fz_{jc}}{\sum_{j'} fz_{j'c}} \cdot C_{kc} \cdot \frac{V_c}{\sum_{i''} \sum_{j''} \sum_{k'} B_{i'j'k'c} \cdot \frac{fq_{i'c}}{\sum_{i''} fq_{i''c}} \cdot \frac{fz_{j'c}}{\sum_{j''} fz_{j''c}} \cdot C_{k'c}}}. \quad (6.4)$$

Das kann vereinfacht werden zu:

$$fq_{ic} \cdot fz_{jc} = \frac{fq_{ic}}{\sum_{i'} fq_{i'c}} \cdot \frac{fz_{jc}}{\sum_{j'} fz_{j'c}} \cdot \frac{V_c}{\sum_{i''} \sum_{j''} \sum_{k'} B_{i'j'k'c} \cdot \frac{fq_{i'c}}{\sum_{i''} fq_{i''c}} \cdot \frac{fz_{j'c}}{\sum_{j''} fz_{j''c}} \cdot C_{k'c}}}. \quad (6.5)$$

Bekannt sind zunächst nur die Bewertungen  $B_{ijkc}$ , die Konstanten  $C_{kc}$  und die Gesamtverkehrsaufkommen  $V_c$ . Unter Beachtung der Zusammenhänge in (6.1) können jedoch die unbekanntenen Größen bestimmt werden. Somit gilt:

$$\frac{fq_{ic}}{\sum_{i'} fq_{i'c}} = \frac{q_{ic} \cdot Q_{ic}}{V_c} \quad \text{und} \quad \frac{fz_{jc}}{\sum_{j'} fz_{j'c}} = \frac{z_{jc} \cdot Z_{jc}}{V_c}. \quad (6.6)$$

Das Einsetzen in (6.5) liefert:

$$fq_{ic} \cdot fz_{jc} = \frac{q_{ic} \cdot Q_{ic}}{V_c} \cdot \frac{z_{jc} \cdot Z_{jc}}{V_c} \cdot \frac{V_c}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} B_{i'j'k'c} \cdot \frac{q_{i'c} \cdot Q_{i'c}}{V_c} \cdot \frac{z_{j'c} \cdot Z_{j'c}}{V_c} \cdot C_{k'c}}}. \quad (6.7)$$

Durch die proportionale Aufteilung des dritten Terms der rechten Seite auf den ersten und zweiten Term können die gesuchten Lösungsfaktoren berechnet werden:<sup>78</sup>

$$fq_{ic} = \frac{q_{ic} \cdot Q_{ic}}{V_c} \cdot \sqrt{\frac{V_c}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} B_{i'j'k'c} \cdot \frac{q_{i'c} \cdot Q_{i'c}}{V_c} \cdot \frac{z_{j'c} \cdot Z_{j'c}}{V_c} \cdot C_{k'c}}}. \quad (6.8)$$

$$fz_{jc} = \frac{z_{jc} \cdot Z_{jc}}{V_c} \cdot \sqrt{\frac{V_c}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} B_{i'j'k'c} \cdot \frac{q_{i'c} \cdot Q_{i'c}}{V_c} \cdot \frac{z_{j'c} \cdot Z_{j'c}}{V_c} \cdot C_{k'c}}}$$

Durch die Gleichungen sind die gesuchten Lösungsfaktoren des EVA-Grundmodells ermittelbar, die im Folgenden zur Bestimmung der Pseudo-Potentiale herangezogen werden.

### Ad (3):

Die Pseudo-Potentiale können durch Logarithmieren der Lösungsfaktoren bestimmt werden (siehe Kapitel 5.2) und sind in Anhang F im Rahmen der Nutzenberechnung aufgelistet. Mit den abgeleiteten Pseudo-Potentialen ist es zum einen möglich, die EVA-Nutzenfunktion des EVA-Logit-Modells für jede Alternative zu formulieren, zum anderen die Bewertungsberechnungen auf Basis der korrigierten Logsum-Differenz durchzuführen.

## 6.4 Bewertung

### 6.4.1 Änderung des internen Nutzens

Die Änderung des internen Nutzens wird mittels der korrigierten Logsum-Differenz und zusätzlich, zur späteren Zerlegung der Änderung der Konsumentenrente, mit der Halbierungsregel berechnet. Die formalen Ansätze wurden in Kapitel 5.3 aufgestellt und diskutiert. Hinsichtlich der Nutzenberechnung für das hier betrachtete Anwendungsbeispiel sind dabei der Fall ohne Neuverkehr für unelastische Randsummenbedingungen und die Fälle mit und ohne Neuverkehr für elastische Randsummenbedingungen relevant.

Aufgrund der iterativen Berechnung der Verkehrsströme können auch bei unelastischen Randsummenbedingungen die berechneten Quell- und Zielverkehrsaufkommen je

<sup>78</sup> Es ist grundsätzlich auch eine andere Aufteilung möglich.

Verkehrsbezirk zwischen Mit- und Ohnefall leicht abweichen. Daher wird für die Nutzenberechnung aller Quelle-Ziel-Gruppen ohne Neuverkehr der Ansatz (5.90) herangezogen. Für die Quelle-Ziel-Gruppen 5 und 10, in denen Neuverkehr entsteht, wird Ansatz (5.88) verwendet (siehe Tabelle 6-4).

QZG	Berechnungsansatz
QZG 1-4, 6-9 und 11-13	$\Delta E(\Phi_c^*) = \sum_i \left( \frac{Q_{ic}^O + Q_{ic}^M}{2} \right) \cdot (\theta_{ic}^O - \theta_{ic}^M) + \sum_j \left( \frac{Z_{jc}^O + Z_{jc}^M}{2} \right) \cdot (\tau_{ic}^O - \tau_{ic}^M)$
QZG 5 und 10	$\Delta E(\Phi_c^*) = \ln \left( \frac{V_c^M}{V_c^O} \right) \cdot \left( \frac{V_c^O + V_c^M}{2} \right) + \sum_i \left( \frac{Q_{ic}^O + Q_{ic}^M}{2} \right) \cdot (\theta_{ic}^O - \theta_{ic}^M) + \sum_j \left( \frac{Z_{jc}^O + Z_{jc}^M}{2} \right) \cdot (\tau_{ic}^O - \tau_{ic}^M)$

Tabelle 6-4: Verwendete Berechnungsansätze zur Bestimmung der exakten Änderung des internen Nutzens

In Tabelle 6-5 ist die Änderung des internen Nutzens je Quelle-Ziel-Gruppe zusammengestellt, deren Einheit hier mit [Util] bezeichnet wird. Neben den exakten Ergebnissen sind die mittels der Halbierungsregel bestimmten Näherungswerte und deren absolute und prozentuale Abweichungen vom exakten Ergebnis enthalten. Die Berechnungen mittels der korrigierten Logsum-Differenz je Quelle-Ziel-Gruppe sind in Anhang F detailliert aufgelistet. Auf die Darstellung der Berechnung der Nutzenänderungen mit der Halbierungsregel wird allerdings aufgrund der Datenmengen verzichtet.

QZG	$\Delta E(\Phi_c^*)$		Abweichung der Näherungslösung	
	exakt (Logsum-Differenz)	genähert (Halbierungsregel)		
	[Util]	[Util]	[Util]	[%]
1	855,32	858,07	+2,75	+0,32
2	90,35	91,27	+0,92	+1,02
3	205,12	208,11	+2,98	+1,45
4	1313,57	1330,59	+17,02	+1,30
5	1224,28	1244,74	+20,47	+1,67
6	634,39	636,34	+1,95	+0,31
7	75,74	76,46	+0,72	+0,96
8	168,09	170,63	+2,53	+1,51
9	1493,41	1512,16	+18,75	+1,26
10	1503,16	1527,21	+24,05	+1,60
11	83,87	84,33	+0,45	+0,54
12	202,84	203,87	+1,02	+0,50
13	1071,99	1090,21	+18,22	+1,70
Σ	8922,13	9033,97	+111,84	+1,25

Tabelle 6-5: Ergebnis – Änderung des internen Nutzens



Aus den Ergebnissen wird zunächst deutlich, dass die Quelle-Ziel-Gruppen 4, 5, 9 und 10 die größten Nutzenänderungen aufweisen. Die geringsten Änderungen ergeben sich in den Quelle-Ziel-Gruppen 2, 7 und 11. Begründung finden die Unterschiede primär in den verschiedenen hohen Verkehrsaufkommen (siehe Anhang E). Beispielsweise werden in der Quelle-Ziel-Gruppe 4 fast 13-mal mehr Ortsveränderungen realisiert als in der Quelle-Ziel-Gruppe 2.

Einen weiteren Aspekt hinsichtlich der unterschiedlichen Beträge der Nutzenänderungen veranschaulichen die spezifischen Nutzenänderungen je Ortsveränderung in Tabelle 6-6. Die Werte werden durch die Division der gesamten Nutzenänderung je Quelle-Ziel-Gruppe durch die jeweiligen Gesamtverkehrsaufkommen bestimmt. Die Quelle-Ziel-Gruppen 4, 5, 9 und 10 weisen wiederum die höchsten Werte auf<sup>79</sup>, da mit den Aktivitäten „Einkaufen“ und „Sonstiges“ eine hohe Zielwahlfreiheit (elastische Randsummenbedingungen) verbunden ist und demzufolge andere Ziele, die durch die neue Maßnahme besser erreichbar sind, aufgesucht werden. Damit wird deutlich, dass neben dem Grad der Betroffenheit (Höhe der Verkehrsaufkommen) auch das Verkehrsverhalten der Verkehrsteilnehmer einen großen Einfluss auf die Nutzenänderungen besitzt.

QZG	$\Delta E(\Phi^*)$ je OV	QZG	$\Delta E(\Phi^*)$ je OV
	[Util/OV]		[Util/OV]
1	0,0149	8	0,0112
2	0,0173	9	0,0210
3	0,0118	10	0,0193
4	0,0197	11	0,0140
5	0,0179	12	0,0139
6	0,0146	13	0,0170
7	0,0186		

Tabelle 6-6: Ergebnis – Änderung des internen Nutzens je Ortsveränderung

Die mittels der Halbierungsregel approximierten Nutzenänderungen liefern nur geringe Abweichungen zum exakten Ergebnis (vgl. Tabelle 6-5). Die prozentual maximale Abweichung wird in der Quelle-Ziel-Gruppe 13 mit 1,70 % erreicht. Da die Abweichungen sehr gering sind (deutlich unter 10 %), ist die Anwendung der Numerischen Integration nicht notwendig.

<sup>79</sup> Die Quelle-Ziel-Gruppen 2 und 7 weisen trotz unelastischer Randsummenbedingungen ebenfalls hohe Werte auf. Das ist damit zu begründen, dass, infolge der Strukturgrößenverteilung im Untersuchungsgebiet, eine gegenüber anderen Quelle-Ziel-Gruppen höhere Betroffenheitsrate der realisierten Ortsveränderungen vorliegt.

## 6.4.2 Grenznutzen des Einkommens

Die zur Monetarisierung der originären Nutzenänderungen notwendigen Grenznutzen des Einkommens ergeben sich aus den modellierten Präferenzen gegenüber den Reisekosten. Die Bewertung der Reisekosten erfolgt in VISEVA mittels der EVA2-Bewertungsfunktion. Wie in Kapitel 5.2.3 gezeigt wurde, sind die damit modellierten Präferenzen in der Nutzenfunktion des EVA-Logit-Modells integrierbar, womit die gesuchten Werte bestimmt werden können. Da Reisekosten lediglich beim ÖPV und MIV anfallen, ergeben sich die Grenznutzen der Reisekosten und darauf aufbauend die Grenznutzen des Einkommens der Quelle-Ziel-Gruppen nur in Abhängigkeit dieser Verkehrsmittel.

Unter Verwendung der Ansätze aus Kapitel 5.4 erfolgt die Bestimmung der Grenznutzen der Reisekosten je Alternative im Mit- und Ohnefall. Die Erwartungswerte des Mit- und Ohnefalls werden jeweils als über die Verkehrsströme gewichtete Mittelwerte bestimmt. Für die Monetarisierung wird schließlich der Mittelwert der Erwartungswerte des Mit- und Ohnefalls verwendet, dessen negativer Wert dem Grenznutzen des Einkommens entspricht. Die berechneten Werte sind in Tabelle 6-7 aufgelistet.

QZG	$\lambda$	QZG	$\lambda$
	[Util/Euro]		[Util/Euro]
1	0,1844	8	0,8086
2	0,3661	9	0,3382
3	0,7476	10	0,3292
4	0,3399	11	0,1785
5	0,3378	12	0,1790
6	0,1799	13	0,2676
7	0,3568		

Tabelle 6-7: Modellierte Grenznutzen des Einkommens

Aus den Werten wird deutlich, dass die Personen der Quelle-Ziel-Gruppen 1, 6, 11 und 12 die geringste Sensibilität gegenüber einer Einkommens- und einer Reisekostenerhöhung/-reduzierung besitzen. Die Bezugspersonen dieser Quelle-Ziel-Gruppen sind jeweils die Erwerbstätigen, die, bezogen auf die Gesamtbevölkerung, das höchste Einkommen haben und demzufolge eher bereit sind, höhere Reisekosten in Kauf zu nehmen. Demgegenüber stehen vor allem die Quelle-Ziel-Gruppen 3 und 8. Den wesentlichen Anteil der Personen dieser Quelle-Ziel-Gruppen stellen die Schüler (zusätzlich einige begleitende Erwachsene) dar, die das geringste Einkommen aufweisen. Grundsätzlich ist bei diesen Quelle-Ziel-Gruppen jedoch zu beachten, dass Schüler i. d. R. ÖPV-Zeitfahrkarten besitzen und die alternativenspezifischen Reisekosten nicht explizit in die Entscheidung einfließen. Das gilt auch für Personen mit ÖPV-Zeitfahrkarten anderer Quelle-Ziel-Gruppen, allerdings umfasst das Anwendungsbeispiel nicht die Modellierung von Zeitfahrkarten.

Alle weiteren Quelle-Ziel-Gruppen weisen ähnliche Werte auf. Mit Ausnahme der Quelle-Ziel-Gruppen 2 und 7, bei denen Kinder und begleitende Erwachsene die Ortsveränderungen durchführen, stellen die Einwohner des Untersuchungsgebietes die maßgebende Personengruppe dar, womit die vergleichbaren Beträge der Grenznutzen zu begründen sind.

### 6.4.3 Änderung der Konsumentenrente

Die Änderung der Konsumentenrente ist das monetäre Äquivalent des geänderten internen Nutzens und geht unmittelbar in die NKA ein. Unter Nutzung der in Tabelle 6-7 ausgewiesenen Werte ergeben sich die gesuchten monetären Nutzenänderungen, die in Tabelle 6-8 zusammengestellt sind. Darüber hinaus enthält die Tabelle wiederum die absoluten und prozentualen Abweichungen der approximativen Ergebnisse.

Den größten Anteil am monetären Gesamtnutzen liefert die Quelle-Ziel-Gruppe 1, die beim originären Nutzen (siehe Tabelle 6-5) nur den fünftgrößten Anteil besitzt. Der Grund für den hier höheren Einfluss ist der geringere Grenznutzen des Einkommens der Quelle-Ziel-Gruppe 1 gegenüber den Quelle-Ziel-Gruppen 4, 5, 9 und 10, die eine höhere Änderung des internen Nutzens aufweisen.

Die Abweichungen der Näherungslösungen entsprechen für die einzelnen Quelle-Ziel-Gruppen exakt denen in Tabelle 6-5, da die Werte lediglich mit einem konstanten Faktor multipliziert werden. Das Gesamtergebnis der Änderung der Konsumentenrente weicht jedoch mit 1,13 % etwas weniger ab als beim originären Nutzen.

Mit Hilfe der Näherungslösung ist es möglich, die Änderung der Konsumentenrente zu zerlegen. Eine Unterteilung nach den Verkehrsmitteln ist a priori gegeben, da der gesamte Nutzen beim MIV anfällt (nur dort ergeben sich Aufwandsänderungen zwischen Ohne- und Mitfall). Die Ausweisung nach den Aufwandsgrößen und verbleibendem und induziertem Verkehr erfolgt in Tabelle 6-9.

Die Nutzensausweisung nach den Aufwandsgrößen zeigt, dass der Nutzengewinn ausschließlich infolge der Reduzierung der Reisezeiten entsteht. Der Nutzen in Abhängigkeit der Änderung der Reisekosten ist hingegen in allen Quelle-Ziel-Gruppen negativ. Die Realisierung der Verkehrsmaßnahme bewirkt im Wesentlichen die Reduzierung der Reisezeiten zwischen den Verkehrsbezirken (und nicht die Verkürzung der Wege). Dadurch werden weiter entfernte Ziele attraktiver, wodurch die Reiseweiten und damit die Reisekosten steigen. Die Erhöhung der Reisekosten führt somit zu einem negativen Nutzenbeitrag.

Die Ausweisung der Änderung der Konsumentenrente nach verbleibendem und induziertem Verkehr des MIV verdeutlicht, dass der wesentlich größere Anteil in jeder Quelle-Ziel-Gruppe durch den verbleibenden Verkehr erzeugt wird. Der Anteil des induzierten

Verkehrs (verlagerter Verkehr und Neuverkehr) des MIV beläuft sich im Gesamtergebnis auf 13,35 %.

QZG	$\Delta KR$		Abweichung der Näherungslösung	
	exakt	genähert	[Euro]	[%]
	[Euro]	[Euro]		
1	4637,64	4652,57	+14,93	+0,32
2	246,75	249,27	+2,51	+1,02
3	274,39	278,38	+3,99	+1,45
4	3864,02	3914,09	+50,08	+1,30
5	3624,71	3685,31	+60,60	+1,67
6	3527,03	3537,86	+10,84	+0,31
7	212,30	214,33	+2,03	+0,96
8	207,87	211,00	+3,13	+1,51
9	4415,18	4470,62	+55,43	+1,26
10	4565,47	4638,51	+73,03	+1,60
11	470,00	472,54	+2,54	+0,54
12	1132,91	1138,63	+5,72	+0,50
13	4006,33	4074,42	+68,08	+1,70
$\Sigma$	31184,60	31537,52	+352,92	+1,13

Tabelle 6-8: Ergebnis – Änderung der Konsumentenrente

QZG	zerlegte Änderung der Konsumentenrente			
	Reisezeit	Reisekosten	verbleibender Verkehr	induzierter Verkehr <sup>80</sup>
	[Euro]	[Euro]	[Euro]	[Euro]
1	5021,54	-368,97	4284,96	367,61
2	272,91	-23,64	214,05	35,22
3	280,28	-1,90	227,84	50,54
4	4133,97	-219,88	3324,91	589,18
5	3885,17	-199,86	3079,17	606,14
6	3797,20	-259,34	3268,91	268,96
7	229,68	-15,35	185,14	29,18
8	212,70	-1,70	169,44	41,56
9	4655,01	-184,39	3806,00	664,62
10	4860,16	-221,65	3900,92	737,58
11	504,67	-32,13	428,79	43,75
12	1220,08	-81,45	1035,35	103,28
13	4285,19	-211,41	3400,94	673,48
$\Sigma$	33359,19	-1821,67	27326,42	4211,10

Tabelle 6-9: Ergebnis – Zerlegte Änderung der Konsumentenrente

<sup>80</sup> Der induzierte Verkehr beinhaltet sowohl den verlagerten als auch den Neuverkehr (vgl. Kapitel 3.4).

### 6.4.4 Ersparnis

Die monetäre Nutzenänderung wird nachfolgend zu Vergleichszwecken mit dem Ersparnisansatz berechnet. Grundlage für diesen Ansatz stellen die gesamten Generalisierten Aufwände des Mit- und Ohnefalls dar. Die Differenz der Gesamtaufwände zwischen Mit- und Ohnefall ergibt die Einsparungen, die für alle Verkehrsmittel zu bestimmen sind und in die Gesamtrechnung eingehen. Für eine bessere Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit ist es notwendig, die Einsparungen getrennt nach den einzelnen Aufwandsgrößen zu bestimmen. Da sich die Generalisierten Aufwände aus nichtlinear transformierten Reisezeiten und Reisekosten zusammensetzen, sind zunächst die jeweiligen transformierten Differenzen zwischen Mit- und Ohnefall zu bestimmen. Anschließend erfolgt – analog dem Ansatz der Änderung der Konsumentenrente – die Monetarisierung mittels der intern bestimmten Grenznutzen des Einkommens.

In Tabelle 6-10 sind die Ergebnisse des Ersparnisansatzes je Verkehrsmittel, Quelle-Ziel-Gruppe und nach den Aufwandskomponenten getrennt zusammengestellt. Die Einheit stellt dabei die originäre Einheit der Nutzenfunktion dar. Das über die Verkehrsmittel und Aufwandskomponenten aggregierte Gesamtergebnis ist in der letzten Spalte aufgelistet. Die gleiche Struktur weist Tabelle 6-11 auf, welche die resultierenden monetarisierten Ersparnisse umfasst. Für die Monetarisierung sind die modellierten Grenznutzen des Einkommens in Tabelle 6-7 heranzuziehen. Zur leichteren Interpretation der Ergebnisse sind im Folgenden die Verkehrsaufkommen, der Modal-Split und deren Veränderungen zwischen dem Ohne- und Mitfall in Anhang E zu beachten.

QZG	Fuß	Rad	ÖPV		MIV		gesamt
	Reisezeit	Reisezeit	Reisezeit	Reisekosten	Reisezeit	Reisekosten	
	[util]	[util]	[util]	[util]	[util]	[util]	[util]
1	-14,99	11,03	5,25	27,40	722,40	-122,14	628,96
2	26,34	5,97	0,03	0,70	69,17	-31,05	71,16
3	-13,68	6,18	7,66	14,91	115,14	-61,59	68,62
4	114,17	80,81	17,17	92,90	920,64	-246,01	979,69
5	-108,40	94,44	16,45	77,41	751,44	-260,20	571,15
6	-4,64	8,22	2,43	20,66	536,17	-87,58	475,26
7	22,77	3,34	0,11	0,39	57,35	-23,17	60,78
8	-10,71	5,25	5,37	9,58	89,95	-55,28	44,17
9	69,20	84,16	21,07	105,35	1034,67	-247,62	1066,84
10	-112,28	97,44	19,25	92,69	928,60	-296,52	729,17
11	12,16	1,05	0,26	2,95	65,61	-12,03	70,00
12	9,24	3,25	1,61	9,98	161,10	-28,84	156,34
13	66,52	62,83	20,62	87,13	661,52	-194,58	704,04
Σ	55,69	463,99	117,28	542,06	6113,77	-1666,61	5626,18

Tabelle 6-10: Ergebnis – Transformierte Aufwandsersparnisse

QZG	Fuß	Rad	ÖPV		MIV		gesamt
	Reisezeit	Reisezeit	Reisezeit	Reisekosten	Reisezeit	Reisekosten	
	[Euro]	[Euro]	[Euro]	[Euro]	[Euro]	[Euro]	[Euro]
1	-81,30	59,84	28,46	148,58	3917,60	-662,35	3410,82
2	71,96	16,32	0,07	1,91	188,93	-84,80	194,38
3	-18,30	8,26	10,24	19,95	154,02	-82,38	91,79
4	335,88	237,75	50,52	273,33	2708,57	-723,77	2882,28
5	-320,89	279,59	48,70	229,16	2224,52	-770,29	1690,79
6	-25,81	45,69	13,49	114,87	2980,36	-486,80	2641,80
7	63,81	9,37	0,31	1,09	160,73	-64,95	170,36
8	-13,25	6,50	6,65	11,85	111,24	-68,36	54,62
9	204,62	248,85	62,31	311,51	3059,35	-732,17	3154,46
10	-341,08	295,99	58,48	281,56	2820,76	-900,74	2214,98
11	68,10	5,91	1,45	16,52	367,59	-67,39	392,18
12	51,64	18,17	9,02	55,73	900,02	-161,14	873,43
13	248,59	234,78	77,05	325,59	2472,06	-727,12	2630,94
Σ	243,98	1467,00	366,76	1791,64	22065,73	-5532,28	20402,83

Tabelle 6-11: Ergebnis – Monetarisierete Aufwandsersparnisse

Das Ergebnis zeigt, dass mit Ausnahme der Reisekostendifferenz des MIV für alle Aufwandskomponenten jedes Verkehrsmittels eine positive Einsparung erzielt wird. Die in allen Quelle-Ziel-Gruppen und Aufwandskomponenten positiven Einsparungen beim Rad und ÖPV sind im Wesentlichen Folge der Verluste an Verkehrsaufkommen der Verkehrsmittel. Weiterhin wirken Zielwahländerungen aufwandsreduzierend.

Die Änderungen des Modal-Splits zeigen, dass der MIV in jeder Quelle-Ziel-Gruppe Anteile gewinnt, weshalb die Gesamtreisekosten steigen. Demgegenüber stehen Einsparungen bei den Gesamtreisezeiten des MIV, d. h. dass selbst durch die neu hinzukommenden MIV-Nutzer im Mitfall keine höheren Gesamtreisezeiten resultieren.

Bei den Fußgängern bietet sich ein heterogenes Bild. Die in einigen Quelle-Ziel-Gruppen anfallenden Erhöhungen der Ausgaben resultieren vor allem aus der Zunahme des Fußgängerverkehrsaufkommens. Diese werden zwar auch in den Quelle-Ziel-Gruppen 9 und 13 realisiert, jedoch durch eine veränderte Zielwahl (kürzere Wege) überkompensiert. In den restlichen Quelle-Ziel-Gruppen sinkt das Fußgängerverkehrsaufkommen, woraus sich Gesamtreisezeiteneinsparungen ergeben.

Die teilweise Erhöhung der Verkehrsaufkommen des Fußgängerverkehrs (und damit verbunden die negativen Einsparungen) infolge einer MIV-Maßnahme erscheinen nicht unmittelbar plausibel, da das Verkehrsangebot für den Fußgängerverkehr unverändert bleibt. Der Grund liegt in der für den Fußgängerverkehr eingeschränkten Qualität des Verkehrsangebotsmodells. Durch im Ohnefall überwiegend niedrige Aufwandsbewertungen einhergehend mit einem hohen Modal-Split-Anteil ergibt sich eine sehr hohe

Verkehrsmittelkonstante, die im Mitfall zu verlagertem Fußgängerverkehr auf Relationen mit hohen Auswahlwahrscheinlichkeiten des Fußgängerverkehrs führen kann (Stadtzentrum, Binnenverkehr der Verkehrsbezirke). Die Lösung dieses Problems liegt in einer detaillierteren Modellierung des Verkehrsangebots des Fußgängerverkehrs und der damit verbundenen kleinräumigeren Einteilung des gesamten Untersuchungsgebietes.<sup>81</sup> Aufgrund des sehr hohen Bearbeitungsaufwands wurde hier darauf verzichtet, wodurch jedoch nicht die Darstellung der Funktionalität des entwickelten Modells beeinträchtigt ist.

Das Gesamtergebnis der Ressourceneinsparung über alle Quelle-Ziel-Gruppen weist ein positives Vorzeichen auf und beträgt 20.402,83 Euro. Den mit Abstand größten Anteil dabei umfassen die Reisezeiteinsparungen beim MIV, während die Erhöhung der Reisekosten des MIV einen hohen negativen Nutzen verursacht. Grund dafür sind zusätzliche und weitere Fahrten. Die positiven Nutzen aller anderen Verkehrsmittel resultieren vor allem aus der Reduzierung der Verkehrsaufkommen wodurch sich die Gesamtausgaben im Mitfall verringern.

Der Vergleich des Ergebnisses des Ersparnisansatzes mit der Änderung der Konsumentenrente zeigt, bezogen auf die Reisezeit und die Reisekosten, eine deutliche Nutzenunterschätzung, wenn der Ersparnisansatz Verwendung findet. Das Ergebnis liegt über 30 % unter der realen monetären Nutzenänderung. Grund hierfür ist der induzierte Neuverkehr, aber auch alle anderen zwischen Zielen und Verkehrsmitteln verlagerten Verkehre, da die Verlagerungen primär zu weiter entfernten und damit teureren Zielen und zu teureren Verkehrsmitteln (MIV) erfolgen. Nur wenn die realen Nutzen der Alternativen (Ziele, Verkehrsmittel), welche die Verkehrsteilnehmer erfahren, zusätzlich quantifiziert werden, liefert der Ersparnisansatz ein adäquates Ergebnis, das der Änderung der Konsumentenrente entspricht (vgl. Kapitel 4.3).

---

<sup>81</sup> Alternativ wäre es auch möglich, den Fußgängerverkehr (ggf. auch den Radverkehr) vor der simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahl abzuspalten. Dies bietet sich bei sehr großen Modellberechnungen, wie beispielsweise im Rahmen der Bundesverkehrswegeplanung, an.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein integriertes Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodell für den privaten Personenverkehr entwickelt, das sowohl eine hochwertige, multimodale Verkehrsnachfragemodellierung als auch eine mikroökonomisch konsistente Nutzenberechnung umfasst. Die große Herausforderung bestand dabei darin, die Anforderungen der Verkehrsplanung und der (Verkehrs-)Ökonomie zu berücksichtigen und die unterschiedlichen Modellansätze im Rahmen der gesteckten Zielsetzung in Einklang zu bringen. Als Resultat liefert das integrierte Modell neben der Verkehrsnachfrage die Änderung der Konsumentenrente als monetäres Äquivalent der Nutzenänderung der Verkehrsteilnehmer, die unmittelbar in die Nutzen-Kosten-Analyse eingeht.

Zur Konkretisierung und Abgrenzung des Untersuchungsgegenstandes wurden in der Einleitung fünf zentrale Fragen formuliert, die im Rahmen der Arbeit in den einzelnen Kapiteln diskutiert und beantwortet wurden. Dabei wurden zunächst die allgemeinen mikroökonomischen Grundlagen und Zusammenhänge der Nachfrage- und Nutzentheorie herausgearbeitet. Diese zeigten, dass die Nachfrage- und Nutzenermittlung stets eine Einheit bilden.

Weiterhin erfolgte die Vorstellung verkehrsplanerischer Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfrageansätze sowie deren Gleichgewichtszustände. Dabei lag der Schwerpunkt der Betrachtungen auf dem EVA-Grundmodell der simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahl und dem Logit-Modell. Das EVA-Grundmodell zeichnet sich insbesondere durch die Abbildung spezifischer nichtlinearer Präferenzen der Verkehrsteilnehmer und der Einhaltung von Randsummenbedingungen aus, womit eine hochwertige Modellierung der Verkehrsnachfrage möglich ist. Das Logit-Modell als Hauptvertreter der Zufallsnutzenmodelle umfasst hingegen keine Randsummenbedingungen, ist jedoch mikroökonomisch abgeleitet.

Für ein integriertes Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodell ist die mikroökonomische Kompatibilität des verwendeten Verkehrsnachfragemodells Voraussetzung. Es wurde daher der Frage nachgegangen, welchen Anforderungen Verkehrsnachfragemodelle dafür genügen müssen. Die zentrale Bedingung stellt die Beachtung des Axioms der Nutzenmaximierung als Entscheidungsgrundlage dar. Darüber hinaus ist die Integrierbarkeit des Verkehrsnachfragemodells von großer praktischer Bedeutung. Das Logit-Modell erfüllt sowohl den Anspruch der Nutzenmaximierung als auch die Integrierbarkeitsbedingung. Der



Logsum-Term, als Integral des Modells, gibt den maximalen Nutzen der Entscheidungssituation an. Mit Hilfe des modellierten Grenznutzens des Einkommens kann die Konsumentenrente als dessen monetäres Pendant gewonnen werden. Die gesuchte Änderung der Konsumentenrente zwischen Mit- und Ohnefall ist folglich mittels der monetarisierten Logsum-Differenz eindeutig bestimmbar. Auf Basis des Logit-Modells ist somit eine mikroökonomisch konsistente integrierte Verkehrsnachfrage- und Nutzenberechnung möglich.

Das EVA-Grundmodell, wie viele andere verkehrsplanerische Modelle auch, ist einerseits nicht mikroökonomisch abgeleitet und andererseits in der gegebenen Form zudem nicht integrierbar. Für nicht integrierbare Verkehrsnachfragemodelle können approximative Verfahren zur Bestimmung der Änderung der Konsumentenrente herangezogen werden, die jedoch per se fehlerbehaftet sind und fallweise deutlich vom exakten Ergebnis abweichen können. Darüber hinaus ist aufgrund des fehlenden mikroökonomischen Modellbezugs nicht bewiesen, dass das Resultat konsistent ist.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen erfolgte die Entwicklung des integrierten Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodells. Dafür wurden zunächst die gewünschten Eigenschaften des EVA-Grundmodells (hohe Abbildegenauigkeit der Verkehrsnachfrage) und des Logit-Modells (mikroökonomische Kompatibilität) kombiniert. Das Resultat stellt das EVA-Logit-Modell dar, das als randsummenbeschränktes (Joint-)Logit-Modell mit Beachtung nichtlinearer Bewertungspräferenzen aufgefasst werden kann.

Die Modellform für die Verkehrsnachfrageberechnung war aufgrund des mikroökonomischen Bezugs und der Integrierbarkeit durch das Logit-Modell vorgegeben. Es waren folglich die gewünschten Spezifika des EVA-Grundmodells in die Nutzenfunktion des Logit-Modells zu implementieren. Zur Einhaltung vorgegebener Randsummenbedingungen wurden dafür sogenannte Pseudo-Potentiale integriert, die den a priori unbekanntem quell-, ziel- und verkehrsmittelspezifischen Nutzen abbilden. Die Werte der Pseudo-Potentiale ergeben sich durch die iterative Lösung des Gleichungssystems zur Bestimmung der Verkehrsströme unter Beachtung der Randsummenbedingungen.

Neben den Pseudo-Potentialen fanden die EVA-spezifischen nichtlinearen Bewertungspräferenzen mittels geeigneter mathematischer Transformationen Eingang in die Nutzenfunktion (EVA-Nutzenfunktion). Durch Umformungen wurde gezeigt, dass das EVA-Logit-Modell faktisch dem EVA-Grundmodell entspricht und eine identische Verkehrsnachfrage liefert. Das EVA-Logit-Modell zeichnet sich jedoch zusätzlich durch seine Integrierbarkeit und mikroökonomische Interpretierbarkeit aus.

Für die Berechnung der Nutzenänderung der Verkehrsteilnehmer mittels der Logsum-Differenz zeigte sich, dass unter Berücksichtigung von Pseudo-Potentialen das Ergebnis fehlerhaft ist. Es wurde daher der Ansatz der Logsum-Differenz weiterentwickelt, der die

Nutzenänderung auch unter Beachtung von Randsummenbedingungen ermittelt. Die Ableitungen wurden sowohl für unelastische als auch elastische Randsummenbedingungen, jeweils mit und ohne Neuverkehr, durchgeführt. Es gilt dabei grundsätzlich zu beachten, dass dieser Ansatz für jedes randsummenbeschränkte Verkehrsnachfragemodell herangezogen werden kann, das auf Basis des Logit-Modells formulierbar ist.

Die modellinterne Nutzenberechnung umfasst neben der Bestimmung des exakten Ergebnisses mittels der korrigierten Logsum-Differenz zusätzlich optional die Ermittlung einer Näherungslösung. Für die dafür verwendeten Verfahren konnte bewiesen werden, dass keine Korrekturberechnungen infolge der Berücksichtigung von Pseudo-Potentialen notwendig sind und die Standardansätze Gültigkeit besitzen. Grund für die zusätzliche Ermittlung der Näherungslösung ist die damit mögliche Zerlegung der Nutzenänderung, die auf Basis der korrigierten Logsum-Differenz kein sinnvolles Ergebnis liefert. Vor dem Hintergrund der praktischen Anwendung und Nachvollziehbarkeit von Projektbewertungen erscheint diese Option hilfreich. Allerdings sollte stets das exakte Ergebnis maßgebend sein.

Die Monetarisierung der Nutzenänderung und damit die Bestimmung der Änderung der Konsumentenrente erfolgt mit Hilfe des Grenznutzens des Einkommens. Dieser wird modellintern auf Basis der Bewertungspräferenzen der Verkehrsteilnehmer bestimmt, wodurch die harmonisierte Bewertung zwischen der Verkehrsnachfrage und der ökonomischen Bewertung gewährleistet ist.

Zur Implementierung der Modellergebnisse in eine Nutzen-Kosten-Analyse sind die Berechnungen für unterschiedliche Zeitabschnitte, entsprechend der Vorgabe der konkreten Richtlinie, durchzuführen. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, ist der zeitscheibenfeine Berechnungsansatz des EVA-Grundmodells, der entsprechend auch im EVA-Logit-Modell gilt, heranzuziehen. Es ergeben sich daraus keine methodischen Änderungen.

Für die praktische Verkehrsplanung und die ökonomische Gesamtbewertung von Verkehrsinvestitionen ist es wichtig, dass der theoretische Ansatz vollständig und konsistent in einem Softwarepaket umgesetzt werden kann. Das Programmpaket VISUM/VISEVA bietet sich hierfür an, da darin alle notwendigen Daten bereits enthalten sind. Es sind lediglich einige zusätzliche Berechnungsverfahren zu implementieren, welche die Bewertungsberechnungen umfassen. Bisher besteht nur die Möglichkeit, auf bestehende Schnittstellen zum Datenexport zurückzugreifen und die entsprechenden Berechnungen extern durchzuführen. Hierauf wurde zum Zweck des praktischen Tests des Modells anhand einer Beispielanwendung zurückgegriffen. Damit konnte neben der generellen Anwendbarkeit des theoretischen Modellansatzes auch die Funktionsfähigkeit hinsichtlich praktischer Anforderungen getestet werden.

---

Neben den zukünftigen Aufgaben der konkreten softwaretechnischen Modellumsetzung stellen sich auch theoretische und methodische Fragen, die nach einer weiteren Betrachtung verlangen. Hierzu zählt vor allem die Erforschung der Präferenzen der Verkehrsteilnehmer, im Besonderen hinsichtlich von Nichtlinearitäten bei den Reisekosten. Ein weiteres wichtiges Forschungsfeld stellt die Abbildung projektbedingter Raumstrukturänderungen dar. Sollten diese zukünftig eindeutig quantifizierbar sein, so wurde gezeigt, dass damit verbundene Nutzenänderungen mit dem hier entwickelten Modell quantifizierbar sind. Außerdem sollte das in dieser Arbeit für den privaten Personenverkehr behandelte Thema auch für den Wirtschaftsverkehr untersucht werden. Durch die Entwicklung eines entsprechenden integrierten Modells für den Wirtschaftsverkehr wäre eine weitere Verbesserung der praktischen Umsetzung der ökonomischen Gesamtbewertung möglich.

## Literaturverzeichnis

- [1] ABAY, G. (1984): Kosten-Nutzen-Analyse für Verkehrsinvestitionen. Dissertation, Rechts- und staatswissenschaftliche Fakultät der Universität Zürich, Zürich
- [2] ABERLE, G. (2003): Transportwirtschaft. 4. Auflage, Verlag Oldenbourg, München
- [3] AHLHEIM, M.; ROSE, M. (1992): Messung individueller Wohlfahrt. 2. Auflage, Verlag Springer, Berlin u. a. O.
- [4] ANAS, A. (1983): Discrete Choice Theory, Information Theory and the Multinomial Logit and Gravity Models. In: Transportation Research Part B, Jg. 17, Heft 1, S. 13-23, Elsevier Ltd.
- [5] ANDERSON, S. P.; PALMA, A. DE; THISSE, J.-F. (1992): Discrete Choice Theory of Product Differentiation. Massachusetts Institute of Technology, The MIT Press, Cambridge (Massachusetts), London (England)
- [6] ARL (2005): Handwörterbuch der Raumordnung. 4. Auflage, Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL), Hannover
- [7] BAMBERG, G.; BAUR, F.; KRAPP, M. (2008): Statistik. 14. Auflage, Verlag Oldenbourg, München
- [8] BATES, J. (2003): Economic Evaluation and Transport Modelling: Theory and Practice. Resource Paper, 10<sup>th</sup> International Conference on Travel Behaviour Research, Luzern
- [9] BATES, J. J. (1987): Measuring travel time values with a discrete choice model: a note. In: The Economic Journal, Jg. 97, Heft 386, S. 493-498, Blackwell Publishing Ltd.
- [10] BATLEY, R. (2008): On Ordinal Utility, Cardinal Utility And Random Utility. In: Theory and Decision, Jg. 64, Heft 1, S. 37-63
- [11] BAUM, H.; ESSER, K.; HÖHNSCHIED, K.-J. (1998): Volkswirtschaftliche Kosten und Nutzen des Verkehrs. Forschungsarbeiten aus dem Strassen- und Verkehrswesen, Heft 108, Verlag Kirschbaum, Bonn
- [12] BECKER, G. S. (1965): A theory of the allocation of time. In: The Economic Journal, Jg. 75, Heft 299, S. 493-517, Blackwell Publishing Ltd.
- [13] BECKER, U.; GERIKE, R.; RAU, A.; ZIMMERMANN, F. (2002): Ermittlung der Kosten und Nutzen von Verkehr in Sachsen. Hauptstudie, Lehrstuhl für Verkehrsökologie der TU Dresden, Dresden
- [14] BEN-AKIVA, M.; LERMAN, S. (1985): Discrete Choice Analysis – Theory and Application to Travel Demand. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (Massachusetts)
- [15] BLAYAC, T. (2006): Value of Travel Time: A Comparison of Several Functional Forms for the Conditional Indirect Utility in Discrete Choice Models. In: Pickhardt, M.; Pons, J. S. (Hrsg.), Perspectives on competition in transport, INFER research perspectives, Vol. 1, Lit Verlag, Berlin u. a. O.

- 
- [16] BLAYAC, T.; CAUSSE, A. (2001): Value of travel time: a theoretical legitimization of some nonlinear representative utility in discrete choice models. In: *Transportation Research Part B*, Jg. 35, Heft 4, S. 391-400, Elsevier Ltd.
- [17] BMJ (1969): Bundeshaushaltsordnung (BHO). zuletzt geändert am 31.07.2009, Bundesministerium der Justiz, Berlin
- [18] BMJ (1969): Gesetz über die Grundsätze des Haushaltsrechts des Bundes und der Länder (Haushaltsgrundsätzegesetz – HGrG). zuletzt geändert am 27.05.2010, Bundesministerium der Justiz, Berlin
- [19] BMVBW (2003): Die gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik – Bundesverkehrswegeplan 2003. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin
- [20] BOBINGER, R. (1996): Optimierung des Verkehrs durch Preissteuerung. Heureka – Optimierung in Verkehr und Transport, Tagungsbericht, S. 61-74, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- [21] BREGMAN, L. M. (1967): Ein Beweis der Konvergenz des Verfahrens von G. W. Sheleikhovski für ein Transportproblem mit Beschränkungen (in Russisch). In: *Shurnal vycisl. mat. I mat. fiz.*, Jg. 7, Heft 1, S. 147-156
- [22] BRILON, W.; DETTE, H. (2001): A Multiplicative Concept for Random Utility. Arbeitsblätter des Lehrstuhls für Verkehrswesen, Nr. 22, Ruhr-Universität Bochum, Bochum
- [23] BRÖCKER, J. (1991): Numerische multiregionale Gleichgewichtsanalyse. Habilitation, Universität Kiel, Kiel
- [24] BVU, IFO, ITP, PLANCO (2001): Verkehrsprognose 2015 für die Bundesverkehrswegeplanung. im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, FE-Nr. 96.578/1999
- [25] CANTILLO, V.; HEYDECKER, B.; ORTÚZAR, J. DE DIOS (2006): A discrete choice model incorporating thresholds for perception in attribute values. In: *Transportation Research Part B*, Jg. 40, Heft 9, S. 807-825, Elsevier Ltd.
- [26] CASCETTA, E. (2001): *Transportation Systems Engineering: Theory and Methods*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- [27] CDT (2009): Benefit Cost Analysis. California Department of Transportation, URL: [http://www.dot.ca.gov/hq/tpp/offices/ote/benefit\\_cost/benefits/induced/index.html](http://www.dot.ca.gov/hq/tpp/offices/ote/benefit_cost/benefits/induced/index.html), aufgerufen am 26.06.2009
- [28] CHERCHI, E.; POLAK, J.; HYMAN, G. (2004): The Impact of Income, Tastes and Substitution Effects on the Assessment of User Benefits using Discrete Choice Models. In: *Proceedings of the European Transport Conference*, Strasbourg
- [29] CHIANG, A. C.; WAINWRIGHT, K. (2005): *Fundamental Methods Of Mathematical Economics*. 4. Auflage, McGraw-Hill Companies Inc., Boston u. a. O.
- [30] COOMBS, C. H.; DAWES, R. M., TVERSKY, A. (1970): *Mathematical Psychology: An Elementary Introduction*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New York
- [31] DALY, A.; HYMAN, G. (2006): The rules of the game. In: *Proceedings of the European Transport Conference*, Strasbourg

- 
- [32] DALY, A.; JONG, G. DE; IBÁÑEZ, N.; BATLEY, R.; BOK, M. DE (2008): Welfare Measures from Discrete Choice Models in the Presence of Income Effect. In: Proceedings of the European Transport Conference, Leeuwenhorst
- [33] DAVID SIMMONDS CONSULTANCY (2002): Appraisal in Land-Use/Transport Interaction: Development Stage 1. Report to Government Office for the North-West, Cambridge
- [34] DEMMLER, H. (2000): Grundlagen der Mikroökonomie. 4. Auflage, Verlag Oldenbourg, München
- [35] DESERPA, A. (1971): A theory of the economics of time. In: The Economic Journal, Jg. 81, Heft 324, S. 828-846, Blackwell Publishing Ltd.
- [36] DFT (2001): Multi-modal transport appraisal investment. Department for Transport, London
- [37] DFT (2007): The NATA Refresh: Reviewing the New Approach to Appraisal. Department for Transport, London
- [38] DFT (2010): Transport Analysis Guidance. Department for Transport, London, WebTAG URL: <http://www.dft.gov.uk/webtag/>, aufgerufen am 17.03.2010
- [39] DIESTEL, R. (2006): Graphentheorie. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin u. a. O.
- [40] DOMENCICH, T. A.; MCFADDEN, D. (1975): Urban Travel Demand. North-Holland Publishing Company, Amsterdam u. a. O.
- [41] DOMSCHKE, W. (1995): Logistik: Transport. 4. Auflage, Verlag Oldenbourg, München
- [42] DUGGE, B. (2006): Ein simultanes Erzeugungs-, Verteilungs-, Aufteilungs- und Routenwahlmodell. Schriftenreihe Heft 9, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden, Dresden
- [43] DUPUIT, J. (1844): De la Mesure de l'Utilité des Travaux Publics. Annales des Ponts et Chaussées, 2. Serie, Vol. 8, zitiert nach der englischen Übersetzung 'On the measurement of the utility of public works', International Economic Papers 2 (1952) wiedergedruckt in: American Economic Association (Hrsg.), Readings in Welfare Economics, S. 255-283, 1969, London
- [44] ECOPLAN, METRON (2005): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr, Kommentar zur VSS-Grundnorm SN 641 820. Ecoplan und Metron im Auftrag der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Bern
- [45] EGGERT, W. (2003): Nachfragemodellierung und -prognose zur Unterstützung der langfristigen Absatzplanung am Beispiel der deutschen Automobilindustrie. Dissertation, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Karlsruhe
- [46] ENGLMANN, F. C.; HAAG, G.; PISCHNER, T. (2001): Berechnung und Bewertung des induzierten Verkehrs im Rahmen der Bundesverkehrswegeplanung. Vortrag, 18. Verkehrswissenschaftliche Tage, TU Dresden, Dresden
- [47] ERLANDER, S.; STEWART, N. F. (1990): The Gravity Model in Transportation Analysis – Theory and Extensions. VSP BV, Utrecht
- [48] FEHL, U.; OBERENDER, P. (2004): Grundlagen der Mikroökonomie. 9. Auflage, Verlag Vahlen, München

- [49] FEST, H. (1971): Zur gesamtwirtschaftlichen Konsistenz des Entscheidungskriteriums für die Auswahl öffentlicher Investitionen – Ein Beitrag zur theoretischen Grundlegung der gesamtwirtschaftlichen Nutzen-Kosten-Analyse. In: Voigt, F. (Hrsg.), Schriftenreihe zur Industrie- und Entwicklungspolitik, Band 6, Verlag Duncker & Humblot, Berlin
- [50] FGSV (1997): Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen – Aktualisierung der RAS-W 86. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln
- [51] FGSV (1997): Kommentar Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen – Aktualisierung der RAS-W 86. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln
- [52] FGSV (2001): Leitfaden für Verkehrsplanungen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln
- [53] FGSV (2005): Hinweise zum induzierten Verkehr. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Köln
- [54] FOSGERAU, M.; HJORTH, K.; LYK-JENSEN, S. V. (2007): The Danish Value of Time Study. Danish Transport Research Institute, Final Report, Report 5, Lyngby
- [55] FRANK, M.; WOLFE, P. (1956): An Algorithm for Quadratic Programming. In: Naval Research Logistics Quarterly, Jg. 3, Heft 1, S. 95-110, Wiley Periodicals, Inc., Chichester u. a. O.
- [56] FRERICH, J. (1974): Die Konsumentenrente. In: Jahrbuch für Sozialwissenschaft, Jg. 25, Heft 3, S. 367-392
- [57] FURNESS, K. P. (1965): Time function iteration. In Traffic Engineering Control. Jg. 7, Heft 7, S. 458-460
- [58] GÁLVEZ, T. E.; JARA-DÍAZ, S. R. (1998): On the social valuation of travel time savings. In: International Journal of Transport Economics, Jg. 25, Heft 2, S. 205-219, Istituti Editoriali e Poligrafici Internazionali
- [59] GEORGESCU-ROEGEN, N. (1958): Thresholds in choice and the theory of demand. In Econometrica, Jg. 26, Heft 1, S. 157-168, Econometric Society
- [60] GOODWIN, P. B. (1974): Generalised Time and the Problem of Equity in Transport Studies. In: Transportation, Jg. 3, Heft 1, S. 1-24, Elsevier Ltd.
- [61] HANEMANN, M. (1984): Discrete/Continuous Models of Consumer Demand. In: Econometrica, Jg. 52, Heft 3, S. 541-561, Blackwell Publishing
- [62] HANUSCH, H. (1994): Nutzen-Kosten-Analyse. 2. Auflage, Verlag Vahlen, München
- [63] HAU, T., D.-K. (1985): A Hicksian Approach to Cost-Benefit Analysis with Discrete-choice Models. In: Economica, Jg. 52, Heft 208, S. 479-490, Blackwell Publishing Ltd.
- [64] HEATCO (2004): Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment. Deliverable 2, State-of-the-art in project assessment
- [65] HEATCO (2006): Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment. URL: <http://heatco.ier.uni-stuttgart.de/>, aufgerufen am 16.03.2010

- [66] HELMS, M. (2001): Bewertungsverfahren für Verkehrsmodelle mit induziertem Verkehr: zur Analyse von Rationalisierungs- und Ausbauszenarien im Straßenpersonenverkehr. Verlag für Wissenschaft und Forschung, Berlin
- [67] HENSHER, D. A. (2001): Travel behaviour research: the leading edge. Verlag Pergamon Press, Oxford
- [68] HENSHER, D. A.; BUTTON, K. J. (2000): Handbook of Transport Modelling. Elsevier, Amsterdam u. a. O.
- [69] HENSHER, D. A.; BUTTON, K. J. (2000): Handbook of Transport Systems and Traffic Control. Elsevier, Amsterdam u. a. O.
- [70] HICKS, J. R. (1943): The Four Consumer's Surpluses. In: The Review of Economic Studies, Jg. 11, Heft 1, S. 31-41, Review of Economic Studies Ltd.
- [71] HIGHWAY CAPACITY MANUAL (1965): In Highway Research Board, Washington D. C.
- [72] HOTELLING, H. (1938): The General Welfare in Relation to Taxation and of Railway and Utility Rates. In Econometrica, Jg. 6, Heft 3, S. 242-269, Blackwell Publishing
- [73] IBÁÑEZ, J. N.; BATLEY, R. (2008): On the integrability conditions for discrete travel choice. In: Proceedings of the European Transport Conference, Leeuwenhorst
- [74] INFRAS (2004): External Costs Of Transport – Update Study. Final Report, Zürich/Karlsruhe
- [75] ITP; VWI (2006): Standardisierte Bewertung von Verkehrsweginvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs und Folgekostenrechnung, Version 2006. ITP Intraplan Consult GmbH, VWI Verkehrswissenschaftliches Institut Stuttgart GmbH, im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, München, Stuttgart
- [76] JARA-DÍAZ, S. R. (2007): Transport Economic Theory. Elsevier Ltd., Amsterdam u. a. O.
- [77] JARA-DÍAZ, S. R.; FARAH, M. (1988): Valuation of users' benefits in transport systems. In: Transport Reviews, Jg. 8, Heft 3, S. 197-218, Routledge
- [78] JARA-DÍAZ, S. R.; VIDELA, J. (1989): Detection of income effect in mode choice: theory and application. In: Transportation Research Part B, Jg. 23, Heft 6, S. 393-400, Elsevier Ltd.
- [79] JONG, G. DE, PIETERS, M.; DALY, A.; GRAAFLAND, I.; KROES, E.; KOOPMANS, C. (2005): Using the Logsum as an Evaluation Measure. Studie für das AVV Transport Research Centre, RAND Europe, Leiden
- [80] KARLSTRÖM, A.; MOREY, E. R. (2001): Calculating the exact Compensating Variation in Logit and Nested-Logit Models with Income Effects: Theory, Intuition, Implementation and Application. Annual Meeting of the American Economic Association, New Orleans
- [81] KÖHLER, U.; WERMUTH, M.; ZÖLLNER, R.; EMIG, J. (2001): Analyse der Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrswesen Heft 804, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen, Bonn



- [82] KOHLI, S.; DALY, A. (2006): The use of logsums in welfare estimation: application in PRISM. In: Proceedings of the European Transport Conference, Strasbourg
- [83] KÖNIG, A.; AXHAUSEN, K. W.; ABAY, G. (2000): Zeitkostensätze im Personenverkehr – Vorstudie. Forschungsauftrag 42/00 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Verkehrsingenieure, IVT ETH Zürich und Abay & Meier Zürich, Zürich
- [84] KÖNIG, A.; AXHAUSEN, K. W.; ABAY, G. (2004): Zeitkostensätze im Personenverkehr – Hauptstudie. Forschungsbericht SVI 2001/534, IVT ETH Zürich und Rapp Trans AG, Zürich
- [85] LANCASTER, K. (1971): Consumer Demand: A New Approach. Columbia University Press, New York
- [86] LITMAN, T. (2009): Generated Traffic and Induced Travel – Implications for Transport Planning. Victoria Transport Policy Institute, URL: <http://www.vtpi.org/gentraf.pdf>, aufgerufen am 22.06.2009
- [87] LOHSE, D. (1977): Berechnung von Personenverkehrsströmen. Sonderschriftenreihe Straßenverkehrswesen Heft 17, VEB Entwurfs- und Ingenieurbüro des Straßenwesens, Berlin
- [88] LOHSE, D. (1997): Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 2: Verkehrsplanung, 2. Auflage, Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin
- [89] LOHSE, D. (2009): Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen – Verkehrsnachfragemodellierung. Noch unveröffentlichte 2. Auflage, Stand 16.03.2009, Lehrstuhl Straßenverkehrstechnik mit Fachbereich Theorie der Verkehrsplanung der TU Dresden, Dresden
- [90] LOHSE, D.; SCHILLER, C.; TEICHERT, H. (2006): Das Verkehrsnachfragemodell EVA – Simultane Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung. In: Straßenverkehrstechnik, Jg.57, Heft 4, S. 181-192, Kirschbaum-Verlag, Bonn
- [91] LOHSE, D.; SCHNEIDER, R. (1997): Vergleichende Untersuchungen der aggregierten und disaggregierten Verkehrsplanungsmodelle. Schriftenreihe Heft 3, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden, Dresden
- [92] LOHSE, D.; TEICHERT, H.; DUGGE, B.; BACHNER, G. (1997): Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen – Verkehrsnachfragemodellierung. Schriftenreihe Heft 5, S. 1-157, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden, Dresden
- [93] LÜTHI, W. (1980): Monetäre Quantifizierung von Zeitgewinnen. Dissertation, Rechts- und Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät der Universität Bern, Bern
- [94] LUH, W.; STADTMÜLLER, K. (2004): Mathematik für Wirtschaftswissenschaftler. 7. Auflage, Verlag Oldenbourg, München
- [95] MÄCKE, P. A.; HÖLSKEN, D. (1967): Generalverkehrsplan Ruhrgebiet – Individualverkehr. Schriftenreihe Siedlungsverband Ruhrkohlenbezirk Nr. 11, Essen
- [96] MÄCKE, P. A.; RUSKE, W. (1968): Straßenverkehrstechnische Untersuchungen für den zweiten Ausbauplan. In: Straße und Autobahn, Jg. 19, Heft 6, S. 201-211, Kirschbaum-Verlag, Bonn

- 
- [97] MACKIE, P. J.; WARMAN, M.; FOWKES, A. S.; WHELAN, G.; NELLTHORP, J.; BATES, J. (2003): Values of Travel Time Savings in the UK. Institute for Transport Studies, University of Leeds in association with John Bates Services, Leeds
- [98] MACKIE, P.; KELLY, C. (2007): Transport Appraisal in other countries: lessons for the NATA Refresh. Bericht für das Department for Transport, Institute for transport Studies, University of Leeds, Leeds
- [99] MACKIE, P.; NELLTHORP, J.; LAIRD, J. (2005): A Framework for the Economic Evaluation of Transport Projects. Transport Note No. TRN-5, In Transport Notes – Economic Evaluation Notes, The World Bank, Washington, D.C.
- [100] MAIER, G.; WEISS, P. (1990): Modelle diskreter Entscheidungen. Springer Verlag, Berlin u. a. O.
- [101] MANSKI, C. F. (1977): The Structure of Random Utility Models. In: Theorie and Decision, Jg. 8, Heft 3, S. 229-254, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht
- [102] MANSKI, C. F.; MCFADDEN, D. (1981): Structural Analysis of Discrete Data with Econometric Applications. Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts
- [103] MARTÍNEZ, F. J.; ARAYA, C. A. (2000): A Note on Trip Benefits in Spatial Interaction Models. In: Journal of Regional Science, Jg. 40, Heft 4, S. 789-796, Wiley-Blackwell
- [104] MCFADDEN, D. (1995): Computing Willingness-to-Pay in Random Utility Models. Department of Economics, University of California, Berkeley
- [105] MCFADDEN, D. (2000): Disaggregate Behavioral Travel Demands RUM Side: A 30-Year Retrospective. Resource Paper Department of Economics, University of California, Berkeley
- [106] MERZIGER, G.; MÜHLBACH, G.; WILLE, D.; WIRTH, T. (1999): Formeln + Hilfen zur höheren Mathematik. 3. Auflage, Binomi Verlag, Springe
- [107] MISHAN, E. J. (1977): The Plain Truth About Consumer Surplus. In: Zeitschrift für Nationalökonomie, Jg. 37, Heft 1, S. 1-24, Springer Verlag
- [108] MOTT MACDONALD (2006): The Transport Users Benefit Appraisal (TUBA) Guidance. im Auftrag des Department for Transport, Croydon
- [109] MÜHLENKAMP, H. (1994): Kosten-Nutzen-Analyse. 1. Auflage, Verlag Oldenbourg, München
- [110] NELLTHORP, J.; HYMAN, G. (2001): Alternatives to the Rule of a Half in Matrix-Based Appraisal. In: Proceedings of the European Transport Conference, Cambridge
- [111] NEUBURGER, H. (1971): User Benefit In The Evaluation Of Transport And Land Use Plans. In Journal of Transport Economics and Policy, Jg. 5, Heft 1, S. 52-75, London School of Economics and Political Science (LSE), University of Bath
- [112] NEUBURGER, H.; WILCOX, J. (1976): The Economic Appraisal of Land-Use Plans. In: Journal of Transport Economics and Policy, Jg. 10, Heft 3, S. 227-236
- [113] NUNES, L. C.; CUNHA-E-SÁ, M.; DUCLA-SOARES, M. (1998): Testing for rationality: the case of discrete choice data. In: Economics Letters, Jg. 60, Heft 3, S. 255-261, Elsevier Ltd.

- [114] OPPENHEIM, N. (1995): Urban Travel Demand Modeling. Verlag John Wiley & Sons Ltd., Chichester u. a. O.
- [115] ORTÚZAR, J.DE D.; WILLUMSEN, L.G. (2004): Modelling Transport. 3. Auflage, Verlag John Wiley & Sons Ltd., Chichester u. a. O.
- [116] PALMA, A. DE; KILANI, K. (2003): (Un)Conditional Distribution of Compensating Variation in Discrete Choice Models. Working Paper, Université de Cergy-Pontoise, URL: [www.core.ucl.ac.be/services/psfiles/dp03/dp2003-100.pdf](http://www.core.ucl.ac.be/services/psfiles/dp03/dp2003-100.pdf), aufgerufen am 14.01.2008
- [117] PAULUBEN, U. (1992): Möglichkeiten und Grenzen der monetären Bewertung von projektbedingten Reisezeitersparnissen im nichtgewerblichen Personenverkehr und deren Berücksichtigung bei der Planung von Verkehrswegen. Dissertation, Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Fakultät der Universität zu Köln, Köln
- [118] POPP, D. (2005): Beleg „Datenverarbeitungssysteme der Verkehrsplanung“ – Zwickau. Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden, Dresden
- [119] PTV (2008): Programmsystem VISEVA, PTV AG, Karlsruhe
- [120] PTV (2009): VISUM – Benutzerhandbuch. Version 11.00, Karlsruhe
- [121] PTV (2010): Programmsystem VISUM, PTV AG, Karlsruhe
- [122] RAMMING, M. S. (2002): Network knowledge and route choice. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge
- [123] SCHILLER, C. (2004): Integration des ruhenden Verkehrs in die Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung. Schriftenreihe Heft 8, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden, Dresden
- [124] SCHILLER, C. (2007): Erweiterung der Verkehrsnachfragemodellierung um Aspekte der Raum- und Infrastruktur. Schriftenreihe Heft 10, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden, Dresden
- [125] SCHNABEL, W. (1997): Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Band 1: Straßenverkehrstechnik, 2. Auflage, Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin
- [126] SCHNABEL, W.; LOHSE, D. (1980): Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. TRANSPRESS Berlin, Berlin
- [127] SHANNON, C. E. (1948): A Mathematical Theory of Communication. In: The Bell System Technical Journal, Jg. 27, S. 379-423, 623-656, Juli, Oktober, American Telephone and Telegraph Company, New York
- [128] SHEFFI, Y.; POWELL, W. B. (1982): An Algorithm for the Equilibrium Assignment Problem with Random Link Times. In: Networks, Jg. 12, Heft 2, S. 191-207, John Wiley & Sons, Inc., Chichester u. a. O.
- [129] SHIRES, J. D.; DE JONG, G. C. (2006): An international meta-analysis of value of time. Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (HEATCO), Anhang A
- [130] SLOVIC, P.; FISCHOFF, B.; LICHTENSTEIN, S. (1977): Behavioral Decision Theory. In: Annual Review of Psychology, Jg. 28, S. 1-39, Annual Reviews

- [131] SMALL, K. A.; ROSEN, H. S. (1981): Applied Welfare Economics with Discrete Choice Models. In: *Econometrica*, Jg. 49, Heft 1, S. 105-130, Blackwell Publishing
- [132] SMOCK, R. J. (1962): An iterative assignment approach to capacity restraint on arterial networks. In: *Highway Research Board Bulletin* 156, S. 1-13, Washington D. C.
- [133] STASA, SSP, IVR (2000): Induzierter Verkehr – Verfahrensanpassung, Anwendungsfälle und Zuschlagfaktoren. im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesens, FE-Nr. 96.573/99
- [134] STATISTISCHES LANDESAMT DES FREISTAATES SACHSEN (2010): Gemeindestatistik 2010 für Zwickau, Stadt. URL: [http://www.statistik.sachsen.de/23/02\\_\\_info.asp](http://www.statistik.sachsen.de/23/02__info.asp), aufgerufen am 13.10.2010
- [135] STEIERWALD, G.; KÜNNE, H. D.; VOGT, W. (2005): Stadtverkehrsplanung. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin u. a. O.
- [136] SUNTUM, U. VAN (1986): Konsumentenrente und Verkehrssektor – Der soziale Überschuß als Basis für öffentliche Allokationsentscheidungen. *Quaestiones Oeconomicae*, Band 8, Verlag Duncker & Humblot, Berlin
- [137] SVENSON, O. (1979): Process Descriptions of Decision Making. In: *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, Jg. 23, Heft 1, S. 86-112, Elsevier Ltd.
- [138] TAK, H. VAN DER; RAY, A. (1971): The Economic Benefits of Road Transport Projects. *World Bank staff occasional papers*, Nr. 13, International Bank for Reconstruction and Development Washington, Johns Hopkins Press, Baltimore
- [139] TANNER, J. C. (1961): Factors Affecting the Amount of Travel. Technical Paper No. 51, Road Research Laboratory, Crowthorne, H. M. S. O.
- [140] TEUBEL, U. (1997): Wirkung von Straßenbenutzungsabgaben auf die Wohlfahrt von Berufspendlern – eine empirische Analyse –. Diskussionsbeitrag Nr. 2/97, Institut für Wirtschaft und Verkehr der TU Dresden, Dresden
- [141] THURSTONE, L. L. (1927): A Law of Comparative Judgement. In: *Psychological Review*, Jg. 34, Heft 4, S. 273-286, American Psychological Association
- [142] TRAIN, K. E. (1986): Qualitative Choice Analysis. Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts
- [143] TRAIN, K. E. (2003): *Discrete Choice Methods with Simulation*. Cambridge University Press, Cambridge
- [144] TRAIN, K. E.; MCFADDEN, D. (1978): The goods/leisure tradeoff and disaggregate work trip mode choice models. In: *Transportation Research*, Jg. 12, Heft 5, S. 349-353, Elsevier Ltd.
- [145] TRUONG, T. P.; HENSHER, D. A. (1985): Measurement of travel time values and opportunity cost from a discrete-choice model. In: *The Economic Journal*, Jg. 95, Heft 378, S. 438-451, Blackwell Publishing Ltd.
- [146] VARIAN, H. R. (1990): *Intermediate Microeconomics – A Modern Approach*. 2. Auflage, W. W. Norton & Company, New York u. a. O.
- [147] VARIAN, H. R. (1994): *Mikroökonomie*. 3. Auflage, Verlag Oldenbourg, München

- 
- [148] VARIAN, H. R. (2003): Grundzüge der Mikroökonomik. 6. Auflage, Verlag Oldenbourg, München
- [149] VRTIC, M. (2003): Simultanes Routen- und Verkehrsmittelwahlmodell. Dissertation, TU Dresden, Dresden
- [150] VSS (2005): Norm SN 641 820, Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr, Grundnorm. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich
- [151] VSS (2009): Norm 641 822 a, Zeitkosten im Personenverkehr. Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich
- [152] WALTHER, K. (1991): Maßnahmenreagibler Modal-Split für den städtischen Personenverkehr. Veröffentlichungen des Verkehrswissenschaftlichen Institutes der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Heft 45, Aachen
- [153] WARDROP, J. G. (1952): Some theoretical aspects of road traffic research. In: Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Heft Road Paper No. 36, S. 325-378, Institute of Civil Engineers, London
- [154] WEGENER, M.; FÜRST, F. (1999): Land-Use Transport Interaction: State of the Art. Institut für Raumplanung der Universität Dortmund, Dortmund
- [155] WILLIAMS, H. C. W. L. (1976): Travel Demand Models, Duality Relations and User Benefit Analysis. In Journal of Regional Science, Jg. 16, Heft 2, S. 147–166, Blackwell Publishing
- [156] WILLIAMS, H. C. W. L. (1977): On the formation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit. In: Environment and Planning A, Jg. 9, Heft 3, S. 285-344, Pion Ltd.
- [157] WILLIG, R. D. (1976): Consumer's Surplus Without Apology. In: American Economic Review, Jg. 66, Heft 4, S. 589-597, American Economic Association
- [158] Wilson, A. G. (1967): A Statistical Theory Of Spatial Distribution Models. In: Transportation Research, Jg. 1, Heft 3, S. 253-269, Elsevier Ltd.
- [159] WILSON, A. G. (1970): Entropy in Urban and Regional Modelling. Pion Ltd., London
- [160] WINKLER, C. (2006): Untersuchungen zu Verfahren einer gesamtwirtschaftlichen Bewertung der (Bundes)Verkehrsplanung. Diplomarbeit, TU Dresden, Dresden
- [161] WITTWER, R. (2008): Raumstrukturelle Einflüsse auf das Verkehrsverhalten – Nutzbarkeit der Ergebnisse großräumiger und lokaler Haushaltsbefragungen für makroskopische Verkehrsplanungsmodelle. Schriftenreihe Heft 11, Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr der TU Dresden, Dresden
- [162] ZÖLLIG, C.; AXHAUSEN, K. W. (2010): How to model the gains from infrastructure investment? Arbeitsbericht Verkehrs- und Raumplanung, 617, IVT, ETH Zürich, Zürich

# Anhang

**Anhang A Einfaches Kennwertmodell für den  
Personenverkehr**

QZG- Typ	Heimatverkehrs- aufkommen <b>H</b>	Quellverkehrs- aufkommen <b>Q, Q<sup>min</sup>, Q<sup>max</sup></b>	Gesamtverkehrs- aufkommen <b>V</b>	Zielverkehrs- aufkommen <b>Z, Z<sup>min</sup>, Z<sup>max</sup></b>
Typ 1	<p><b>1. Schritt: Produktion</b></p> $HP_{eP} = SV_{eP} \cdot BP_{eP} \cdot u_{eP}$ $H_e = \sum_P SV_{eP} \cdot BP_{eP} \cdot u_{eP}$	<p><b>2. Schritt: wie Produktion</b></p> $Q_i = Q_i^{min} = Q_i^{max} = H_i$	<p><b>3. Schritt:</b></p> $V = \sum_i Q_i$ $fK = \frac{V}{\sum_l \sum_s ER_{lS} \cdot SZ_{lS} \cdot v_{lS}}$	<p><b>4. Schritt: Attraktion</b></p> <p><i>unelastische Randsummen:</i></p> <p>mit <math>Z_j = Z_j^{min} = Z_j^{max}</math></p> $Z_j = fK \cdot \sum_s ER_{jS} \cdot SZ_{jS} \cdot v_{jS}$ <p><i>elastische Randsummen:</i></p> $Z_j \leq Z_j^{max} = \sum_s ER_{jS}^{max} \cdot SZ_{jS} \cdot v_{jS}$ $Z_j \geq Z_j^{min} = \sum_s ER_{jS}^{min} \cdot SZ_{jS} \cdot v_{jS}$
Typ 2	<p><b>1. Schritt: Produktion</b></p> $HP_{eP} = SV_{eP} \cdot BP_{eP} \cdot u_{eP}$ $H_e = \sum_P SV_{eP} \cdot BP_{eP} \cdot u_{eP}$	<p><b>4. Schritt: Attraktion</b></p> <p><i>unelastische Randsummen:</i></p> <p>mit <math>Q_i = Q_i^{min} = Q_i^{max}</math></p> $Q_i = fK \cdot \sum_s ER_{iS} \cdot SQ_{iS} \cdot v_{iS}$ <p><i>elastische Randsummen:</i></p> $Q_i \leq Q_i^{max} = \sum_s ER_{iS}^{max} \cdot SQ_{iS} \cdot v_{iS}$ $Q_i \geq Q_i^{min} = \sum_s ER_{iS}^{min} \cdot SQ_{iS} \cdot v_{iS}$	<p><b>3. Schritt:</b></p> $V = \sum_j Z_j$ $fK = \frac{V}{\sum_l \sum_s ER_{lS} \cdot SQ_{lS} \cdot v_{lS}}$	<p><b>2. Schritt: wie Produktion</b></p> $Z_j = Z_j^{min} = Z_j^{max} = H_j$

QZG-Typ	Heimatverkehrs-aufkommen H	Quellverkehrs-aufkommen $Q, Q^{\min}, Q^{\max}$	Gesamtverkehrs-aufkommen V	Zielverkehrs-aufkommen $Z, Z^{\min}, Z^{\max}$
Typ 3	<p><b>1. Schritt: Produktion</b></p> $HP_{eP} = SV_{eP} \cdot BP_{eP} \cdot u_{eP}$ $H_e = \sum_P SV_{eP} \cdot BP_{eP} \cdot u_{eP}$	<p><b>3. Schritt: Attraktion</b></p> <p>mit <math>Q_i = Q_i^{\min} = Q_i^{\max}</math></p> $Q_i = \frac{\sum_S ER_{iS} \cdot SQ_{iS} \cdot v_{iS}}{\sum_l \sum_S ER_{lS} \cdot SQ_{lS} \cdot v_{lS}} \cdot V$ $\cdot \left[ 1 - \frac{\sum_l \Delta Q_l^*}{V} \right] + \Delta Q_i^* \Leftarrow (RSA)$ <p>mit</p> $\Delta Q_i^* = \max \{ 0; GZ_j^* - GQ_i^* \}$ $\Delta Z_j^* = \max \{ 0; GQ_i^* - GZ_j^* \}$ <p>und</p> $GQ_i^* = \sum_h Q_{ih} \quad \text{und} \quad GZ_j^* = \sum_h Z_{jh}$	<p><b>2. Schritt:</b></p> $V = \sum_e H_e$	<p><b>3. Schritt: Attraktion</b></p> <p>mit <math>Z_j = Z_j^{\min} = Z_j^{\max}</math></p> $Z_j = \frac{\sum_S ER_{jS} \cdot SZ_{jS} \cdot v_{jS}}{\sum_l \sum_S ER_{lS} \cdot SZ_{lS} \cdot v_{lS}} \cdot V$ $\cdot \left[ 1 - \frac{\sum_l \Delta Z_l^*}{V} \right] + \Delta Z_j^* \Leftarrow (RSA)$ <p>mit</p> $\Delta Q_i^* = \max \{ 0; GZ_j^* - GQ_i^* \}$ $\Delta Z_j^* = \max \{ 0; GQ_i^* - GZ_j^* \}$ <p>und</p> $GQ_i^* = \sum_h Q_{ih} \quad \text{und} \quad GZ_j^* = \sum_h Z_{jh}$

Abbildung A-1: Einfaches Kennwertmodell für den Personenverkehr (Quelle: LOHSE ET AL. [92] S. 27 und SCHILLER [124] S. 73 ff.)



BP	Bezugspersonen der jeweiligen Quelle-Ziel-Gruppe (z. B.: Berufstätige in der QZG W-A, Schüler in QZG W-B)
ER	Erzeugungsrate (Attraktionsrate) der maßgebenden Strukturgrößen SQ bzw. SZ pro Zeiteinheit in der betrachteten Quelle-Ziel-Gruppe
$ER^{\min}/ER^{\max}$	min./max. Erzeugungsrate der maßgebenden Strukturgrößen SQ bzw. SZ pro Zeiteinheit in der betrachteten Quelle-Ziel-Gruppe; kann auch als Funktion in Abhängigkeit von Überlastungsfaktoren definiert werden
HP	Heimatverkehrsaufkommen (Erwartungswert) der Bezugspersonengruppe P
P	Index der maßgebenden Personengruppen, die im Verkehrserzeugungsansatz verwendet werden
Q	Quellverkehrsaufkommen (Erwartungswert)
$Q^{\min}/Q^{\max}$	min./max. mögliches Quellverkehrsaufkommen
S	Index der maßgebenden Strukturgrößen, die im Verkehrserzeugungsansatz verwendet werden
SQ	maßgebende Strukturgröße der Quelle-Ziel-Gruppe zur Verkehrserzeugung des Quellverkehrs
SV	spezifisches Verkehrsaufkommen (Produktionsrate) der Bezugspersonen BP pro Zeiteinheit in der betrachteten Quelle-Ziel-Gruppe
SZ	maßgebende Strukturgröße der Quelle-Ziel-Gruppe zur Verkehrserzeugung des Zielverkehrs
V	Gesamtverkehrsaufkommen
Z	Zielverkehrsaufkommen (Erwartungswert)
$Z^{\min}/Z^{\max}$	min./max. mögliches Zielverkehrsaufkommen
e	Index eines Verkehrsbezirkes als Verursacher der Ortsveränderung
fK	Faktor, der die Einhaltung der Gesamtsummenbedingung $V = \sum_i Q_i = \sum_j Z_j$ bei der Berechnung der Verkehrsaufkommen der Verkehrsbezirke berücksichtigt
h	Index über alle Quelle-Ziel-Gruppen vom Typ 1 und 2
i	Index eines Verkehrsbezirkes als Quelle der Ortsveränderungen
j	Index eines Verkehrsbezirkes als Ziel der Ortsveränderungen
l	Laufindex für einen Verkehrsbezirk allgemein gilt: $e = 1 \dots l \dots m$ $i = 1 \dots l \dots m$ $j = 1 \dots l \dots n$ (Bedingung: $m = n$ )
m, n	Anzahl der Verkehrsbezirke in einem Untersuchungsgebiet
u	Anteil der im Untersuchungsgebiet als Binnen-Quell-Verkehr realisierten Ortsveränderungen
v	Anteil der im Untersuchungsgebiet als Binnen-Ziel-Verkehr realisierten Ortsveränderungen
$\Delta Q_i^*$ ; $\Delta Z_j^*$	Hilfsgrößen für den Randsummenausgleich
$GQ_i$ , $GZ_j$	Gesamtverkehrsaufkommen der QZG-Typen 1 und 2
RSA	Randsummenausgleich

## Anhang B Ableitung des Logit-Modells

Das Logit-Modell lässt sich unter der Annahme unabhängig und identisch Gumbelverteilter Störterme, deren spezieller Eigenschaften und dem Prinzip der Zufallsnutzenmaximierung ableiten. Die Gumbel-Verteilung weist eine leicht rechtsschiefe Form der Dichtefunktion auf, welche jedoch Ähnlichkeit mit der Normalverteilung hat. Sie lautet (vgl. z. B. MAIER/WEISS [100] S. 73):

$$f(\varepsilon) = \mu \cdot e^{-\mu \cdot (\varepsilon - \eta)} \cdot \exp\left(-e^{-\mu \cdot (\varepsilon - \eta)}\right) \quad \mu > 0. \quad (\text{B.1})$$

Demzufolge ist die dazugehörige Verteilungsfunktion:

$$\text{Prob}(X \leq \varepsilon) = F(\varepsilon) = \int_{-\infty}^{\varepsilon} f(\varepsilon) d\varepsilon = \exp\left(-e^{-\mu \cdot (\varepsilon - \eta)}\right) \quad \mu > 0. \quad (\text{B.2})$$

$\mu$	Skalierungsparameter
$\eta$	Lageparameter

Folgende wichtige Eigenschaften sind für die Ableitung des Logit-Modells wichtig (vgl. BEN-AKIVA/LERMAN [14] S. 104 f.):

- der Modus ist  $\eta$ ,
- der Erwartungswert ist  $\eta + \gamma/\mu$ , mit  $\gamma$  als EULER'sche Konstante ( $\sim 0,577$ ),
- die Varianz ist  $\pi^2/6 \mu^2$ ,
- ist  $\varepsilon$  mit den Parametern  $\eta$  und  $\mu$  Gumbel-verteilt, dann ist  $\alpha \cdot \varepsilon + V$ , mit  $V$  und  $\alpha > 0$  als beliebige Konstanten, ebenfalls Gumbel-verteilt mit den Parametern  $(\alpha \cdot \eta + V, \mu / \alpha)$ , somit bleibt die Verteilung bei linearen Transformationen unverändert, d. h. die Verteilung ist translationsinvariant,
- sind  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_2$  unabhängig Gumbel-vertelte Zufallsvariablen mit **identischen** Skalierungsparametern, d. h. die Parameter lauten  $(\eta_1, \mu)$  bzw.  $(\eta_2, \mu)$ , dann
  - ist ihre Differenz  $\varepsilon^* = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$  logistisch verteilt und die Verteilungsfunktion lautet: 
$$F(\varepsilon^*) = \frac{1}{1 + e^{\mu \cdot (\eta_1 - \eta_2 - \varepsilon^*)}}, \quad (\text{B.3})$$
  - ist ihr Maximum, d. h.  $\max(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ , wiederum eine Gumbel-vertelte Zufallsvariable mit den Parametern  $\left(\frac{1}{\mu} \cdot \ln(e^{\mu \cdot \eta_1} + e^{\mu \cdot \eta_2}), \mu\right)$ ,
- aus der letzten Eigenschaft ergibt sich folglich: wenn gilt:  $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_B)$  sind  $B$  unabhängig Gumbel-vertelte Zufallsvariablen mit **identischen** Skalierungsparametern, mit den Parametern  $(\eta_1, \mu), (\eta_2, \mu), \dots, (\eta_B, \mu)$ , dann ist deren Maximum, d. h.  $\max(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_B)$  ebenfalls Gumbel-verteilt mit den Parametern:  $\left(\frac{1}{\mu} \cdot \ln \sum_{b'=1}^B e^{\mu \cdot \eta_{b'}}, \mu\right)$ .

Die genannten Eigenschaften der Gumbel-Verteilung ermöglichen bzw. erleichtern die Ableitung des Logit-Modells wesentlich. Die folgende Ableitung des Logit-Modells basiert auf der expliziten Ausnutzung dieser Eigenschaften. Eine alternative (allgemeinere) Ableitungsform direkt aus der Dichtefunktion findet sich beispielsweise in STEIERWALD ET AL. [135] S. 270 ff. Auch dieser Ableitung liegt die Annahme der Zufallsvariablen als unabhängig und identisch verteilte Größe zugrunde, die zur Ableitung einer geschlossenen analytischen Form zur Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeiten unabdingbar ist.

Für die hier vorgestellte Ableitung (nach BEN-AKIVA/LERMAN [14] S. 106) sei zunächst angenommen, dass die Auswahlwahrscheinlichkeit für Alternative 1 gesucht wird. Die Bedingung für die entsprechende Auswahlwahrscheinlichkeit lautet:

$$P_{1n} = Pr\ ob\left(\bar{u}_{1n} + \varepsilon_{1n} \geq \max_{b'=2,\dots,B_n} (\bar{u}_{b'n} + \varepsilon_{b'n})\right). \quad (B.4)$$

Die Lageparameter der Verteilungen bzw. der Werte können als alternativenspezifische Konstanten in der deterministischen Nutzenkomponente berücksichtigt werden, weshalb alle Lageparameter Null gesetzt werden können. Es folgt, dass das Maximum in (B.4)

$u_n^{max} = \max_{b'=2,\dots,B_n} (\bar{u}_{b'n} + \varepsilon_{b'n})$  eine mit den Parametern:

$$\left(\bar{u}_n^{max}, \mu\right) \text{ mit } \bar{u}_n^{max} = \frac{1}{\mu} \cdot \ln \sum_{b'=2}^{B_n} e^{\mu \cdot \bar{u}_{b'n}}$$

Gumbel-verteilte Zufallsgröße ist. Hierdurch kann (B.4) zur Bestimmung der Auswahlwahrscheinlichkeit als Differenz zweier Gumbel verteilter Zufallsgrößen geschrieben werden:

$$\begin{aligned} P_{1n} &= Pr\ ob\left(\bar{u}_{1n} + \varepsilon_{1n} \geq \bar{u}_n^{max} + \varepsilon_n^{max}\right) \\ P_{1n} &= Pr\ ob\left(\varepsilon_n^* \leq \bar{u}_{1n} - \bar{u}_n^{max}\right) \end{aligned} \quad (B.5)$$

Da die Differenz logistisch verteilt ist ergibt sich:

$$\begin{aligned} P_{1n} &= \frac{1}{1 + e^{\mu \cdot (\bar{u}_n^{max} - \bar{u}_{1n})}} = \frac{e^{\mu \cdot \bar{u}_{1n}}}{e^{\mu \cdot \bar{u}_{1n}} + e^{\mu \cdot \bar{u}_n^{max}}} \\ &= \frac{e^{\mu \cdot \bar{u}_{1n}}}{e^{\mu \cdot \bar{u}_{1n}} + \exp\left(\ln \sum_{b'=2}^{B_n} e^{\mu \cdot \bar{u}_{b'n}}\right)} = \frac{e^{\mu \cdot \bar{u}_{1n}}}{\sum_{b'=1}^{B_n} e^{\mu \cdot \bar{u}_{b'n}}}. \end{aligned} \quad (B.6)$$

Wird der Index 1 durch  $b$  ersetzt, so ergibt sich das bekannte multinomiale Logit-Modell:

$$P_{bn} = \frac{e^{\mu \cdot \bar{u}_{bn}}}{\sum_{b'=1}^B e^{\mu \cdot \bar{u}_{b'n}}}. \quad (\text{B.7})$$

Jeder Term der Gleichung enthält den Skalierungsparameter  $\mu$ , der jedoch nicht identifizierbar ist. Er muss allerdings für die eindeutige Parameterschätzung der deterministischen Nutzenkomponente fixiert werden, weshalb  $\mu$  i. d. R. auf den Wert Eins gesetzt wird.

## Anhang C EVA-Grundmodell als universales Logit-Modell

Die ursprünglichen bzw. wahren Auswahlwahrscheinlichkeiten müssen den Axiomen der Wahrscheinlichkeit  $0 \leq P_{bn} \leq 1$  und  $\sum_{b'} P_{b'n} = 1$  genügen und sind nicht negativ, daher kann die Variable  $\omega_{bn} = \ln(P_{bn})$  definiert werden (vgl. MAIER/WEISS [100] S. 224 f.). Hieraus folgt:

$$P_{bn} = e^{\omega_{bn}}. \quad (\text{C.1})$$

Definitionsgemäß ist die Summe der Auswahlwahrscheinlichkeiten stets Eins, weshalb (C.1) durch diese Summe dividiert werden kann. Es ergibt sich:

$$P_{bn} = \frac{P_{bn}}{\sum_{b'} P_{b'n}} = \frac{e^{\omega_{bn}}}{\sum_{b'} e^{\omega_{b'n}}}. \quad (\text{C.2})$$

Das universale Logit-Modell stellt im Gegensatz zum „echten“ Logit-Modell somit lediglich ein formales Konstrukt dar. Unter diesen Umständen sind auch Modelle, wie beispielsweise das EVA-Grundmodell auf Basis der BAYES'schen Axiomatik<sup>82</sup>, mit Randsummenbedingungen als universales Logit-Modell formulierbar. Für das EVA-Grundmodell der simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahl mit unelastischen Randsummenbedingungen wird definiert:

$$\omega_{ijk} = \ln \left( \frac{\frac{Q_i}{V} \cdot \frac{Z_j}{V} \cdot \frac{A_k}{V} \cdot q_i \cdot z_j \cdot a_k \cdot B_{ijk}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} \frac{Q_{i'}}{V} \cdot \frac{Z_{j'}}{V} \cdot \frac{A_{k'}}{V} \cdot q_{i'} \cdot z_{j'} \cdot a_{k'} \cdot B_{i'j'k'}} \right). \quad (\text{C.3})$$

Somit ergibt sich der Verkehrsstrom  $v_{ijk}$ :

$$\begin{aligned} v_{ijk} &= P_{ijk} \cdot V = \frac{e^{\omega_{ijk}}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} e^{\omega_{i'j'k'}}} \cdot V \\ &= \frac{\frac{Q_i}{V} \cdot \frac{Z_j}{V} \cdot \frac{A_k}{V} \cdot q_i \cdot z_j \cdot a_k \cdot B_{ijk}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} \frac{Q_{i'}}{V} \cdot \frac{Z_{j'}}{V} \cdot \frac{A_{k'}}{V} \cdot q_{i'} \cdot z_{j'} \cdot a_{k'} \cdot B_{i'j'k'}} \cdot V \end{aligned} \quad (\text{C.4})$$

<sup>82</sup> Im Rahmen dieser Ableitung des EVA-Grundmodells werden Auswahlwahrscheinlichkeiten, die die Axiome der Wahrscheinlichkeit erfüllen, explizit bestimmt.

Gleichung (C.4) entspricht damit Gleichung (3.25). Durch mathematische Umstellungen ergibt sich das tri-lineare EVA-Grundmodell in Kurzschreibweise entsprechend (3.10).

Bei der Ableitung des EVA-Grundmodells mittels Informationsgewinnminimierung (siehe Kapitel 3.2.2.1.3) werden keine Auswahlwahrscheinlichkeiten explizit bestimmt. Sie ergeben sich jedoch aus der Lösung und genügen ebenfalls den Axiomen der Wahrscheinlichkeit. Es gilt:

$$P_{ijk} = \frac{v_{ijk}}{V} = \frac{fq_i \cdot fz_j \cdot fa_k \cdot B_{ijk}}{V}. \quad (\text{C.5})$$

Mit  $\omega_{ijk} = \ln \left( \frac{fq_i \cdot fz_j \cdot fa_k \cdot B_{ijk}}{V} \right)$  ergibt sich:

$$P_{ijk} = \frac{e^{\ln \left( \frac{fq_i \cdot fz_j \cdot fa_k \cdot B_{ijk}}{V} \right)}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} e^{\ln \left( \frac{fq_{i'} \cdot fz_{j'} \cdot fa_{k'} \cdot B_{i'j'k'}}{V} \right)}}. \quad (\text{C.6})$$

Wird  $V$  ersetzt durch  $\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} fq_{i'} \cdot fz_{j'} \cdot fa_{k'} \cdot B_{i'j'k'}$  resultiert:

$$P_{ijk} = \frac{fq_i \cdot fz_j \cdot fa_k \cdot B_{ijk}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} fq_{i'} \cdot fz_{j'} \cdot fa_{k'} \cdot B_{i'j'k'}}. \quad (\text{C.7})$$

Der Verkehrsstrom  $v_{ijk}$  wird bestimmt durch:

$$v_{ijk} = \frac{fq_i \cdot fz_j \cdot fa_k \cdot B_{ijk}}{\sum_{i'} \sum_{j'} \sum_{k'} fq_{i'} \cdot fz_{j'} \cdot fa_{k'} \cdot B_{i'j'k'}} \cdot V. \quad (\text{C.8})$$

Die wahren Auswahlwahrscheinlichkeiten  $P_{ijk}$  ergeben sich durch die Lösung des tri-linearen EVA-Grundmodells unter Einhaltung der Randsummenbedingungen und genügen den Axiomen der Wahrscheinlichkeit.

---

<sup>83</sup> Das tri-lineare EVA-Grundmodell in Kurzschreibweise entsprechend Gleichung (3.10) ergibt sich durch Kürzung des Nenners mit  $V$ .

## Anhang D Verkehrsstrombasierte Berechnung der Nutzenänderung mit Pseudo-Potentialen

Die verkehrsstrombasierte Nutzenberechnung ist durch folgenden Zusammenhang möglich:

$$Q_{ic} = \sum_j \sum_k v_{ijkc}, \quad Z_{jc} = \sum_i \sum_k v_{ijkc}. \quad (\text{D.1})$$

Damit kann der allgemeine Ansatz (5.81) geschrieben werden:

$$\begin{aligned} \Delta E(\Phi_c^*) &= \ln \left( \frac{V_c^M}{V_c^O} \right) \cdot \left( \frac{V_c^O + V_c^M}{2} \right) + \sum_i \left( \frac{\sum_j \sum_k (v_{ijkc}^O + v_{ijkc}^M)}{2} \right) \cdot (\theta_{ic}^O - \theta_{ic}^M) \\ &\quad + \sum_j \left( \frac{\sum_i \sum_k (v_{ijkc}^O + v_{ijkc}^M)}{2} \right) \cdot (\tau_{ic}^O - \tau_{ic}^M). \end{aligned} \quad (\text{D.2})$$

Durch Umstellen ergibt sich der vereinfachte Ausdruck:

$$\Delta E(\Phi_c^*) = \ln \left( \frac{V_c^M}{V_c^O} \right) \cdot \left( \frac{V_c^O + V_c^M}{2} \right) + \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k (v_{ijkc}^O + v_{ijkc}^M) \cdot (\theta_{ic}^O + \tau_{ic}^O - \theta_{ic}^M - \tau_{ic}^M), \quad (\text{D.3})$$

der unter Verwendung des aggregierten, relationsspezifischen Ausdrucks  $pp_{ijc}$  geschrieben werden kann:

$$\Delta E(\Phi_c^*) = \ln \left( \frac{V_c^M}{V_c^O} \right) \cdot \left( \frac{V_c^O + V_c^M}{2} \right) + \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k (v_{ijkc}^O + v_{ijkc}^M) \cdot (pp_{ijc}^O - pp_{ijc}^M). \quad (\text{D.4})$$

Weiterhin kann mit  $V_c = \sum_i \sum_j \sum_k v_{ijkc}$  der mittels der korrigierten Logsum-Differenz berechnete Nutzen **formal** proportional auf die Verkehrsströme aufgeteilt werden, woraus:

$$\begin{aligned} \Delta E(\Phi_c^*) &= \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \ln \left( \frac{V_c^M}{V_c^O} \right) \cdot (v_{ijkc}^O + v_{ijkc}^M) \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k (v_{ijkc}^O + v_{ijkc}^M) \cdot (pp_{ijc}^O - pp_{ijc}^M) \end{aligned} \quad (\text{D.5})$$

resultiert. Das kann schließlich zusammengefasst werden zu:

$$\Delta E(\Phi_c^*) = \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k (v_{ijkc}^O + v_{ijkc}^M) \cdot \ln \left( \frac{V_c^M}{V_c^O} \right) \cdot (pp_{ijc}^O - pp_{ijc}^M). \quad (\text{D.6})$$

Es ist dabei zu beachten, dass der Nutzen des Neuverkehrs in Abhängigkeit der Größe der Verkehrsströme auf die jeweiligen Relationen verteilt wird und es dadurch zu relationspezifischen falschen Nutzenzuweisungen kommen kann. Für den Fall ohne Neuverkehr, d. h.  $V_c^O = V_c^M$ , gilt:

$$\Delta E\left(\Phi_c^*\right) = \frac{1}{2} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \left( v_{ijkc}^O + v_{ijkc}^M \right) \cdot \left( pp_{ijc}^O - pp_{ijc}^M \right). \quad (\text{D.7})$$



## Anhang E Verkehrsaufkommen und Modal-Split des Ohne- und Mitfalls je Quelle-Ziel-Gruppe und Verkehrsmittel

	Ohnefall					Mitfall					absolute Änderung (Mitfall - Ohnefall)				
	Fuß	Rad	ÖPV	MIV	gesamt	Fuß	Rad	ÖPV	MIV	gesamt	Fuß	Rad	ÖPV	MIV	gesamt
QZG 1	10676,89	4722,48	3856,21	38221,20	57476,78	10701,59	4709,80	3835,00	38230,39	57476,78	24,70	-12,68	-21,21	9,19	0,00
QZG 2	1707,24	748,61	116,96	2652,65	5225,46	1698,11	744,26	115,94	2667,15	5225,46	-9,13	-4,35	-1,02	14,50	0,00
QZG 3	6559,33	1494,16	5479,96	3835,75	17369,20	6562,31	1494,71	5457,02	3855,16	17369,20	2,98	0,55	-22,94	19,41	0,00
QZG 4	25312,21	6010,37	3099,88	32374,64	66797,10	25305,04	5961,96	3045,79	32484,31	66797,10	-7,17	-48,41	-54,09	109,67	0,00
QZG 5	24429,51	8941,26	3920,11	30876,54	68167,42	24510,26	8893,37	3865,57	31183,67	68452,87	80,75	-47,89	-54,54	307,13	285,45
QZG 6	8092,34	3769,20	2726,62	28767,19	43355,35	8099,78	3759,78	2711,32	28784,47	43355,35	7,44	-9,42	-15,30	17,28	0,00
QZG 7	1484,43	375,80	73,71	2148,46	4082,40	1477,14	373,53	72,96	2158,77	4082,40	-7,29	-2,27	-0,75	10,31	0,00
QZG 8	5949,37	1302,66	5032,51	2705,24	14989,78	5951,87	1302,84	5017,81	2717,26	14989,78	2,50	0,18	-14,70	12,02	0,00
QZG 9	26415,63	6161,39	3369,68	35132,37	71079,07	26428,93	6112,09	3308,96	35229,09	71079,07	13,30	-49,30	-60,72	96,72	0,00
QZG 10	25944,92	9538,88	4207,26	38067,69	77758,75	26026,01	9489,88	4148,36	38379,95	78044,20	81,09	-49,00	-58,90	312,26	285,45
QZG 11	1626,21	204,93	189,02	3959,02	5979,18	1623,07	203,07	187,59	3965,45	5979,18	-3,14	-1,86	-1,43	6,43	0,00
QZG 12	3325,74	788,73	958,89	9567,92	14641,28	3325,49	783,34	950,54	9581,91	14641,28	-0,25	-5,39	-8,35	13,99	0,00
QZG 13	18171,56	4527,84	4589,40	35740,30	63029,10	18183,75	4479,12	4507,80	35858,43	63029,10	12,19	-48,72	-81,60	118,13	0,00
Σ	159695,38	48586,31	37620,21	264048,97	509950,87	159893,35	48307,75	37224,66	265096,01	510521,77	197,97	-278,56	-395,55	1047,04	570,90

	Modal-Split (Ohnefall)					Modal-Split (Mitfall)					Modal-Split-Änderung (Mitfall - Ohnefall)				
	Fuß	Rad	ÖPV	MIV	gesamt	Fuß	Rad	ÖPV	MIV	gesamt	Fuß	Rad	ÖPV	MIV	gesamt
QZG 1	18,58%	8,22%	6,71%	66,50%	100,00%	18,62%	8,19%	6,67%	66,51%	100,00%	0,04%	-0,02%	-0,04%	0,02%	0,00%
QZG 2	32,67%	14,33%	2,24%	50,76%	100,00%	32,50%	14,24%	2,22%	51,04%	100,00%	-0,17%	-0,08%	-0,02%	0,28%	0,00%
QZG 3	37,76%	8,60%	31,55%	22,08%	100,00%	37,78%	8,61%	31,42%	22,20%	100,00%	0,02%	0,00%	-0,13%	0,11%	0,00%
QZG 4	37,89%	9,00%	4,64%	48,47%	100,00%	37,88%	8,93%	4,56%	48,63%	100,00%	-0,01%	-0,07%	-0,08%	0,16%	0,00%
QZG 5	35,84%	13,12%	5,75%	45,30%	100,00%	35,81%	12,99%	5,65%	45,55%	100,00%	-0,03%	-0,12%	-0,10%	0,26%	0,00%
QZG 6	18,67%	8,69%	6,29%	66,35%	100,00%	18,68%	8,67%	6,25%	66,39%	100,00%	0,02%	-0,02%	-0,04%	0,04%	0,00%
QZG 7	36,36%	9,21%	1,81%	52,63%	100,00%	36,18%	9,15%	1,79%	52,88%	100,00%	-0,18%	-0,06%	-0,02%	0,25%	0,00%
QZG 8	39,69%	8,69%	33,57%	18,05%	100,00%	39,71%	8,69%	33,47%	18,13%	100,00%	0,02%	0,00%	-0,10%	0,08%	0,00%
QZG 9	37,16%	8,67%	4,74%	49,43%	100,00%	37,18%	8,60%	4,66%	49,56%	100,00%	0,02%	-0,07%	-0,09%	0,14%	0,00%
QZG 10	33,37%	12,27%	5,41%	48,96%	100,00%	33,35%	12,16%	5,32%	49,18%	100,00%	-0,02%	-0,11%	-0,10%	0,22%	0,00%
QZG 11	27,20%	3,43%	3,16%	66,21%	100,00%	27,15%	3,40%	3,14%	66,32%	100,00%	-0,05%	-0,03%	-0,02%	0,11%	0,00%
QZG 12	22,71%	5,39%	6,55%	65,35%	100,00%	22,71%	5,35%	6,49%	65,44%	100,00%	0,00%	-0,04%	-0,06%	0,10%	0,00%
QZG 13	28,83%	7,18%	7,28%	56,70%	100,00%	28,85%	7,11%	7,15%	56,89%	100,00%	0,02%	-0,08%	-0,13%	0,19%	0,00%

## Anhang F Nutzenänderungsergebnisse auf Basis der korrigierten Logsum-Differenz

Quelle-Ziel-Gruppe 1														
VBZ-	Ohnefall				Mitfall				Nutzen					
	$\theta_i$	$\tau_j$	$Q_i$	$Z_j$	$\theta_i$	$\tau_j$	$Q_i$	$Z_j$	$(Q_i^O+Q_i^M)/2$	$\Delta\theta_i$	$(Q_i^O+Q_i^M)/2*\Delta\theta_i$	$(Z_j^O+Z_j^M)/2$	$\Delta\tau_j$	$(Z_j^O+Z_j^M)/2*\Delta\tau_j$
Nr.	[Util]	[Util]	[OV]	[OV]	[Util]	[Util]	[OV]	[OV]	[OV]	[Util]	[Util]	[OV]	[Util]	[Util]
6	4,8584	3,4306	3589,78	1575,93	4,8603	3,4279	3585,10	1570,55	3587,44	-0,0019	-6,7130	1573,24	0,0027	4,2750
7	4,5660	2,5980	2420,54	675,40	4,5682	2,5948	2417,56	673,08	2419,05	-0,0022	-5,2630	674,24	0,0032	2,1646
8	4,9149	4,2975	3013,57	2204,31	4,9188	4,2993	3010,48	2200,12	3012,03	-0,0039	-11,6599	2202,22	-0,0018	-4,0666
9	2,9788	2,5040	312,96	224,76	2,9811	2,5079	312,83	224,62	312,90	-0,0023	-0,7293	224,69	-0,0039	-0,8778
10	3,8781	2,9173	1001,75	494,79	3,8821	2,9199	1000,73	493,97	1001,24	-0,0040	-3,9953	494,38	-0,0026	-1,2825
11	4,0357	3,4765	1101,84	674,35	4,0408	3,4849	1101,42	674,12	1101,63	-0,0051	-5,6419	674,24	-0,0084	-5,6348
12	1,7538	0,6502	116,86	44,97	1,7562	0,6579	116,80	44,93	116,83	-0,0024	-0,2770	44,95	-0,0077	-0,3450
13	3,4189	3,6855	1036,14	1485,31	3,4230	3,6879	1036,00	1484,94	1036,07	-0,0041	-4,2335	1485,13	-0,0025	-3,6874
14	2,7991	4,2837	300,49	1348,48	2,7956	4,2776	300,38	1348,28	300,44	0,0036	1,0705	1348,38	0,0061	8,2864
16	3,2365	3,5371	693,31	1124,86	3,2364	3,5339	692,65	1123,71	692,98	0,0001	0,0635	1124,29	0,0031	3,5368
18	3,3077	2,9638	1673,73	1761,33	3,3139	2,9651	1682,56	1770,76	1678,15	-0,0062	-10,3970	1766,05	-0,0013	-2,2986
19	2,7563	4,0688	283,85	943,93	2,7501	4,0617	283,65	943,65	283,75	0,0062	1,7699	943,79	0,0070	6,6300
21	1,9724	2,7667	146,12	269,69	1,9710	2,7586	146,00	269,63	146,06	0,0014	0,2101	269,66	0,0081	2,1903
22	4,0769	4,8836	1528,57	2922,70	4,0757	4,8786	1527,12	2922,03	1527,85	0,0012	1,8486	2922,37	0,0051	14,8181
23	4,1878	4,7567	1871,19	2878,32	4,1895	4,7533	1869,60	2878,44	1870,40	-0,0017	-3,2431	2878,38	0,0035	10,0340
24	1,4385	3,2366	79,30	449,47	1,4373	3,2330	79,26	449,40	79,28	0,0012	0,0962	449,44	0,0036	1,6238
25	4,5844	4,1950	3166,46	2611,42	4,5864	4,1918	3165,55	2610,41	3166,01	-0,0021	-6,4907	2610,92	0,0031	8,2116
26	4,8667	5,2712	2679,91	3686,07	4,8647	5,2665	2678,23	3685,05	2679,07	0,0020	5,3625	3685,56	0,0047	17,1525
27	2,7105	4,6920	354,84	2698,14	2,7119	4,6908	354,72	2697,42	354,78	-0,0014	-0,5020	2697,78	0,0012	3,2181
28	1,9437	2,2775	372,20	586,17	1,9475	2,2790	373,08	587,52	372,64	-0,0037	-1,3940	586,85	-0,0014	-0,8265
29	3,8263	3,3155	2240,58	1757,77	3,8296	3,3153	2243,37	1759,72	2241,98	-0,0033	-7,3733	1758,75	0,0003	0,4603
30	4,1040	3,1899	3244,00	1848,48	4,1069	3,1892	3247,68	1850,61	3245,84	-0,0030	-9,5781	1849,55	0,0007	1,3035
31	3,8622	2,9011	2928,79	1761,04	3,8681	2,9022	2943,15	1769,63	2935,97	-0,0059	-17,2342	1765,34	-0,0010	-1,8415
32	4,8374	3,6596	4010,49	1350,07	4,8380	3,6584	4006,08	1348,83	4008,29	-0,0006	-2,5678	1349,45	0,0013	1,7149
33	4,0092	4,7926	1394,95	3193,90	4,0106	4,7912	1393,74	3191,77	1394,35	-0,0014	-1,9004	3192,84	0,0013	4,2667
34	2,5646	3,3436	225,37	449,43	2,5543	3,3223	225,26	449,35	225,32	0,0102	2,3072	449,39	0,0213	9,5712
35	3,4540	4,3790	659,66	1393,44	3,4535	4,3704	659,12	1393,16	659,39	0,0005	0,3436	1393,30	0,0086	11,9939
36	2,6834	3,9624	300,60	854,03	2,6809	3,9479	300,35	853,91	300,48	0,0025	0,7606	853,97	0,0144	12,3235
37	4,0731	5,0322	1085,41	2292,28	4,0694	5,0155	1084,63	2292,17	1085,02	0,0037	4,0432	2292,23	0,0167	38,3829
38	2,1457	2,8162	133,57	224,71	2,1426	2,7964	133,50	224,70	133,54	0,0031	0,4133	224,71	0,0198	4,4511
39	1,4776	1,1619	66,77	44,94	1,4734	1,1530	66,75	44,95	66,76	0,0043	0,2849	44,95	0,0089	0,4020
40	2,5809	2,0377	200,28	134,85	2,5728	2,0278	200,21	134,77	200,25	0,0082	1,6367	134,81	0,0099	1,3324
41	5,4735	4,9427	3228,00	2202,38	5,4472	4,9284	3227,15	2201,81	3227,58	0,0263	84,9640	2202,10	0,0143	31,5642
44	4,3852	3,8569	1460,76	899,03	4,3931	3,8711	1459,91	898,60	1460,34	-0,0079	-11,5222	898,82	-0,0142	-12,7486
55	4,5187	3,8643	1251,96	764,20	4,3865	3,7927	1251,44	763,87	1251,70	0,1322	165,4395	764,04	0,0715	54,6431
56	4,0228	4,0803	836,23	866,44	3,9845	4,0292	835,95	866,35	836,09	0,0383	32,0541	866,40	0,0511	44,3084
57	2,7576	2,8669	233,68	241,77	2,7277	2,8158	233,61	241,76	233,65	0,0299	6,9795	241,77	0,0510	12,3409
58	4,6179	4,4901	1039,75	1078,61	4,5754	4,4626	1039,51	1078,32	1039,63	0,0425	44,1378	1078,47	0,0274	29,5924
59	4,6525	4,1595	68,53	67,53	4,6601	4,1752	68,44	67,41	68,49	-0,0076	-0,5215	67,47	-0,0157	-1,0588
60	3,5874	3,5224	446,47	462,91	3,4810	3,4558	446,33	462,80	446,40	0,1064	47,4965	462,86	0,0665	30,7936
61	4,1269	4,3103	906,51	939,30	4,1210	4,2865	906,15	939,44	906,33	0,0059	5,3574	939,37	0,0238	22,3375
62	4,1715	4,3225	836,27	866,42	4,1687	4,3051	836,05	866,54	836,16	0,0028	2,3490	866,48	0,0174	15,1113
63	6,9087	6,8621	188,02	194,52	6,9116	6,8624	188,30	194,98	188,16	-0,0028	-0,5353	194,75	-0,0003	-0,0534
64	5,2035	5,0192	52,82	56,95	5,2118	5,0245	53,41	57,53	53,12	-0,0083	-0,4433	57,24	-0,0053	-0,3050
65	3,8102	3,7231	494,84	513,23	3,7733	3,6868	494,71	513,08	494,78	0,0370	18,2959	513,16	0,0364	18,6609
66	4,8360	4,7185	1275,89	1322,17	4,7782	4,6785	1275,47	1321,64	1275,68	0,0578	73,7049	1321,91	0,0400	52,9404
67	2,5406	2,5419	196,13	204,06	2,5434	2,5443	196,08	204,03	196,11	-0,0027	-0,5386	204,05	-0,0025	-0,5033
68	2,5111	2,5153	196,14	204,06	2,5151	2,5183	196,08	204,03	196,11	-0,0040	-0,7841	204,05	-0,0031	-0,6274
69	3,9395	3,9659	836,29	866,55	3,9404	3,9684	836,07	866,51	836,18	-0,0009	-0,7516	866,53	-0,0026	-2,2150
70	2,6751	2,7571	201,12	209,42	2,6661	2,7497	201,08	209,43	201,10	0,0089	1,7988	209,43	0,0074	1,5531
71	4,1653	4,2591	932,19	966,18	4,1576	4,2495	931,96	966,21	932,08	0,0077	7,2002	966,20	0,0095	9,2269
72	2,7455	2,8489	239,54	248,08	2,7363	2,8387	239,46	248,09	239,50	0,0091	2,1899	248,09	0,0102	2,5264
74	2,5002	2,7100	134,37	139,31	2,4995	2,6864	134,34	139,35	134,36	0,0007	0,0901	139,33	0,0236	3,2910
75	3,5653	3,6448	34,27	36,90	3,5681	3,6444	34,23	36,90	34,25	-0,0028	-0,0954	36,90	0,0004	0,0153
76	4,1611	4,0641	51,14	55,24	4,1678	4,0689	51,66	55,87	51,40	-0,0067	-0,3428	55,56	-0,0048	-0,2683
77	4,4746	5,2883	102,00	106,18	4,4829	5,2881	101,80	106,05	101,90	-0,0083	-0,8470	106,12	0,0002	0,0179
										$\Sigma$			$\Sigma$	458,63

$\Delta E(\Phi^*)$	<b>855,32</b>	[Util]
--------------------	---------------	--------



Quelle-Ziel-Gruppe 3														
VBZ-Nr.	Ohnefall				Mitfall				Nutzen					
	$\theta_i$ [Util]	$\tau_j$ [Util]	$Q_i$ [OV]	$Z_j$ [OV]	$\theta_i$ [Util]	$\tau_j$ [Util]	$Q_i$ [OV]	$Z_j$ [OV]	$(Q_i^O+Q_i^M)/2$ [OV]	$\Delta\theta_i$ [Util]	$(Q_i^O+Q_i^M)/2*\Delta\theta_i$ [Util]	$(Z_j^O+Z_j^M)/2$ [OV]	$\Delta\tau_j$ [Util]	$(Z_j^O+Z_j^M)/2*\Delta\tau_j$ [Util]
6	3,0670	5,1499	1074,65	2003,82	3,0551	5,1670	1079,13	2019,64	1076,89	0,0118	12,7400	2011,73	-0,0171	-34,3870
7	2,6873	3,6189	717,50	412,05	2,6775	3,6359	720,76	415,42	719,13	0,0098	7,0560	413,74	-0,0170	-7,0352
8	4,0998	4,8001	1015,18	985,31	4,0937	4,8121	1019,31	990,86	1017,25	0,0061	6,2014	988,09	-0,0120	-11,8894
9	3,1464	0,0000	98,28	0,00	3,1438	0,0000	98,73	0,00	98,51	0,0026	0,2576	0,00	0,0000	0,0000
10	3,1732	2,8092	295,71	121,47	3,1687	2,8208	296,91	122,09	296,31	0,0045	1,3311	121,78	-0,0117	-1,4205
11	3,9170	3,0198	369,35	121,37	3,9229	3,0216	368,75	121,08	369,05	-0,0059	-2,1664	121,23	-0,0018	-0,2220
12	0,9638	0,0000	35,21	0,00	0,9756	0,0000	35,15	0,00	35,18	-0,0119	-0,4172	0,00	0,0000	0,0000
13	1,9757	4,4562	344,95	1142,46	1,9731	4,4606	343,98	1140,96	344,47	0,0026	0,8945	1141,71	-0,0044	-5,0309
14	3,6167	0,0000	78,97	0,00	3,6061	0,0000	78,95	0,00	78,96	0,0106	0,8354	0,00	0,0000	0,0000
16	3,3996	3,0147	261,88	666,16	3,4011	3,0057	261,42	661,62	261,65	-0,0015	-0,3960	663,89	0,0090	5,9580
18	1,6516	2,4669	355,50	328,75	1,6503	2,4640	354,13	327,42	354,82	0,0013	0,4458	328,09	0,0030	0,9697
19	3,5324	0,0000	85,37	0,00	3,5242	0,0000	85,46	0,00	85,42	0,0082	0,7033	0,00	0,0000	0,0000
21	2,7232	0,0000	48,91	0,00	2,7183	0,0000	48,78	0,00	48,85	0,0049	0,2411	0,00	0,0000	0,0000
22	3,7533	5,4235	501,05	1213,86	3,7497	5,4225	499,06	1210,08	500,06	0,0036	1,8019	1211,97	0,0010	1,2152
23	3,3454	4,1646	468,10	625,14	3,3430	4,1617	466,42	622,43	467,26	0,0024	1,1322	623,79	0,0029	1,8038
24	1,9838	0,0000	27,67	0,00	1,9763	0,0000	27,67	0,00	27,67	0,0074	0,2057	0,00	0,0000	0,0000
25	3,5926	4,5812	845,75	1440,04	3,5894	4,5835	844,87	1439,12	845,31	0,0032	2,6695	1439,58	-0,0023	-3,2685
26	5,1257	4,3850	762,70	299,93	5,1221	4,3888	763,60	299,86	763,15	0,0036	2,7443	299,90	-0,0037	-1,1203
27	1,9279	4,0647	76,93	285,43	1,9212	4,0705	77,11	285,82	77,02	0,0067	0,5146	285,63	-0,0058	-1,6469
28	0,1154	3,5531	74,23	738,72	0,1113	3,5527	73,97	736,66	74,10	0,0041	0,3068	737,69	0,0005	0,3411
29	2,4924	0,0000	481,81	0,00	2,4906	0,0000	480,58	0,00	481,20	0,0017	0,8269	0,00	0,0000	0,0000
30	2,9724	1,8301	896,55	214,39	2,9716	1,8307	894,92	213,95	895,74	0,0008	0,6885	214,17	-0,0007	-0,1459
31	2,6416	3,5463	719,37	1239,53	2,6399	3,5433	716,69	1234,38	718,03	0,0017	1,2216	1236,96	0,0030	3,7327
32	5,2171	1,0678	1295,23	121,83	5,2199	1,0582	1293,43	120,98	1294,33	-0,0028	-3,5866	121,41	0,0096	1,1633
33	5,1241	0,0000	492,79	0,00	5,1261	0,0000	492,84	0,00	492,82	-0,0020	-0,9930	0,00	0,0000	0,0000
34	4,3783	0,0000	78,87	0,00	4,3607	0,0000	78,92	0,00	78,90	0,0176	1,3921	0,00	0,0000	0,0000
35	4,0510	3,4053	185,46	128,61	4,0495	3,4046	185,10	128,04	185,28	0,0014	0,2631	128,33	0,0007	0,0910
36	3,1477	0,0000	98,93	0,00	3,1449	0,0000	98,71	0,00	98,82	0,0029	0,2846	0,00	0,0000	0,0000
37	4,6727	4,1287	356,96	228,57	4,6698	4,1255	356,15	227,53	356,56	0,0030	1,0526	228,05	0,0032	0,7319
38	3,8523	0,0000	40,07	0,00	3,8506	0,0000	40,05	0,00	40,06	0,0016	0,0652	0,00	0,0000	0,0000
39	2,2729	0,0000	20,07	0,00	2,2672	0,0000	20,09	0,00	20,08	0,0058	0,1157	0,00	0,0000	0,0000
40	2,9495	0,0000	79,37	0,00	2,9462	0,0000	79,75	0,00	79,56	0,0034	0,2667	0,00	0,0000	0,0000
41	6,4730	6,8372	1175,21	1830,34	6,4610	6,8173	1175,63	1829,94	1175,42	0,0120	14,0478	1830,14	0,0199	36,4948
44	5,4601	4,8844	644,01	461,96	5,4692	4,8879	643,09	460,69	643,55	-0,0091	-5,8835	461,33	-0,0035	-1,6185
55	4,3680	2,6339	564,14	71,41	4,3700	2,6188	562,86	71,22	563,50	-0,0020	-1,1467	71,32	0,0151	1,0741
56	5,9717	5,8945	242,84	242,02	5,7891	5,7781	243,37	242,24	243,11	0,1826	44,3956	242,13	0,1163	28,1695
57	4,7506	4,6677	67,57	68,35	4,6703	4,6074	67,71	68,39	67,64	0,0803	5,4318	68,37	0,0602	4,1174
58	6,2830	6,4325	301,90	301,76	6,2541	6,3729	302,58	302,22	302,24	0,0289	8,7381	301,99	0,0596	18,0080
59	1,3103	1,4397	23,89	17,87	1,3254	1,4480	23,82	17,81	23,86	-0,0151	-0,3593	17,84	-0,0083	-0,1472
60	5,1958	5,2423	130,28	129,56	5,1435	5,1666	130,49	129,70	130,39	0,0524	6,8280	129,63	0,0756	9,8057
61	5,1041	4,9495	264,01	263,22	5,1024	4,9481	263,77	262,41	263,89	0,0017	0,4438	262,82	0,0014	0,3554
62	6,3368	6,2183	242,70	242,08	6,3359	6,2278	243,11	242,13	242,91	0,0009	0,2216	242,11	-0,0095	-2,2975
63	5,1248	5,5308	56,51	54,94	5,1210	5,5331	56,41	54,90	56,46	0,0037	0,2096	54,92	-0,0023	-0,1264
64	5,8249	5,0134	20,06	17,11	5,8239	5,0160	19,96	17,10	20,01	0,0010	0,0203	17,11	-0,0026	-0,0446
65	5,5130	5,6912	144,12	144,51	5,4834	5,6420	144,47	144,77	144,30	0,0296	4,2701	144,64	0,0492	7,1157
66	6,5178	6,6728	371,01	370,18	6,4845	6,6238	371,89	370,83	371,45	0,0333	12,3772	370,51	0,0490	18,1517
67	2,8269	3,1526	56,57	57,08	2,8198	3,1540	56,53	57,08	56,55	0,0071	0,4029	57,08	-0,0014	-0,0807
68	2,7923	3,1217	56,56	57,07	2,7863	3,1238	56,53	57,08	56,55	0,0060	0,3374	57,08	-0,0021	-0,1180
69	4,7639	5,0851	243,60	242,25	4,7600	5,0914	243,89	242,49	243,75	0,0038	0,9368	242,37	-0,0062	-1,5136
70	4,7393	4,7501	57,59	58,37	4,7109	4,7556	57,75	58,45	57,67	0,0283	1,6343	58,41	-0,0055	-0,3240
71	6,2196	6,1970	270,38	270,50	6,1973	6,1957	271,10	270,84	270,74	0,0223	6,0409	270,67	0,0013	0,3581
72	3,6113	3,4581	70,23	70,62	3,6031	3,4622	70,32	70,67	70,28	0,0082	0,5762	70,65	-0,0040	-0,2847
74	4,7641	4,5953	40,02	38,45	4,7691	4,5953	40,08	38,45	40,05	-0,0050	-0,2006	38,45	-0,0001	-0,0025
75	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,00	0,0000	0,0000
76	1,8584	1,6458	11,30	12,11	1,8541	1,6411	11,28	12,04	11,29	0,0043	0,0487	12,08	0,0047	0,0573
77	3,2064	3,4141	31,30	29,98	3,2058	3,4125	31,23	29,85	31,27	0,0005	0,0165	29,92	0,0016	0,0467
									$\Sigma$		138,09		$\Sigma$	67,04

$\Delta E(\Phi^*_3)$	205,12	[Util]
----------------------	--------	--------

Quelle-Ziel-Gruppe 4														
VBZ-Nr.	Ohnefall				Mitfall				Nutzen					
	$\theta_i$	$\tau_j$	$Q_i$	$Z_j$	$\theta_i$	$\tau_j$	$Q_i$	$Z_j$	$(Q_i^O+Q_i^M)/2$	$\Delta\theta_i$	$(Q_i^O+Q_i^M)/2*\Delta\theta_i$	$(Z_j^O+Z_j^M)/2$	$\Delta\tau_j$	$(Z_j^O+Z_j^M)/2*\Delta\tau_j$
	[Util]	[Util]	[OV]	[OV]	[Util]	[Util]	[OV]	[OV]	[OV]	[Util]	[Util]	[OV]	[Util]	[Util]
6	5,1182	3,8941	3974,47	2184,93	5,1199	3,8924	3974,66	2181,22	3974,57	-0,0016	-6,5197	2183,08	0,0017	3,7852
7	4,9809	3,2621	2687,63	1152,01	4,9831	3,2603	2688,17	1150,04	2687,90	-0,0022	-6,0154	1151,03	0,0018	2,1085
8	5,3552	5,0785	3343,43	2593,70	5,3567	5,0827	3343,27	2590,19	3343,35	-0,0015	-5,0015	2591,95	-0,0043	-11,0200
9	3,9157	4,6360	346,08	435,22	3,9192	4,6205	346,15	420,26	346,12	-0,0035	-1,1964	427,74	0,0155	6,6404
10	4,2779	3,9682	1108,31	696,94	4,2760	3,9746	1108,20	696,04	1108,26	0,0019	2,1577	696,49	-0,0064	-4,4567
11	4,7846	4,9823	1220,94	778,61	4,7874	5,0043	1221,02	778,25	1220,98	-0,0028	-3,3656	778,43	-0,0220	-17,1354
12	2,3904	4,6681	126,29	760,62	2,3885	4,6923	126,29	760,14	126,29	0,0019	0,2387	760,38	-0,0242	-18,3635
13	3,6883	4,1488	1147,60	1193,79	3,6885	4,1530	1147,66	1192,93	1147,63	-0,0001	-0,1352	1193,36	-0,0042	-5,0324
14	3,6798	5,5547	332,09	981,43	3,6774	5,5390	332,13	972,44	332,11	0,0024	0,7952	976,94	0,0156	15,2587
16	3,1405	4,1701	767,42	1054,26	3,1426	4,1673	767,10	1053,33	767,26	-0,0021	-1,5830	1053,80	0,0027	2,8937
18	3,5043	3,1222	1852,37	1840,97	3,5084	3,1176	1853,15	1839,96	1852,76	-0,0041	-7,6325	1840,47	0,0046	8,4215
19	3,3915	5,2922	304,19	649,51	3,3921	5,2765	304,09	649,10	304,14	-0,0006	-0,1738	649,31	0,0156	10,1523
21	2,2347	5,3999	163,84	714,44	2,2399	5,3843	163,74	717,95	163,79	-0,0051	-0,8434	716,20	0,0156	11,1718
22	3,7072	6,9964	1699,89	5424,10	3,7138	6,9842	1698,40	5423,00	1699,15	-0,0066	-11,2351	5423,55	0,0121	65,8462
23	3,8469	6,7554	2074,43	5426,30	3,8547	6,7478	2072,67	5424,96	2073,55	-0,0078	-16,1153	5425,63	0,0075	40,9284
24	2,1658	4,9363	88,88	462,09	2,1646	4,9207	88,89	457,99	88,89	0,0012	0,1105	460,04	0,0156	7,1700
25	4,4352	5,5083	3515,09	4718,14	4,4395	5,5033	3514,62	4715,40	3514,86	-0,0043	-15,1694	4716,77	0,0050	23,4957
26	5,5383	6,8330	2971,75	3551,34	5,5396	6,8173	2971,03	3537,22	2971,39	-0,0013	-3,9701	3544,28	0,0156	55,4269
27	3,1258	6,2474	393,14	3483,67	3,1269	6,2469	393,09	3482,01	393,12	-0,0010	-0,4058	3482,84	0,0005	1,5882
28	2,0199	2,7131	412,52	699,05	2,0217	2,7120	412,62	698,60	412,57	-0,0017	-0,7147	698,83	0,0011	0,7880
29	3,9157	4,0087	2483,98	2329,67	3,9178	4,0066	2484,20	2328,25	2484,09	-0,0021	-5,3317	2328,96	0,0020	4,7104
30	3,9157	3,3069	3600,27	1471,10	3,9186	3,3038	3600,29	1470,21	3600,28	-0,0029	-10,4696	1470,66	0,0032	4,6782
31	3,9520	2,8659	3244,27	1472,35	3,9576	2,8616	3244,81	1471,54	3244,54	-0,0057	-18,3669	1471,95	0,0043	6,3722
32	4,9492	4,8196	4448,31	2414,37	4,9502	4,8190	4447,21	2412,09	4447,76	-0,0010	-4,4198	2413,23	0,0006	1,4937
33	4,3312	5,2257	1543,46	2290,30	4,3330	5,2248	1543,22	2288,26	1543,34	-0,0018	-2,7017	2289,28	0,0008	1,8957
34	3,4053	4,9363	247,92	391,57	3,3979	4,9207	247,94	402,33	247,93	0,0073	1,8219	396,95	0,0156	6,1805
35	3,8165	5,9688	730,23	1330,86	3,8223	5,9532	729,79	1330,34	730,01	-0,0058	-4,2097	1330,60	0,0156	20,7521
36	3,3917	5,7198	332,25	930,97	3,3934	5,7042	332,14	939,52	332,20	-0,0017	-0,5702	935,25	0,0156	14,5646
37	4,8404	6,2349	1202,54	1366,55	4,8410	6,2193	1202,27	1390,04	1202,41	-0,0007	-0,8143	1378,30	0,0156	21,5285
38	3,0071	4,8664	149,71	301,66	3,0061	4,8508	149,70	307,75	149,71	0,0011	0,1602	304,71	0,0156	4,7514
39	2,4128	4,7713	72,50	255,85	2,4101	4,7556	72,52	257,34	72,51	0,0027	0,1950	256,60	0,0156	4,0153
40	3,5818	4,6378	219,80	379,48	3,5690	4,6222	219,86	371,70	219,83	0,0128	2,8186	375,59	0,0156	5,8627
41	6,9714	6,7499	5601,18	2715,70	6,9228	6,7343	5602,87	2661,70	5602,03	0,0486	272,3168	2688,70	0,0156	41,8792
44	5,4882	6,0484	2191,57	1984,76	5,4941	6,0503	2191,56	1916,68	2191,57	-0,0058	-12,8005	1950,72	-0,0019	-3,6682
55	5,8271	5,8420	1921,40	1297,51	5,6516	5,8264	1921,67	1311,63	1921,54	0,1755	337,1583	1304,57	0,0156	20,3986
56	5,0024	6,0638	925,55	1109,52	4,9556	6,0482	925,79	1225,00	925,67	0,0467	43,2642	1167,26	0,0156	18,2245
57	3,7178	4,7853	258,63	265,78	3,6862	4,7697	258,70	293,34	258,67	0,0316	8,1702	279,56	0,0156	4,3605
58	5,7788	5,8261	1151,78	813,15	5,7069	5,8105	1152,17	803,32	1151,98	0,0719	82,8134	808,24	0,0156	12,5964
59	5,3626	3,0781	76,28	8,67	5,3720	3,0621	76,25	8,17	76,27	-0,0095	-0,7221	8,42	0,0160	0,1347
60	4,7000	4,1162	494,77	170,53	4,5419	4,1005	494,93	174,56	494,85	0,1581	78,2255	172,55	0,0157	2,7022
61	5,1015	5,6876	1003,30	541,57	5,0981	5,6720	1003,50	558,65	1003,40	0,0034	3,3704	550,11	0,0156	8,5931
62	5,1891	6,0639	925,59	700,37	5,1885	6,0483	925,83	713,64	925,71	0,0007	0,6273	707,01	0,0156	11,0239
63	7,9037	3,2454	207,79	0,66	7,9131	3,2282	207,83	0,65	207,81	-0,0093	-1,9359	0,66	0,0172	0,0113
64	7,8573	2,8412	58,69	3,96	7,8656	2,8239	58,73	3,91	58,71	-0,0083	-0,4893	3,94	0,0173	0,0680
65	4,9909	5,0826	548,07	367,88	4,9304	5,0670	548,27	371,44	548,17	0,0605	33,1640	369,66	0,0156	5,7695
66	6,0627	5,1672	1412,23	387,02	5,9819	5,1517	1412,72	387,70	1412,48	0,0809	114,2242	387,36	0,0156	6,0259
67	3,4943	4,1573	216,56	204,36	3,4988	4,1417	216,60	198,68	216,58	-0,0044	-0,9568	201,52	0,0156	3,1395
68	3,4538	4,1573	216,56	211,12	3,4600	4,1417	216,60	204,95	216,58	-0,0062	-1,3337	208,04	0,0156	3,2483
69	4,9196	6,0638	925,58	1332,98	4,9207	6,0482	925,82	1299,44	925,70	-0,0011	-0,9732	1316,21	0,0156	20,5387
70	3,6751	3,9695	223,08	107,33	3,6658	3,9538	223,16	107,80	223,12	0,0093	2,0775	107,57	0,0156	1,6828
71	5,1497	5,5020	1032,20	521,58	5,1396	5,4864	1032,50	525,87	1032,35	0,0100	10,3581	523,73	0,0156	8,1715
72	3,6879	4,6821	264,74	239,08	3,6795	4,6666	264,80	241,04	264,77	0,0084	2,2247	240,06	0,0156	3,7416
74	3,5173	3,7677	147,33	51,96	3,5242	3,7522	147,37	53,05	147,35	-0,0069	-1,0205	52,51	0,0155	0,8159
75	3,7183	0,6978	19,19	0,29	3,7308	0,6956	19,19	0,29	19,19	-0,0125	-0,2404	0,29	0,0022	0,0006
76	6,4617	3,2358	57,11	23,35	6,4664	3,2199	57,16	23,17	57,14	-0,0047	-0,2704	23,26	0,0158	0,3682
77	5,2632	3,4961	112,30	2,14	5,2753	3,4797	112,28	2,11	112,29	-0,0121	-1,3550	2,13	0,0164	0,0349
									$\Sigma$		847,23		$\Sigma$	466,33

$\Delta E(\Phi^*_4)$	1313,57	[Util]
----------------------	---------	--------

Quelle-Ziel-Gruppe 5															
VBZ-Nr.	Ohnefall				Mitfall				Nutzen						
	$\theta_i$ [Util]	$\tau_j$ [Util]	$Q_i$ [OV]	$Z_j$ [OV]	$\theta_i$ [Util]	$\tau_j$ [Util]	$Q_i$ [OV]	$Z_j$ [OV]	$(Q_i^O+Q_i^M)/2$ [OV]	$\Delta\theta_i$ [Util]	$(Q_i^O+Q_i^M)/2 * \Delta\theta_i$ [Util]	$(Z_j^O+Z_j^M)/2$ [OV]	$\Delta\tau_j$ [Util]	$(Z_j^O+Z_j^M)/2 * \Delta\tau_j$ [Util]	$\ln(V^M/V^O) * (V^O+V^M)/2$ [Util]
6	5,1093	3,8742	4056,05	2246,46	5,1134	3,8737	4073,48	2251,66	4064,77	-0,0041	-16,5695	2249,06	0,0005	1,1586	285,45
7	4,9716	3,1255	2742,97	1052,08	4,9760	3,1249	2755,15	1054,52	2749,06	-0,0043	-11,9405	1053,30	0,0006	0,6586	
8	5,3357	5,0711	3411,89	3019,41	5,3414	5,0738	3426,29	3027,78	3419,09	-0,0057	-19,4807	3023,60	-0,0026	-7,9740	
9	3,8846	3,7402	353,14	224,20	3,8912	3,7268	354,71	219,36	353,93	-0,0066	-2,3223	221,78	0,0134	2,9708	
10	4,3295	3,9104	1130,94	750,92	4,3345	3,9145	1135,70	753,03	1133,32	-0,0051	-5,7596	751,98	-0,0040	-3,0399	
11	4,6371	4,9344	1246,18	923,81	4,6446	4,9512	1251,26	927,32	1248,72	-0,0075	-9,4055	925,57	-0,0168	-15,5234	
12	2,3655	1,9805	128,88	65,34	2,3710	1,9979	129,42	65,57	129,15	-0,0055	-0,7102	65,46	-0,0174	-1,1396	
13	3,4209	4,5621	1170,94	1749,81	3,4228	4,5683	1175,71	1755,99	1173,33	-0,0019	-2,2157	1752,90	-0,0062	-10,8489	
14	3,5730	5,6649	338,96	1326,68	3,5702	5,6515	340,35	1328,14	339,66	0,0028	0,9567	1327,41	0,0133	17,7175	
16	3,2206	4,5233	783,28	1442,31	3,2231	4,5230	786,19	1447,43	784,74	-0,0025	-1,9384	1444,87	0,0003	0,4554	
18	2,9712	3,7502	1890,50	2365,53	2,9768	3,7493	1899,49	2374,58	1895,00	-0,0057	-10,7597	2370,06	0,0008	1,9612	
19	3,3231	5,2647	310,47	808,39	3,3242	5,2513	311,62	809,05	311,05	-0,0010	-0,3216	808,72	0,0134	10,8405	
21	2,4280	4,0769	167,17	255,76	2,4306	4,0635	167,79	257,30	167,48	-0,0026	-0,4297	256,53	0,0134	3,4307	
22	4,1200	6,2710	1734,31	3667,54	4,1254	6,2618	1740,44	3681,68	1737,38	-0,0054	-9,3525	3674,61	0,0092	33,8470	
23	4,1961	6,0857	2116,50	3697,80	4,2031	6,0802	2124,07	3712,12	2120,29	-0,0070	-14,9294	3704,96	0,0055	20,4691	
24	2,1577	4,5643	90,71	393,69	2,1555	4,5509	91,09	393,01	90,90	0,0022	0,1955	393,35	0,0135	5,2914	
25	4,5558	5,1150	3585,14	3598,05	4,5607	5,1120	3599,82	3610,38	3592,48	-0,0049	-17,6524	3604,22	0,0030	10,7327	
26	5,4803	6,6815	3032,79	4029,54	5,4809	6,6681	3044,47	4026,46	3038,63	-0,0005	-1,6083	4028,00	0,0134	53,8654	
27	3,1156	5,9941	401,15	3346,54	3,1175	5,9935	402,82	3358,92	401,99	-0,0019	-0,7715	3352,73	0,0006	1,8862	
28	1,6630	2,9815	420,92	697,06	1,6657	2,9835	422,77	699,62	421,85	-0,0027	-1,1471	698,34	-0,0021	-1,4351	
29	3,6701	4,1455	2534,28	2410,97	3,6740	4,1457	2545,24	2419,57	2539,76	-0,0039	-9,9406	2415,27	-0,0003	-0,6785	
30	3,8385	3,9285	3672,75	2498,98	3,8444	3,9277	3688,68	2507,74	3680,72	-0,0059	-21,5972	2503,36	0,0008	2,0910	
31	3,5153	3,7243	3311,67	2474,46	3,5212	3,7232	3327,11	2483,84	3319,39	-0,0058	-19,3946	2479,15	0,0010	2,4947	
32	4,6805	4,7323	4541,89	2006,98	4,6826	4,7340	4558,59	2014,08	4550,24	-0,0021	-9,6666	2010,53	-0,0017	-3,4639	
33	4,0059	5,8698	1575,92	3987,83	4,0085	5,8702	1581,80	4002,36	1578,86	-0,0027	-4,1854	3995,10	-0,0004	-1,6768	
34	3,4413	4,5862	253,01	342,79	3,4257	4,5729	254,08	352,84	253,55	0,0156	3,9589	347,82	0,0133	4,6395	
35	3,9707	5,6833	745,12	1329,63	3,9746	5,6699	747,85	1330,89	746,49	-0,0039	-2,9139	1330,26	0,0134	17,8545	
36	3,3578	5,2667	339,09	797,60	3,3588	5,2533	340,37	803,90	339,73	-0,0011	-0,3615	800,75	0,0134	10,7334	
37	4,8463	6,1935	1227,30	1747,86	4,8446	6,1801	1232,04	1772,29	1229,67	0,0017	2,1117	1760,08	0,0134	23,5772	
38	3,0384	3,6828	152,80	117,32	3,0340	3,6694	153,40	119,40	153,10	0,0044	0,6677	118,36	0,0134	1,5831	
39	2,4993	2,9954	73,09	53,92	2,4935	2,9820	74,32	54,29	74,16	0,0058	0,4308	54,11	0,0134	0,7236	
40	3,5380	3,7061	224,29	189,00	3,5302	3,6927	225,30	187,66	224,80	0,0078	1,7540	188,33	0,0134	2,5236	
41	6,9282	7,0723	5716,29	4388,23	6,8960	7,0589	5741,70	4379,30	5729,00	0,0322	184,3820	4383,77	0,0134	58,5329	
44	5,3172	6,1336	2237,02	2678,89	5,3266	6,1201	2245,76	2583,65	2241,39	-0,0095	-21,2323	2631,27	0,0134	35,3303	
55	5,5941	6,0025	1961,23	1864,40	5,4831	5,9891	1969,24	1925,96	1965,24	0,1110	218,2084	1895,18	0,0134	25,3475	
56	5,0652	5,2721	944,51	588,00	4,9908	5,2587	948,72	657,90	946,62	0,0745	70,5061	622,95	0,0134	8,3548	
57	3,8312	3,9978	263,94	144,35	3,7739	3,9844	265,11	159,34	264,53	0,0573	15,1496	151,85	0,0134	2,0339	
58	5,7040	5,4911	1175,46	661,00	5,6534	5,4777	1180,70	666,47	1178,08	0,0506	59,5761	663,74	0,0134	8,8821	
59	4,5347	2,7364	77,85	10,89	4,5494	2,7229	78,13	10,45	77,99	-0,0147	-1,1502	10,67	0,0135	0,1444	
60	4,6270	4,6447	504,94	330,18	4,5097	4,6314	507,19	346,68	506,07	0,1172	59,3359	338,43	0,0134	4,5192	
61	5,1988	5,3526	1023,87	482,46	5,1893	5,3392	1028,36	496,13	1026,12	0,0095	9,7579	489,30	0,0134	6,5524	
62	5,3402	5,2722	944,54	383,63	5,3337	5,2588	948,77	390,20	946,66	0,0064	6,0730	386,92	0,0134	5,1741	
63	7,6359	3,7781	212,02	1,98	7,6458	3,7657	213,02	1,96	212,52	-0,0100	-2,1149	1,97	0,0123	0,0243	
64	7,2616	2,4881	59,74	2,93	7,2695	2,4762	60,06	2,91	59,90	-0,0080	-0,4778	2,92	0,0119	0,0348	
65	4,9731	4,7485	559,31	302,10	4,9184	4,7351	561,84	310,96	560,58	0,0547	30,6359	306,53	0,0134	4,0984	
66	6,0051	5,6957	1441,23	750,33	5,9385	5,6823	1447,69	767,11	1444,46	0,0665	96,1164	758,72	0,0134	10,1472	
67	3,5355	3,8252	220,98	175,90	3,5390	3,8118	221,96	173,01	221,47	-0,0035	-0,7689	174,46	0,0134	2,3397	
68	3,4930	3,8252	220,99	181,96	3,4981	3,8118	221,96	178,70	221,48	-0,0050	-1,1138	180,33	0,0134	2,4146	
69	4,9519	5,2721	944,53	725,23	4,9520	5,2588	948,76	713,50	946,65	-0,0001	-0,1395	719,37	0,0134	9,6111	
70	3,7920	3,8519	227,65	113,23	3,7773	3,8386	228,68	114,03	228,17	0,0147	3,3529	113,63	0,0134	1,5187	
71	5,2612	5,3813	1053,32	550,36	5,2453	5,3679	1058,07	556,61	1055,70	0,0159	16,7472	553,49	0,0134	7,4143	
72	3,7787	4,0254	270,16	153,70	3,7669	4,0120	271,36	155,08	270,76	0,0118	3,2007	154,39	0,0134	2,0753	
74	3,7113	3,4367	150,35	45,59	3,7162	3,4233	151,02	46,41	150,69	-0,0050	-0,7492	46,00	0,0134	0,6146	
75	3,3084	-1,3203	19,59	0,07	3,3223	-1,3226	19,66	0,07	19,63	-0,0139	-0,2727	0,07	0,0023	0,0002	
76	5,8500	2,3855	58,27	10,45	5,8554	2,3731	58,58	10,40	58,43	-0,0053	-0,3108	10,43	0,0125	0,1300	
77	5,0009	3,1519	114,61	3,25	5,1052	3,1382	115,05	3,21	114,83	-0,0144	-1,6517	3,23	0,0136	0,0440	
										$\Sigma$	557,76		$\Sigma$	381,06	

$\Delta E(\Phi^*)$     1224,28    [Util]

Quelle-Ziel-Gruppe 6														
VBZ-Nr.	Ohnefall				Mitfall				Nutzen					
	$\theta_i$ [Util]	$\tau_j$ [Util]	$Q_i$ [OV]	$Z_j$ [OV]	$\theta_i$ [Util]	$\tau_j$ [Util]	$Q_i$ [OV]	$Z_j$ [OV]	$(Q_i^O+Q_i^M)/2$ [OV]	$\Delta\theta_i$ [Util]	$(Q_i^O+Q_i^M)/2*\Delta\theta_i$ [Util]	$(Z_j^O+Z_j^M)/2$ [OV]	$\Delta\tau_j$ [Util]	$(Z_j^O+Z_j^M)/2*\Delta\tau_j$ [Util]
6	3,0469	4,4983	1189,14	2706,76	3,0423	4,5027	1185,23	2705,09	1187,19	0,0046	5,4562	2705,93	-0,0043	-11,7425
7	2,2089	4,2035	509,63	1824,94	2,2042	4,2076	507,93	1824,17	508,78	0,0047	2,3843	1824,56	-0,0041	-7,5474
8	3,8692	4,5490	1662,84	2272,40	3,8712	4,5525	1660,16	2271,51	1661,50	-0,0020	-3,2898	2271,96	-0,0034	-7,8245
9	2,1170	2,6189	169,48	235,96	2,1224	2,6196	169,50	236,03	169,49	-0,0054	-0,9148	236,00	-0,0007	-0,1535
10	2,5136	3,5094	373,23	755,37	2,5173	3,5113	372,74	755,10	372,99	-0,0037	-1,3752	755,24	-0,0020	-1,4784
11	3,0911	3,6740	508,53	830,90	3,0982	3,6806	508,66	831,06	508,60	-0,0071	-3,6185	830,98	-0,0066	-5,4477
12	0,2803	1,3873	33,90	88,12	0,2867	1,3926	33,90	88,12	33,90	-0,0064	-0,2157	88,12	-0,0054	-0,4732
13	3,3200	3,0600	1120,76	781,79	3,3230	3,0634	1120,31	781,60	1120,54	-0,0031	-3,4231	781,70	-0,0034	-2,6812
14	3,9001	2,4373	1016,79	226,59	3,8936	2,4365	1017,29	226,64	1017,04	0,0065	6,6129	226,62	0,0008	0,1801
16	3,1516	2,8484	848,55	523,01	3,1465	2,8503	847,80	522,60	848,18	0,0051	4,3324	522,81	-0,0019	-0,9808
18	2,7569	3,0567	1329,68	1263,52	2,7558	3,0608	1330,75	1265,67	1330,22	0,0011	1,4812	1264,60	-0,0041	-5,2294
19	3,6813	2,3965	711,77	214,07	3,6671	2,3977	712,05	214,03	711,91	0,0142	10,0798	214,05	-0,0012	-0,2505
21	2,3853	1,5986	203,35	110,21	2,3749	1,6005	203,45	110,17	203,40	0,0104	2,1230	110,19	-0,0018	-0,2008
22	4,4867	3,6941	2204,29	1153,18	4,4791	3,6961	2204,70	1152,29	2204,50	0,0076	16,8481	1152,74	-0,0020	-2,2577
23	4,3550	3,8072	2171,04	1411,70	4,3517	3,8101	2171,52	1410,61	2171,28	0,0033	7,2496	1411,16	-0,0028	-4,0107
24	2,8615	1,0833	338,91	59,80	2,8581	1,0836	339,09	59,81	339,00	0,0034	1,1528	59,81	-0,0003	-0,0203
25	3,8162	4,1918	1971,02	2389,35	3,8128	4,1941	1969,82	2388,64	1970,42	0,0035	6,8659	2389,00	-0,0023	-5,4961
26	4,8724	4,5055	2779,70	2021,15	4,8643	4,5083	2780,74	2020,87	2780,22	0,0082	22,6796	2021,01	-0,0028	-5,6661
27	4,2761	2,3542	2035,21	267,64	4,2742	2,3567	2035,38	267,65	2035,30	0,0020	3,9725	267,65	-0,0025	-0,6675
28	1,9404	1,6357	442,49	280,95	1,9403	1,6390	442,53	281,09	442,51	0,0001	0,0608	281,02	-0,0033	-0,9261
29	2,9757	3,4904	1327,18	1691,39	2,9740	3,4933	1327,05	1692,04	1327,12	0,0017	2,1927	1691,72	-0,0030	-5,0037
30	2,8416	3,7534	1395,86	2448,98	2,8386	3,7565	1395,28	2449,52	1395,57	0,0030	4,2075	2449,25	-0,0031	-7,6195
31	2,6894	3,5863	1320,52	2210,93	2,6873	3,5905	1330,33	2214,11	1329,93	0,0021	2,8384	2212,52	-0,0042	-9,2245
32	3,2593	4,4460	1018,54	3025,70	3,2561	4,4483	1017,59	3022,45	1018,07	0,0032	3,2283	3024,08	-0,0023	-6,9108
33	4,3816	3,6227	2400,20	1052,28	4,3802	3,6251	2408,01	1051,52	2408,61	0,0014	3,4265	1051,90	-0,0023	-2,4717
34	2,9538	2,1999	338,85	169,95	2,9339	2,1914	339,07	169,96	338,96	0,0199	6,7440	169,96	0,0085	1,4405
35	3,9959	3,0901	1050,71	497,53	3,9869	3,0910	1051,18	497,32	1050,95	0,0091	9,5358	497,43	-0,0009	-0,4445
36	3,5786	2,3342	643,96	226,72	3,5638	2,3330	644,32	226,62	644,14	0,0148	9,5533	226,67	0,0012	0,2735
37	4,6420	3,7208	1728,42	818,59	4,6254	3,7179	1729,55	818,40	1728,99	0,0166	28,7849	818,50	0,0029	2,3865
38	2,4166	1,7843	169,43	100,72	2,4014	1,7792	169,55	100,72	169,49	0,0151	2,5657	100,72	0,0051	0,5117
39	0,7826	1,1189	33,89	50,34	0,7695	1,1197	33,91	50,36	33,90	0,0131	0,4447	50,35	-0,0008	-0,0381
40	1,6467	2,2264	101,69	151,01	1,6435	2,2100	101,70	151,06	101,70	0,0032	0,3212	151,04	0,0164	2,4824
41	4,5754	5,0947	1660,56	2433,93	4,5658	5,0670	1661,43	2435,03	1661,00	0,0096	15,9696	2434,48	0,0277	67,4909
44	3,4707	4,0241	677,93	1101,52	3,4820	4,0360	678,06	1101,57	678,00	-0,0113	-7,6832	1101,55	-0,0119	-13,1305
55	3,4745	4,1532	576,27	944,02	3,4062	4,0256	576,39	944,26	576,33	0,0683	39,3636	944,14	0,1276	120,4585
56	3,6913	3,6626	653,25	630,52	3,6396	3,6283	653,71	630,76	653,48	0,0517	33,7953	630,64	0,0343	21,6219
57	2,4746	2,3993	182,28	176,20	2,4270	2,3709	182,43	176,26	182,36	0,0476	8,6729	176,23	0,0284	4,9992
58	4,0940	4,2517	813,22	783,92	4,0738	4,2052	813,68	784,34	813,45	0,0202	16,4599	784,13	0,0466	36,5053
59	3,9753	4,3757	50,97	51,73	3,9921	4,3799	50,88	51,66	50,93	-0,0168	-0,8549	51,70	-0,0043	-0,2213
60	3,1375	3,2125	349,02	336,62	3,0744	3,1137	349,21	336,77	349,12	0,0631	22,0202	336,70	0,0988	33,2579
61	3,9171	3,7839	708,21	683,55	3,8964	3,7763	708,80	683,72	708,51	0,0207	14,6988	683,64	0,0076	5,2075
62	3,9233	3,8153	653,23	630,56	3,9074	3,8116	653,83	630,83	653,53	0,0158	10,3440	630,70	0,0037	2,3195
63	6,5307	6,5786	146,86	141,92	6,5309	6,5815	147,09	142,03	146,98	-0,0002	-0,0290	141,98	-0,0029	-0,4172
64	4,7876	4,7696	43,05	39,95	4,7905	4,7761	43,32	40,22	43,19	-0,0030	-0,1284	40,09	-0,0065	-0,2609
65	3,3205	3,4579	386,95	373,08	3,2980	3,4062	387,16	373,28	387,06	0,0225	8,7237	373,18	0,0517	19,2902
66	4,3194	4,4767	996,85	961,94	4,2870	4,4107	997,31	962,40	997,08	0,0324	32,2995	962,17	0,0660	63,5319
67	2,1626	2,1794	153,86	147,89	2,1658	2,1803	153,95	147,95	153,91	-0,0032	-0,4963	147,92	-0,0009	-0,1317
68	2,1397	2,1523	153,86	147,89	2,1441	2,1537	153,95	147,95	153,91	-0,0044	-0,6751	147,92	-0,0014	-0,2112
69	3,5899	3,5801	653,36	630,59	3,5907	3,5832	653,79	630,86	653,58	-0,0008	-0,5142	630,73	-0,0031	-1,9661
70	2,3719	2,3080	157,88	151,65	2,3546	2,3090	158,02	151,73	157,95	0,0173	2,7282	151,69	-0,0011	-0,1639
71	3,8690	3,8037	728,44	702,87	3,8529	3,8033	729,04	703,21	728,74	0,0161	11,7136	703,04	0,0004	0,2935
72	2,4692	2,3854	187,05	180,62	2,4520	2,3867	187,20	180,69	187,13	0,0172	3,2102	180,66	-0,0013	-0,2279
74	2,3023	2,1432	105,03	101,32	2,2855	2,1348	105,14	101,37	105,09	0,0168	1,7640	101,35	0,0085	0,8591
75	3,4030	3,2948	27,85	25,85	3,4000	3,3003	27,84	25,83	27,85	0,0029	0,0820	25,84	-0,0055	-0,1419
76	3,8675	3,7846	41,71	38,67	3,8691	3,7895	41,98	38,91	41,85	-0,0017	-0,0699	38,79	-0,0049	-0,1892
77	5,0862	4,2880	80,10	76,98	5,0854	4,2967	80,04	76,82	80,07	0,0009	0,0690	76,90	-0,0086	-0,6632
									$\Sigma$		363,77		$\Sigma$	270,62

$\Delta E(\Phi^*_6)$       634,39      [Util]

Quelle-Ziel-Gruppe 7														
VBZ-Nr.	Ohnefall				Mitfall				Nutzen					
	$\theta_i$	$\tau_j$	$Q_i$	$Z_j$	$\theta_i$	$\tau_j$	$Q_i$	$Z_j$	$(Q_i^O+Q_i^M)/2$	$\Delta\theta_i$	$(Q_i^O+Q_i^M)/2*\Delta\theta_i$	$(Z_j^O+Z_j^M)/2$	$\Delta\tau_j$	$(Z_j^O+Z_j^M)/2*\Delta\tau_j$
	[Util]	[Util]	[OV]	[OV]	[Util]	[Util]	[OV]	[OV]	[OV]	[Util]	[Util]	[OV]	[Util]	[Util]
6	4,0156	3,6620	342,72	231,30	4,0072	3,6678	340,55	230,99	341,64	0,0084	2,8709	231,15	-0,0058	-1,3408
7	2,4246	3,3813	68,54	173,66	2,4164	3,3871	68,11	173,43	68,33	0,0082	0,5584	173,55	-0,0058	-0,9988
8	3,6047	4,6192	137,03	216,55	3,6053	4,6220	136,30	216,73	136,67	-0,0006	-0,0848	216,64	-0,0028	-0,5992
9	0,0000	3,0084	0,00	20,12	0,0000	3,0038	0,00	20,16	0,00	0,0000	0,0000	20,14	0,0046	0,0928
10	0,0000	3,7174	0,00	71,22	0,0000	3,7173	0,00	71,30	0,00	0,0000	0,0000	71,26	0,0002	0,0116
11	0,0000	4,1166	0,00	79,07	0,0000	4,1232	0,00	79,23	0,00	0,0000	0,0000	79,15	-0,0066	-0,5235
12	0,0000	2,0031	0,00	9,34	0,0000	2,0060	0,00	9,36	0,00	0,0000	0,0000	9,35	-0,0029	-0,0272
13	2,4566	3,2073	68,65	71,14	2,4436	3,2179	68,10	71,20	68,38	0,0130	0,8897	71,17	-0,0106	-0,7515
14	4,4057	3,1394	67,98	27,33	4,4069	3,1322	68,19	27,37	68,09	-0,0012	-0,0800	27,35	0,0072	0,1959
16	5,6511	0,9112	475,18	36,40	5,6656	0,8826	477,40	36,03	476,29	-0,0145	-6,8982	36,22	0,0286	1,0350
18	2,4878	1,9253	275,29	68,23	2,4497	1,9586	273,48	68,57	274,39	0,0381	10,4569	68,40	-0,0333	-2,2789
19	0,0000	2,7759	0,00	21,61	0,0000	2,7751	0,00	21,61	0,00	0,0000	0,0000	21,61	0,0008	0,0173
21	0,0000	1,3789	0,00	7,94	0,0000	1,3743	0,00	7,92	0,00	0,0000	0,0000	7,93	0,0046	0,0367
22	5,1128	3,1813	204,08	99,20	5,1080	3,1760	204,58	98,69	204,33	0,0048	0,9769	98,95	0,0054	0,5303
23	4,9946	2,9748	204,13	122,57	4,9953	2,9626	204,61	121,75	204,37	-0,0007	-0,1469	122,16	0,0122	1,4962
24	0,0000	1,7010	0,00	5,75	0,0000	1,6902	0,00	5,76	0,00	0,0000	0,0000	5,76	0,0108	0,0622
25	3,5996	4,0826	274,73	236,02	3,5817	4,0940	272,91	236,36	273,82	0,0180	4,9248	236,19	-0,0113	-2,6747
26	5,6972	4,6233	272,19	163,55	5,6881	4,6222	272,77	163,52	272,48	0,0091	2,4932	163,54	0,0010	0,1687
27	0,0000	2,7977	0,00	25,15	0,0000	2,7975	0,00	25,20	0,00	0,0000	0,0000	25,18	0,0003	0,0063
28	0,0000	1,1188	0,00	23,70	0,0000	1,1463	0,00	23,81	0,00	0,0000	0,0000	23,76	-0,0274	-0,6515
29	1,2204	3,8572	68,79	157,96	1,2051	3,8716	68,18	158,30	68,49	0,0154	1,0522	158,13	-0,0144	-2,2748
30	1,0543	3,8710	68,80	256,69	1,0374	3,8877	68,21	257,25	68,51	0,0169	1,1602	256,97	-0,0167	-4,3021
31	0,0000	2,9699	0,00	222,91	0,0000	2,9945	0,00	223,77	0,00	0,0000	0,0000	223,34	-0,0246	-5,4992
32	3,2205	2,8379	68,17	234,42	3,2292	2,8105	68,21	231,98	68,19	-0,0086	-0,5883	233,20	0,0274	6,3860
33	0,0000	3,8029	0,00	74,97	0,0000	3,7995	0,00	74,92	0,00	0,0000	0,0000	74,95	0,0035	0,2599
34	4,6597	2,2761	67,90	15,87	4,6381	2,2640	68,19	15,85	68,05	0,0216	1,4722	15,86	0,0122	0,1930
35	4,4661	3,1194	67,96	44,03	4,4640	3,1215	68,19	43,95	68,08	0,0021	0,1457	43,99	-0,0021	-0,0935
36	4,5915	2,4872	67,97	18,02	4,5777	2,4860	68,19	18,01	68,08	0,0138	0,9407	18,02	0,0011	0,0205
37	4,6963	4,0979	67,97	78,52	4,6785	4,0958	68,19	78,51	68,08	0,0178	1,2095	78,52	0,0021	0,1647
38	0,0000	2,2961	0,00	10,07	0,0000	2,2944	0,00	10,08	0,00	0,0000	0,0000	10,08	0,0017	0,0172
39	0,0000	2,0289	0,00	6,47	0,0000	2,0258	0,00	6,48	0,00	0,0000	0,0000	6,48	0,0031	0,0201
40	0,0000	2,2505	0,00	8,62	0,0000	2,2276	0,00	8,64	0,00	0,0000	0,0000	8,63	0,0229	0,1977
41	6,2342	6,0550	339,59	351,39	6,2434	6,0065	340,92	352,21	340,26	-0,0092	-3,1376	351,80	0,0486	17,0926
44	4,1249	4,7488	68,09	146,80	4,1511	4,7595	68,19	146,94	68,14	-0,0262	-1,7861	146,87	-0,0107	-1,5716
55	4,4574	5,0083	68,01	128,70	4,4379	4,8562	68,19	128,94	68,10	0,0195	1,3281	128,82	0,1521	19,5929
56	4,7238	4,0987	66,29	55,34	4,6248	4,0162	66,58	55,47	66,44	0,0990	6,5787	55,41	0,0824	4,5677
57	3,6222	2,8465	19,16	15,81	3,5413	2,8009	19,25	15,85	19,21	0,0810	1,5548	15,83	0,0456	0,7218
58	5,0291	4,7396	82,31	68,98	5,0360	4,6751	82,62	69,15	82,47	-0,0069	-0,5683	69,07	0,0645	4,4572
59	6,0827	5,9225	4,73	4,26	6,1384	5,9288	4,81	4,32	4,77	-0,0557	-0,2659	4,29	-0,0063	-0,0271
60	4,0598	3,6394	35,97	29,47	4,0376	3,5247	36,09	29,53	36,03	0,0222	0,7997	29,50	0,1147	3,3830
61	5,2102	4,3477	71,85	60,37	5,1878	4,3464	72,20	60,51	72,03	0,0224	1,6159	60,44	0,0012	0,0739
62	5,2207	4,3375	66,27	55,35	5,2052	4,3403	66,59	55,47	66,43	0,0155	1,0272	55,41	-0,0028	-0,1570
63	9,4255	9,6950	14,19	12,75	9,4313	9,7059	14,39	12,92	14,29	-0,0058	-0,0822	12,84	-0,0109	-0,1398
64	6,4150	5,8968	6,15	5,55	6,2815	5,7321	5,46	4,92	5,81	0,1335	0,7747	5,24	0,1646	0,8618
65	4,3605	4,0574	39,16	33,05	4,3561	4,0061	39,30	33,13	39,23	0,0044	0,1713	33,09	0,0513	1,6965
66	5,3781	5,1280	101,50	84,76	5,3799	5,0675	101,87	84,99	101,69	-0,0018	-0,1808	84,88	0,0604	5,1303
67	3,1158	2,6050	15,18	12,21	3,1291	2,5954	15,24	12,24	15,21	-0,0133	-0,2021	12,23	0,0096	0,1174
68	3,0793	2,5567	15,18	12,21	3,0946	2,5487	15,24	12,24	15,21	-0,0152	-0,2317	12,23	0,0080	0,0976
69	4,5799	4,0302	66,31	55,33	4,5884	4,0281	66,56	55,46	66,44	-0,0085	-0,5675	55,40	0,0021	0,1187
70	3,5818	2,8630	16,77	13,65	3,5549	2,8597	16,84	13,68	16,81	0,0270	0,4533	13,67	0,0033	0,0452
71	5,0214	4,3119	74,26	61,79	4,9985	4,3050	74,61	61,95	74,44	0,0229	1,7012	61,87	0,0069	0,4257
72	3,7265	2,8598	19,96	15,09	3,7003	2,8597	20,05	15,12	20,01	0,0262	0,5243	15,11	0,0002	0,0026
74	3,6123	2,6941	10,38	9,34	3,6016	2,6896	10,43	9,36	10,41	0,0107	0,1116	9,35	0,0044	0,0416
75	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,00	0,0000	0,0000
76	6,5491	6,0567	6,69	6,09	6,5960	6,0724	6,17	5,47	6,43	-0,0470	-0,3020	5,78	-0,0157	-0,0908
77	7,9028	6,5424	6,30	5,67	7,9226	6,5671	6,41	5,76	6,36	-0,0198	-0,1256	5,72	-0,0248	-0,1415
										$\Sigma$	30,54		$\Sigma$	45,20

$\Delta E(\Phi^*)$     75,74    [Util]



Quelle-Ziel-Gruppe 8														
VBZ-Nr.	Ohnefall				Mitfall				Nutzen					
	$\theta_i$ [Util]	$\tau_j$ [Util]	$Q_i$ [OV]	$Z_j$ [OV]	$\theta_i$ [Util]	$\tau_j$ [Util]	$Q_i$ [OV]	$Z_j$ [OV]	$(Q_i^O+Q_i^M)/2$ [OV]	$\Delta\theta_i$ [Util]	$(Q_i^O+Q_i^M)/2*\Delta\theta_i$ [Util]	$(Z_j^O+Z_j^M)/2$ [OV]	$\Delta\tau_j$ [Util]	$(Z_j^O+Z_j^M)/2*\Delta\tau_j$ [Util]
6	5,0011	3,1049	1732,10	926,98	5,0157	3,0979	1745,25	931,35	1738,68	-0,0145	-25,2429	929,17	0,0070	6,5398
7	3,4710	2,7139	356,20	618,79	3,4864	2,7068	359,12	621,82	357,66	-0,0154	-5,5253	620,31	0,0071	4,3802
8	4,5488	4,2913	851,47	876,19	4,5606	4,2851	856,46	880,24	853,97	-0,0118	-10,0793	878,22	0,0062	5,4339
9	0,0000	3,4287	0,00	84,81	0,0000	3,4268	0,00	85,19	0,00	0,0000	0,0000	85,00	0,0019	0,1607
10	2,6274	3,3223	104,97	255,15	2,6395	3,3186	105,62	256,17	105,30	-0,0121	-1,2739	255,66	0,0037	0,9487
11	3,0289	3,8529	104,70	318,96	3,0274	3,8595	104,51	318,19	104,61	0,0015	0,1534	318,58	-0,0066	-2,0935
12	0,0000	0,6832	0,00	30,40	0,0000	0,6935	0,00	30,31	0,00	0,0000	0,0000	30,36	-0,0103	-0,3125
13	4,5057	1,8216	985,80	297,78	4,5095	1,8191	985,26	296,99	985,53	-0,0038	-3,7152	297,39	0,0025	0,7550
14	0,0000	3,8173	0,00	68,19	0,0000	3,8130	0,00	68,15	0,00	0,0000	0,0000	68,17	0,0042	0,2879
16	2,8761	3,4109	574,47	226,04	2,8647	3,4162	570,56	225,63	572,52	0,0114	6,5493	225,84	-0,0054	-1,2132
18	2,3729	1,6241	283,59	306,78	2,3682	1,6238	282,39	305,66	282,99	0,0047	1,3251	306,22	0,0003	0,0914
19	0,0000	3,8506	0,00	73,68	0,0000	3,8505	0,00	73,78	0,00	0,0000	0,0000	73,73	0,0001	0,0050
21	0,0000	2,8365	0,00	42,20	0,0000	2,8365	0,00	42,08	0,00	0,0000	0,0000	42,14	0,0001	0,0035
22	5,3518	3,7559	1047,36	432,32	5,3468	3,7567	1043,58	430,62	1045,47	0,0050	5,2569	431,47	-0,0008	-0,3482
23	4,1037	3,3444	539,30	403,92	4,0971	3,3460	536,72	402,48	538,01	0,0066	3,5407	403,20	-0,0017	-0,6703
24	0,0000	2,1201	0,00	23,87	0,0000	2,1164	0,00	23,87	0,00	0,0000	0,0000	23,87	0,0037	0,0887
25	4,4796	3,5601	1243,08	729,64	4,4777	3,5597	1241,39	729,15	1242,24	0,0019	2,3582	729,40	0,0004	0,3078
26	4,2048	5,4278	259,00	658,31	4,2038	5,4272	258,79	659,28	258,90	0,0010	0,2535	658,80	0,0006	0,4017
27	3,9528	2,0814	246,45	66,41	3,9555	2,0773	246,78	66,56	246,62	-0,0027	-0,6745	66,49	0,0041	0,2708
28	3,3916	0,0650	637,34	64,08	3,3902	0,0612	635,67	63,88	636,51	0,0014	0,8923	63,98	0,0038	0,2445
29	0,0000	2,4162	0,00	415,88	0,0000	2,4145	0,00	414,80	0,00	0,0000	0,0000	415,34	0,0017	0,7074
30	1,7188	2,9626	184,99	773,46	1,7166	2,9637	184,58	771,97	184,79	0,0022	0,4042	772,72	-0,0011	-0,8720
31	3,4740	2,5882	1069,28	620,78	3,4675	2,5898	1064,43	618,55	1066,86	0,0066	7,0052	619,67	-0,0016	-1,0149
32	0,8380	5,2504	105,06	1118,13	0,8242	5,2575	104,35	1116,37	104,71	0,0138	1,4430	1117,25	-0,0071	-7,9484
33	0,0000	5,3864	0,00	425,35	0,0000	5,3891	0,00	425,22	0,00	0,0000	0,0000	425,29	-0,0027	-1,1579
34	0,0000	4,8233	0,00	68,05	0,0000	4,8083	0,00	68,06	0,00	0,0000	0,0000	68,06	0,0150	1,0208
35	3,3120	4,1826	110,97	160,01	3,3081	4,1841	110,37	159,66	110,67	0,0040	0,4375	159,84	-0,0015	-0,2340
36	0,0000	3,2911	0,00	85,37	0,0000	3,2915	0,00	85,15	0,00	0,0000	0,0000	85,26	-0,0004	-0,0343
37	4,0397	4,8268	197,21	308,00	4,0343	4,8268	196,14	307,22	196,68	0,0054	1,0546	307,61	0,0000	0,0063
38	0,0000	4,2342	0,00	34,57	0,0000	4,2292	0,00	34,53	0,00	0,0000	0,0000	34,55	0,0049	0,1706
39	0,0000	2,5429	0,00	17,33	0,0000	2,5434	0,00	17,35	0,00	0,0000	0,0000	17,34	-0,0005	-0,0085
40	0,0000	3,2863	0,00	68,47	0,0000	3,2819	0,00	68,77	0,00	0,0000	0,0000	68,62	0,0044	0,3037
41	7,2770	6,4576	1578,38	1015,14	7,2598	6,4472	1578,42	1015,67	1578,40	0,0172	27,2180	1015,41	0,0104	10,5401
44	4,9222	5,5461	398,48	556,20	4,9200	5,5583	397,55	554,85	398,02	0,0022	0,8939	555,53	-0,0122	-6,7922
55	2,5684	4,3271	61,60	487,14	2,5605	4,3321	61,50	485,63	61,55	0,0080	4,4900	486,39	-0,0050	-2,4109
56	6,4272	6,5631	208,62	209,47	6,3080	6,3698	208,98	209,94	208,80	0,1193	24,9024	209,71	0,1933	40,5303
57	5,1657	5,3665	58,92	58,29	5,1158	5,2665	58,99	58,42	58,96	0,0499	2,9424	58,36	0,1000	5,8329
58	7,0497	6,7905	260,11	260,40	6,9959	6,7552	260,79	260,94	260,45	0,0538	14,0233	260,67	0,0353	9,2122
59	1,4956	0,9253	15,42	20,62	1,5035	0,9373	15,39	20,55	15,41	-0,0080	-0,1226	20,59	-0,0120	-0,2460
60	5,8053	5,6761	111,68	112,38	5,7280	5,6342	111,90	112,56	111,79	0,0773	8,6466	112,47	0,0420	4,7185
61	4,9919	5,3376	227,07	227,78	4,9892	5,3382	226,20	227,53	226,64	0,0027	0,6172	227,66	-0,0005	-0,1219
62	6,6853	6,9675	208,68	209,35	6,7003	6,9662	208,85	209,76	208,77	-0,0149	-3,1162	209,56	0,0013	0,2794
63	5,5268	5,1413	47,41	48,78	5,5254	5,1408	47,38	48,73	47,40	0,0014	0,0674	48,76	0,0005	0,0221
64	5,1390	5,6103	14,76	17,34	5,1399	5,6110	14,76	17,27	14,76	-0,0009	-0,0128	17,31	-0,0008	-0,0131
65	6,2232	6,0466	124,58	124,30	6,1918	6,0062	124,90	124,58	124,74	0,0314	3,9204	124,44	0,0405	5,0356
66	7,2080	7,0364	319,12	320,00	7,1596	7,0026	319,92	320,66	319,52	0,0484	15,4489	320,33	0,0338	10,8167
67	3,1473	2,9153	49,28	48,83	3,1453	2,9120	49,28	48,79	49,28	0,0020	0,0972	48,81	0,0033	0,1624
68	3,0970	2,8868	49,28	48,83	3,0959	2,8839	49,28	48,79	49,28	0,0011	0,0542	48,81	0,0030	0,1444
69	5,2131	5,0195	209,11	210,24	5,2154	5,0222	209,34	210,48	209,23	-0,0023	-0,4761	210,36	-0,0027	-0,5726
70	5,2818	5,3815	50,32	49,66	5,2663	5,3788	50,43	49,81	50,38	0,0155	0,7830	49,74	0,0027	0,1349
71	6,7120	6,8562	233,20	233,20	6,7046	6,8452	233,64	233,82	233,42	0,0073	1,7150	233,51	0,0110	2,5703
72	3,3867	3,8830	60,98	60,60	3,3854	3,8839	61,01	60,68	61,00	0,0014	0,0830	60,64	-0,0009	-0,0573
74	5,0405	5,4071	33,15	34,53	5,0616	5,3976	33,16	34,59	33,16	-0,0211	-0,6988	34,56	0,0096	0,3305
75	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,0000	0,00	0,0000	0,0000
76	1,8852	1,7545	10,45	9,75	1,8814	1,7526	10,42	9,74	10,44	0,0037	0,0389	9,75	0,0019	0,0190
77	3,3348	3,3050	25,86	27,01	3,3293	3,3080	25,73	26,95	25,80	0,0055	0,1413	26,98	-0,0031	-0,0829
										$\Sigma$	81,82		$\Sigma$	86,27

$\Delta E(\Phi^*_8)$	168,09	[Util]
----------------------	--------	--------

Quelle-Ziel-Gruppe 9														
VBZ-Nr.	Ohnefall				Mitfall				Nutzen					
	$\theta_i$	$\tau_j$	$Q_i$	$Z_j$	$\theta_i$	$\tau_j$	$Q_i$	$Z_j$	$(Q_i^O+Q_i^M)/2$	$\Delta\theta_i$	$(Q_i^O+Q_i^M)/2*\Delta\theta_i$	$(Z_j^O+Z_j^M)/2$	$\Delta\tau_j$	$(Z_j^O+Z_j^M)/2*\Delta\tau_j$
	[Util]	[Util]	[OV]	[OV]	[Util]	[Util]	[OV]	[OV]	[OV]	[Util]	[Util]	[OV]	[Util]	[Util]
6	3,9450	5,1298	2324,79	4229,88	3,9420	5,1327	2322,30	4229,96	2323,55	0,0021	4,7701	4229,92	-0,0029	-12,1196
7	3,3105	4,9784	1226,07	2860,57	3,3083	4,9813	1224,75	2860,98	1225,41	0,0021	2,6009	2860,78	-0,0029	-8,2897
8	5,0964	5,3698	2759,00	3558,40	5,1031	5,3700	2756,80	3558,15	2757,90	-0,0067	-18,4861	3558,28	-0,0002	-0,6779
9	4,6120	3,9047	459,22	368,30	4,5946	3,9044	441,11	368,37	450,17	0,0174	7,8280	368,34	0,0003	0,1196
10	3,9918	4,2877	741,52	1179,57	4,0015	4,2838	740,93	1179,42	741,23	-0,0096	-7,1476	1179,50	0,0039	4,6293
11	4,9713	4,7781	828,27	1299,30	4,9922	4,7844	828,20	1299,38	828,24	-0,0210	-17,3612	1299,34	-0,0063	-8,2080
12	4,6803	2,3797	810,53	134,40	4,7053	2,3816	810,34	134,40	810,44	-0,0251	-20,3071	134,40	-0,0019	-0,2573
13	4,1789	3,7015	1268,66	1220,95	4,1864	3,7000	1268,59	1221,02	1268,63	-0,0075	-9,5642	1220,99	0,0014	1,7533
14	5,5290	3,6665	1038,83	353,42	5,5116	3,6684	1030,09	353,45	1034,46	0,0173	17,9287	353,44	-0,0019	-0,6551
16	4,1967	3,1645	1120,96	816,66	4,1919	3,1684	1120,63	816,35	1120,80	0,0048	5,4254	816,51	-0,0038	-3,1400
18	3,1539	3,5278	1956,36	1970,37	3,1523	3,5305	1957,09	1971,17	1956,73	0,0016	3,0899	1970,77	-0,0027	-5,3934
19	5,2667	3,3997	680,94	323,69	5,2494	3,4055	687,26	323,60	684,10	0,0174	11,8708	323,65	-0,0058	-1,8738
21	5,3760	2,2637	748,45	174,34	5,3587	2,2712	754,57	174,24	751,51	0,0173	12,9950	174,29	-0,0076	-1,3168
22	6,9876	3,7598	5773,93	1808,72	6,9715	3,7677	5775,11	1807,34	5774,52	0,0161	93,2253	1808,03	-0,0079	-14,3309
23	6,7447	3,8931	5775,92	2207,25	6,7382	3,9025	5777,14	2205,61	5776,53	0,0064	37,2033	2206,43	-0,0094	-20,7630
24	4,9115	2,2016	485,97	94,58	4,8942	2,2022	480,71	94,59	483,34	0,0173	8,3725	94,59	-0,0005	-0,0494
25	5,5436	4,4429	5019,30	3739,22	5,5409	4,4459	5020,01	3738,89	5019,66	0,0027	13,7949	3739,06	-0,0030	-11,1411
26	6,8078	5,5485	3775,16	3162,21	6,7905	5,5535	3779,27	3161,61	3777,22	0,0174	65,5485	3161,91	-0,0050	-15,9232
27	6,2309	3,1544	3706,10	418,33	6,2297	3,1562	3706,25	418,28	3706,18	0,0012	4,3618	418,31	-0,0017	-0,7244
28	2,7360	2,0456	743,22	438,83	2,7368	2,0460	743,39	438,93	743,31	-0,0008	-0,5840	438,88	-0,0004	-0,1707
29	4,0364	3,9469	2477,09	2642,52	4,0366	3,9476	2477,63	2642,77	2477,36	-0,0003	-0,6648	2642,65	-0,0006	-1,7087
30	3,3371	3,9403	1562,65	3829,81	3,3363	3,9434	1562,99	3829,93	1562,82	0,0008	1,2662	3829,87	-0,0031	-11,8381
31	2,8987	3,9768	1563,85	3451,13	2,8975	3,9801	1564,42	3451,77	1564,14	0,0012	1,9247	3451,45	-0,0033	-11,2876
32	4,8503	4,9663	2569,84	4734,15	4,8480	4,9695	2568,96	4733,00	2569,40	0,0023	5,8163	4733,58	-0,0032	-15,3668
33	5,2459	4,3453	2433,62	1642,64	5,2461	4,3477	2432,87	1642,38	2433,25	-0,0002	-0,4072	1642,51	-0,0025	-4,0458
34	4,9114	3,3938	420,38	263,84	4,8942	3,3872	430,75	263,85	425,57	0,0173	7,3489	263,85	0,0066	1,7353
35	5,9439	3,8428	1404,34	777,02	5,9266	3,8495	1405,55	776,63	1404,95	0,0173	24,3275	776,83	-0,0067	-5,2113
36	5,6951	3,4023	986,62	353,55	5,6778	3,4052	997,47	353,46	992,05	0,0173	17,1698	353,51	-0,0028	-1,0025
37	6,2096	4,8494	1460,48	1279,67	6,1923	4,8496	1482,77	1279,44	1471,63	0,0173	25,4726	1279,56	-0,0002	-0,2442
38	4,8424	3,0067	325,35	159,32	4,8251	3,0038	329,58	159,31	327,47	0,0173	5,6756	159,32	0,0030	0,4703
39	4,7475	2,3850	272,67	77,15	4,7302	2,3872	276,06	77,17	274,37	0,0173	4,7546	77,16	-0,0022	-0,1667
40	4,6137	3,5764	406,00	233,91	4,5964	3,5486	392,79	233,97	399,40	0,0173	6,9252	233,94	0,0278	6,4919
41	6,7237	6,9355	2848,48	5961,00	6,7064	6,8814	2766,27	5962,47	2807,38	0,0173	48,6067	5961,74	0,0541	322,4731
44	6,0366	5,4840	2110,69	2332,24	6,0230	5,4965	2017,54	2332,24	2064,12	0,0135	27,9671	2332,24	-0,0125	-29,2266
55	5,8163	5,8183	1388,26	2044,77	5,7990	5,6419	1398,70	2045,03	1393,48	0,0173	24,1396	2044,90	0,1764	360,6357
56	6,0396	4,9748	1200,10	984,99	6,0222	4,9354	1335,50	985,21	1267,80	0,0173	21,9751	985,10	0,0395	38,8816
57	4,7611	3,6920	289,47	275,25	4,7437	3,6634	317,60	275,30	303,54	0,0173	5,2604	275,28	0,0286	7,8816
58	5,8014	5,7711	873,30	1225,78	5,7840	5,6863	853,52	1226,12	863,41	0,0174	14,9825	1225,95	0,0849	104,0509
59	3,0533	5,3766	8,53	81,17	3,0356	5,3867	7,98	81,14	8,26	0,0177	0,1461	81,16	-0,0101	-0,8206
60	4,0893	4,6618	182,28	526,56	4,0720	4,5110	185,47	526,69	183,88	0,0173	3,1887	526,63	0,1508	79,4297
61	5,6628	5,0872	592,49	1067,72	5,6455	5,0829	607,48	1067,89	599,99	0,0173	10,4043	1067,81	0,0044	4,6563
62	6,0396	5,1702	766,62	985,04	6,0223	5,1690	779,05	985,25	772,84	0,0173	13,4081	985,15	0,0012	1,1924
63	3,2285	7,8687	0,68	221,10	3,2124	7,8768	0,67	221,15	0,68	0,0161	0,0109	221,13	-0,0082	-1,8073
64	2,8150	7,8534	3,76	62,41	2,7979	7,8607	3,71	62,45	3,74	0,0170	0,0636	62,43	-0,0074	-0,4607
65	5,0578	4,9982	397,85	583,28	5,0405	4,9081	395,55	583,45	396,70	0,0173	6,8575	583,37	0,0901	52,5878
66	5,1405	6,0613	417,63	1502,97	5,1231	5,9615	415,42	1503,38	416,53	0,0173	7,2120	1503,18	0,0998	149,9490
67	4,1325	3,4701	216,07	230,46	4,1151	3,4709	209,93	230,50	213,00	0,0173	3,6907	230,48	-0,0008	-0,1811
68	4,1324	3,4318	223,75	230,46	4,1152	3,4337	216,90	230,50	220,33	0,0173	3,8028	230,48	-0,0019	-0,4456
69	6,0396	4,8918	1415,86	985,02	6,0223	4,8948	1384,66	985,24	1400,26	0,0173	24,2585	985,13	-0,0030	-2,9412
70	3,9443	3,6392	114,54	237,41	3,9269	3,6403	117,11	237,48	115,83	0,0173	2,0053	237,45	-0,0011	-0,2635
71	5,4769	5,1204	563,11	1098,49	5,4595	5,1194	574,88	1098,76	569,00	0,0174	9,8803	1098,63	0,0009	1,0304
72	4,6577	3,6576	255,87	281,74	4,6404	3,6604	260,93	281,79	258,40	0,0173	4,4811	281,77	-0,0028	-0,7928
74	3,7430	3,5101	57,05	156,80	3,7256	3,5010	57,44	156,82	57,25	0,0174	0,9952	156,81	0,0091	1,4225
75	0,6757	3,7010	0,30	20,42	0,6715	3,7139	0,30	20,42	0,30	0,0042	0,0013	20,42	-0,0129	-0,2633
76	3,2109	6,3748	24,08	60,76	3,1933	6,3786	23,83	60,81	23,96	0,0176	0,4226	60,79	-0,0038	-0,2294
77	3,4686	5,2985	2,21	119,51	3,4521	5,3120	2,18	119,49	2,20	0,0165	0,0362	119,50	-0,0135	-1,6163
										$\Sigma$	548,97		$\Sigma$	944,44
											$\Delta E(\Phi^*_9)$	1493,41	[Util]	

Quelle-Ziel-Gruppe 10																
VBZ-Nr.	Ohnefall				Mitfall				Nutzen							
	$\theta_i$	$\tau_j$	$Q_i$	$Z_j$	$\theta_i$	$\tau_j$	$Q_i$	$Z_j$	$(Q_i^O+Q_i^M)/2$	$\Delta\theta_i$	$(Q_i^O+Q_i^M)/2 * \Delta\theta_i$	$(Z_j^O+Z_j^M)/2$	$\Delta\tau_j$	$(Z_j^O+Z_j^M)/2 * \Delta\tau_j$	$\ln(V^M/V^O) * (\sqrt{V^O+V^M})/2$	
	[Util]	[Util]	[OV]	[OV]	[Util]	[Util]	[OV]	[OV]	[OV]	[Util]	[Util]	[OV]	[Util]	[Util]	[Util]	
6	4,0304	5,0619	2560,50	4627,49	4,0300	5,0661	2565,56	4644,77	2563,03	0,0005	1,2241	4636,13	-0,0043	-19,8451	285,50	
7	3,2778	4,8855	1198,60	3129,68	3,2772	4,8893	1200,97	3141,72	1199,79	0,0006	0,6653	3135,70	-0,0038	-11,7956		
8	5,1503	5,2725	3443,06	3892,80	5,1563	5,2758	3451,50	3907,05	3447,28	-0,0060	-20,6047	3899,93	-0,0033	-12,7089		
9	3,6534	3,7353	246,52	402,89	3,6389	3,7377	239,84	404,46	243,18	0,0145	3,5297	403,68	-0,0024	-0,9784		
10	3,9889	4,2516	856,10	1290,37	3,9972	4,2535	858,25	1295,08	857,18	-0,0083	-7,1002	1292,73	-0,0019	-2,5082		
11	4,8883	4,5534	1053,47	1421,56	4,9043	4,5616	1056,93	1426,70	1055,20	-0,0160	-16,8776	1424,13	-0,0083	-11,7777		
12	1,9893	2,2528	74,47	147,03	2,0075	2,2596	74,70	147,58	74,59	-0,0182	-1,3567	147,31	-0,0069	-1,0111		
13	4,6150	3,4319	1995,39	1335,50	4,6240	3,4319	2001,35	1340,23	1998,37	-0,0090	-18,0456	1337,87	0,0000	0,0544		
14	5,5789	3,4657	1517,48	386,67	5,5644	3,4633	1518,75	388,09	1518,12	0,0145	22,0532	387,38	0,0024	0,9395		
16	4,5527	3,2399	1645,34	893,50	4,5490	3,2437	1650,22	896,43	1647,78	0,0037	6,0528	894,97	-0,0038	-3,4259		
18	3,8218	3,0088	2696,10	2155,82	3,8225	3,0136	2704,50	2164,69	2700,30	-0,0006	-1,7105	2160,26	-0,0048	-10,3653		
19	5,1787	3,2740	903,22	354,12	5,1641	3,2775	912,37	355,30	907,80	0,0145	13,1845	354,71	-0,0036	-1,2635		
21	3,9907	2,4014	287,01	190,69	3,9762	2,4045	289,30	191,31	288,16	0,0145	4,1873	191,00	-0,0031	-0,5834		
22	6,2285	4,1636	4184,01	1978,14	6,2157	4,1695	4197,78	1984,38	4190,90	0,0128	53,6195	1981,26	-0,0059	-11,5943		
23	6,0492	4,2345	4218,15	2414,09	6,0441	4,2415	4232,05	2421,78	4225,10	0,0050	21,2269	2417,94	-0,0070	-16,8135		
24	4,4782	2,0959	447,95	103,47	4,4637	2,0934	446,48	103,86	447,22	0,0145	6,4901	103,67	0,0025	0,2590		
25	5,1849	4,5507	4101,60	4088,66	5,1831	4,5547	4113,35	4103,28	4107,48	0,0019	7,7750	4095,97	-0,0040	-16,4459		
26	6,5952	5,4310	4535,39	3459,31	6,5806	5,4333	4552,45	3471,21	4543,92	0,0145	66,0963	3465,26	-0,0024	-8,2312		
27	5,9526	3,0889	3818,18	457,59	5,9508	3,0905	3830,46	459,26	3824,32	0,0018	6,7772	458,43	-0,0017	-0,7614		
28	3,0316	1,7059	794,67	480,03	3,0352	1,7068	797,08	481,86	795,88	-0,0036	-2,8541	480,95	-0,0008	-0,3963		
29	4,2094	3,7053	2748,08	2890,28	4,2106	3,7081	2756,20	2901,12	2752,14	-0,0012	-3,2148	2895,70	-0,0028	-8,2329		
30	4,0058	3,8734	2847,63	4188,56	4,0048	3,8772	2855,83	4204,32	2851,73	0,0010	2,8248	4196,44	-0,0038	-15,9535		
31	3,8002	3,5507	2819,49	3776,47	3,7994	3,5557	2828,19	3791,76	2823,84	0,0008	2,2199	3784,12	-0,0050	-18,9797		
32	4,7648	4,7197	2287,17	5181,21	4,7640	4,7228	2293,89	5198,00	2290,53	0,0007	1,6715	5189,61	-0,0031	-16,1096		
33	5,8720	4,0321	4549,69	1797,75	5,8737	4,0343	4563,54	1803,68	4556,57	-0,0016	-7,4477	1800,72	-0,0022	-3,9175		
34	4,5001	3,3122	404,57	288,63	4,4856	3,2947	415,11	289,70	409,84	0,0146	5,9737	289,17	0,0175	5,0639		
35	5,5971	3,9388	1493,90	849,92	5,5826	3,9415	1496,56	852,72	1495,23	0,0145	21,6940	851,32	-0,0027	-2,2717		
36	5,1806	3,3107	899,43	386,80	5,1661	3,3106	907,45	388,09	903,44	0,0145	13,1184	387,45	0,0001	0,0287		
37	6,1074	4,7869	1993,30	1399,97	6,0928	4,7819	2016,81	1404,79	2005,06	0,0146	29,2314	1402,38	0,0050	6,9502		
38	3,5965	2,9383	137,49	174,29	3,5820	2,9291	138,95	174,92	138,22	0,0145	2,0107	174,61	0,0091	1,5949		
39	2,9091	2,3383	63,44	84,40	2,8946	2,3366	64,22	84,73	63,83	0,0145	0,9275	84,57	0,0017	0,1416		
40	3,6197	3,3877	213,27	255,89	3,6052	3,3657	209,33	256,90	211,30	0,0145	3,0623	256,40	0,0220	5,6313		
41	6,9858	6,7431	4980,04	6521,32	6,9713	6,7047	4928,44	6546,72	4954,24	0,0145	71,8743	6534,02	0,0384	250,8715		
44	6,0471	5,2371	2963,76	2551,80	6,0326	5,2502	2864,83	2560,70	2914,30	0,0145	42,2596	2556,25	-0,0131	-33,5092		
55	5,9161	5,5074	2090,20	2237,25	5,9015	5,3844	2163,09	2245,38	2126,65	0,0145	30,8823	2241,32	0,1230	275,5887		
56	5,1857	4,8829	710,26	1077,53	5,1712	4,8171	795,02	1081,73	752,64	0,0145	10,9500	1079,63	0,0657	70,9852		
57	3,9114	3,6508	176,20	301,11	3,8968	3,5954	192,60	302,28	184,40	0,0146	2,6870	301,70	0,0553	16,6969		
58	5,4047	5,5325	780,15	1341,01	5,3902	5,4720	778,54	1346,25	779,35	0,0145	11,3093	1343,63	0,0605	81,2850		
59	2,6496	4,6419	9,00	88,81	2,6352	4,6565	8,57	89,10	8,79	0,0144	0,1262	88,96	-0,0146	-1,3022		
60	4,5583	4,4363	388,18	576,05	4,5438	4,3224	406,06	578,29	397,12	0,0145	5,7714	577,17	0,1139	65,7221		
61	5,2662	5,0625	584,90	1168,03	5,2517	5,0494	597,32	1172,53	591,11	0,0145	8,5721	1170,28	0,0132	15,4001		
62	5,1857	5,1650	472,48	1077,55	5,1712	5,1568	478,53	1081,80	475,51	0,0145	6,9146	1079,68	0,0082	8,8344		
63	3,6918	7,6319	1,86	241,85	3,6793	7,6403	1,84	242,87	1,85	0,0125	0,0232	242,36	-0,0083	-2,0219		
64	2,4015	7,3014	2,73	68,14	2,3873	7,3078	2,70	68,46	2,72	0,0142	0,0384	68,30	-0,0065	-0,4410		
65	4,6621	4,8098	360,08	638,09	4,6476	4,7314	364,78	640,62	362,43	0,0145	5,2673	639,36	0,0784	50,1339		
66	5,6093	5,8344	891,33	1644,22	5,5948	5,7570	905,30	1650,67	898,32	0,0145	13,0374	1647,45	0,0774	127,5894		
67	3,7388	3,3684	201,95	252,11	3,7243	3,3689	198,43	253,09	200,19	0,0144	2,8908	252,60	-0,0005	-0,1226		
68	3,7388	3,3296	209,44	252,11	3,7243	3,3313	205,31	253,09	207,38	0,0145	3,0011	252,60	-0,0017	-0,4414		
69	5,1857	4,7802	844,08	1077,54	5,1712	4,7817	833,39	1081,77	838,74	0,0145	12,2024	1079,66	-0,0015	-1,6125		
70	3,7655	3,5932	136,34	259,71	3,7510	3,5888	139,58	260,74	137,96	0,0145	2,0017	260,23	0,0044	1,1497		
71	5,2949	5,0730	668,73	1201,66	5,2804	5,0661	683,92	1206,41	676,33	0,0145	9,8169	1204,04	0,0068	8,2393		
72	3,9390	3,6161	181,90	308,20	3,9244	3,6140	185,50	309,40	183,70	0,0146	2,6804	308,80	0,0022	0,6747		
74	3,3503	3,5480	56,57	171,52	3,3357	3,5362	56,65	172,19	56,61	0,0145	0,8233	171,86	0,0118	2,0213		
75	-1,5201	3,3729	0,06	22,34	-1,5230	3,3869	0,06	22,42	0,06	0,0029	0,0002	22,38	-0,0140	-0,3133		
76	2,2993	5,7829	10,83	66,46	2,2848	5,7862	10,74	66,78	10,79	0,0145	0,1568	66,62	-0,0032	-0,2158		
77	3,0676	5,1983	3,10	130,75	3,0516	5,2134	3,05	131,18	3,08	0,0160	0,0493	130,97	-0,0152	-1,9854		
										$\Sigma$	459,74		$\Sigma$	757,92		

$\Delta E(\Phi^*_{10})$     1503,16    [Util]

Quelle-Ziel-Gruppe 11														
VBZ-Nr.	Ohnefall				Mitfall				Nutzen					
	$\theta_i$ [Util]	$\tau_j$ [Util]	$Q_i$ [OV]	$Z_j$ [OV]	$\theta_i$ [Util]	$\tau_j$ [Util]	$Q_i$ [OV]	$Z_j$ [OV]	$(Q_i^O+Q_i^M)/2$ [OV]	$\Delta\theta_i$ [Util]	$(Q_i^O+Q_i^M)/2*\Delta\theta_i$ [Util]	$(Z_j^O+Z_j^M)/2$ [OV]	$\Delta\tau_j$ [Util]	$(Z_j^O+Z_j^M)/2*\Delta\tau_j$ [Util]
6	1,9170	3,7129	163,68	214,98	1,9111	3,7188	163,32	214,35	163,50	0,0059	0,9712	214,67	-0,0059	-1,2683
7	1,1263	3,1007	70,12	107,37	1,1200	3,1067	69,99	107,08	70,06	0,0063	0,4402	107,23	-0,0059	-0,6348
8	2,7128	4,2765	229,03	272,75	2,7095	4,2830	228,80	272,10	228,92	0,0033	0,7474	272,43	-0,0065	-1,7788
9	1,0032	1,8644	23,34	15,35	1,0020	1,8554	23,37	15,11	23,36	0,0012	0,0279	15,23	0,0089	0,1363
10	1,2937	2,9694	51,42	70,08	1,2903	2,9750	51,37	69,92	51,40	0,0034	0,1742	70,00	-0,0056	-0,3886
11	1,9384	3,1817	70,06	68,26	1,9385	3,1732	70,12	66,86	70,09	-0,0002	-0,0113	67,56	0,0085	0,5751
12	-0,8285	0,5850	4,67	5,36	-0,8305	0,5758	4,67	5,25	4,67	0,0020	0,0093	5,31	0,0091	0,0484
13	1,9477	3,2200	154,85	152,26	1,9445	3,2256	154,75	151,92	154,80	0,0033	0,5046	152,09	-0,0057	-0,8613
14	2,7177	3,6768	140,07	103,64	2,7078	3,6683	140,20	102,52	140,14	0,0099	1,3830	103,08	0,0085	0,8749
16	1,8493	3,2780	116,87	123,67	1,8424	3,2809	116,77	123,32	116,82	0,0069	0,8021	123,50	-0,0028	-0,3478
18	1,2388	2,9795	184,60	209,44	1,2339	2,9848	184,53	209,32	184,57	0,0049	0,8990	209,38	-0,0054	-1,1250
19	2,4408	3,2836	98,08	68,20	2,4280	3,2751	98,15	67,41	98,12	0,0128	1,2551	67,81	0,0086	0,5812
21	1,0734	2,1157	28,03	23,96	1,0630	2,1071	28,04	23,67	28,04	0,0104	0,2914	23,82	0,0085	0,2034
22	3,1038	4,3605	303,86	312,44	3,0947	4,3633	303,74	311,67	303,80	0,0091	2,7617	312,06	-0,0027	-0,8577
23	2,9927	4,3002	299,32	317,98	2,9861	4,3035	299,18	317,18	299,25	0,0066	1,9801	317,58	-0,0033	-1,0540
24	1,6024	2,5725	46,70	35,56	1,5962	2,5639	46,74	35,12	46,72	0,0063	0,2929	35,34	0,0086	0,3041
25	2,4295	4,0246	272,17	321,97	2,4239	4,0277	271,86	321,26	272,02	0,0056	1,5163	321,62	-0,0031	-1,0031
26	3,6909	4,7356	382,98	322,50	3,6807	4,7271	383,25	318,12	383,12	0,0103	3,9371	320,31	0,0085	2,7262
27	3,0871	4,3560	280,65	274,83	3,0824	4,3475	280,56	270,79	280,61	0,0048	1,3338	272,81	0,0085	2,3318
28	0,3580	1,8103	61,33	60,49	0,3540	1,8152	61,29	60,39	61,31	0,0040	0,2477	60,44	-0,0049	-0,2966
29	1,5769	3,1587	183,66	217,56	1,5724	3,1622	183,46	217,14	183,56	0,0045	0,8170	217,35	-0,0035	-0,7629
30	1,4046	3,1350	193,15	233,92	1,3991	3,1386	192,93	233,45	193,04	0,0056	1,0769	233,69	-0,0036	-0,8447
31	1,2144	3,0579	184,52	229,71	1,2094	3,0626	184,43	229,52	184,48	0,0050	0,9187	229,62	-0,0047	-1,0833
32	1,8112	3,5423	140,32	199,68	1,8047	3,5457	140,12	199,01	140,22	0,0065	0,9132	199,35	-0,0033	-0,6649
33	2,9786	4,3402	331,90	337,25	2,9738	4,3441	331,62	336,31	331,76	0,0048	1,5900	336,78	-0,0039	-1,3143
34	1,6862	2,6210	46,68	34,78	1,6682	2,6125	46,74	34,77	46,71	0,0181	0,8447	34,78	0,0084	0,2926
35	2,7034	3,7172	144,81	120,03	2,6949	3,7087	144,87	118,73	144,84	0,0085	1,2259	119,38	0,0086	1,0240
36	2,3279	3,2879	88,73	72,41	2,3143	3,2793	88,80	71,92	88,77	0,0136	1,2057	72,17	0,0085	0,6144
37	3,3946	4,2271	238,15	169,61	3,3796	4,2185	238,36	168,82	238,26	0,0150	3,5719	169,22	0,0085	1,4433
38	1,1268	1,7374	23,34	12,87	1,1139	1,7289	23,37	12,83	23,36	0,0129	0,3018	12,85	0,0084	0,1086
39	-0,4768	1,0477	4,66	6,37	-0,4884	1,0387	4,67	6,30	4,67	0,0116	0,0540	6,34	0,0090	0,0572
40	0,5497	1,7869	14,00	13,35	0,5370	1,7781	14,02	13,38	14,01	0,0128	0,1787	13,37	0,0088	0,1175
41	3,4276	5,1429	228,74	355,61	3,4014	5,1343	229,01	360,57	228,88	0,0262	6,0010	358,09	0,0085	3,0565
44	2,2879	4,2041	93,40	178,66	2,2885	4,1956	93,47	173,96	93,44	-0,0006	-0,0598	176,31	0,0086	1,5112
55	2,3551	4,0730	79,38	118,66	2,2437	4,0646	79,45	133,48	79,42	0,1114	8,8471	126,07	0,0085	1,0656
56	2,4210	3,3427	89,99	65,10	2,3736	3,3342	90,11	66,85	90,05	0,0475	4,2747	65,98	0,0085	0,5604
57	1,1797	2,0681	25,11	17,89	1,1391	2,0597	25,15	18,28	25,13	0,0406	1,0201	18,09	0,0084	0,1522
58	2,9127	3,5616	112,03	56,69	2,8744	3,5532	112,16	58,42	112,10	0,0383	4,2951	57,56	0,0084	0,4854
59	3,7754	0,7541	7,03	0,07	3,7782	0,7729	7,01	0,07	7,02	-0,0028	-0,0197	0,07	-0,0188	-0,0013
60	1,9286	2,7155	48,09	29,46	1,8395	2,7068	48,13	32,03	48,11	0,0890	4,2840	30,75	0,0087	0,2678
61	2,6354	3,4231	97,56	63,58	2,6180	3,4146	97,69	63,58	97,63	0,0174	1,6980	63,58	0,0085	0,5385
62	2,6154	3,3427	89,99	55,13	2,6030	3,3342	90,12	54,85	90,06	0,0124	1,1201	54,99	0,0085	0,4683
63	6,4545	1,9345	20,26	0,06	6,4550	1,7569	20,29	0,05	20,28	-0,0004	-0,0087	0,06	0,1776	0,0098
64	5,8114	0,5250	5,93	0,12	5,8134	0,5260	5,95	0,12	5,94	-0,0020	-0,0118	0,12	-0,0010	-0,0001
65	2,1472	2,8192	53,30	28,46	2,1080	2,8107	53,37	29,52	53,34	0,0392	2,0890	28,99	0,0085	0,2467
66	3,1570	3,7662	137,32	68,68	3,1033	3,7577	137,49	72,14	137,41	0,0537	7,3799	70,41	0,0085	0,5988
67	0,9695	1,8956	21,19	15,61	0,9680	1,8872	21,22	15,39	21,21	0,0014	0,0300	15,50	0,0084	0,1303
68	0,9446	1,8955	21,19	16,03	0,9441	1,8867	21,22	15,79	21,21	0,0004	0,0092	15,91	0,0088	0,1403
69	2,3772	3,3427	89,99	69,66	2,3738	3,3343	90,11	68,56	90,05	0,0033	0,3008	69,11	0,0084	0,5837
70	1,0899	1,9222	21,75	14,60	1,0742	1,9135	21,78	14,43	21,77	0,0157	0,3412	14,52	0,0087	0,1264
71	2,5813	3,4519	100,35	70,02	2,5659	3,4433	100,49	69,32	100,42	0,0154	1,5450	69,67	0,0086	0,5984
72	1,2153	2,0954	25,77	18,40	1,1988	2,0871	25,80	18,20	25,79	0,0165	0,4244	18,30	0,0083	0,1524
74	0,9735	1,5067	14,47	7,45	0,9621	1,4990	14,49	7,46	14,48	0,0114	0,1646	7,46	0,0076	0,0569
75	3,1755	0,0000	3,84	0,00	3,1787	0,0000	3,84	0,00	3,84	-0,0032	-0,0123	0,00	0,0000	0,0000
76	4,5337	0,4766	5,73	0,41	4,5331	0,4504	5,75	0,40	5,74	0,0007	0,0038	0,41	0,0262	0,0106
77	4,3322	1,2051	11,03	0,17	4,3335	1,2163	11,02	0,17	11,03	-0,0013	-0,0138	0,17	-0,0112	-0,0019
									$\Sigma$		75,96		$\Sigma$	7,91

$\Delta E(\Phi^*_{11})$     83,87    [Util]

Quelle-Ziel-Gruppe 12														
VBZ-Nr.	Ohnefall				Mitfall				Nutzen					
	$\theta_i$ [Util]	$\tau_i$ [Util]	$Q_i$ [OV]	$Z_i$ [OV]	$\theta_i$ [Util]	$\tau_i$ [Util]	$Q_i$ [OV]	$Z_i$ [OV]	$(Q_i^O+Q_i^M)/2$ [OV]	$\Delta\theta_i$ [Util]	$(Q_i^O+Q_i^M)/2*\Delta\theta_i$ [Util]	$(Z_i^O+Z_i^M)/2$ [OV]	$\Delta\tau_i$ [Util]	$(Z_i^O+Z_i^M)/2*\Delta\tau_i$ [Util]
6	3,6673	2,6891	525,03	401,19	3,6702	2,6877	524,57	400,75	524,80	-0,0029	-1,5293	400,97	0,0015	0,5829
7	3,0600	1,9101	261,76	171,92	3,0634	1,9079	261,58	171,74	261,67	-0,0034	-0,8870	171,83	0,0022	0,3767
8	4,2032	3,4457	667,17	561,56	4,2089	3,4465	666,88	561,17	667,03	-0,0058	-3,8583	561,37	-0,0008	-0,4660
9	1,7570	1,6493	37,86	57,24	1,7415	1,6492	37,07	57,28	37,47	0,0155	0,5818	57,26	0,0001	0,0068
10	2,8800	2,0210	165,49	126,06	2,8646	2,0213	161,89	125,98	163,69	0,0154	2,5261	126,02	-0,0002	-0,0303
11	3,0748	2,5650	169,79	171,79	3,0593	2,5697	165,88	171,85	167,84	0,0155	2,6005	171,82	-0,0047	-0,8003
12	0,4766	-0,2124	13,26	11,46	0,4611	-0,2077	12,98	11,46	13,12	0,0155	0,2028	11,46	-0,0046	-0,0528
13	3,1908	2,6682	371,70	378,52	3,1970	2,6674	371,60	378,35	371,65	-0,0061	-2,2844	378,44	0,0008	0,3214
14	3,5733	3,3514	257,69	343,48	3,5578	3,3465	254,56	343,68	256,13	0,0155	3,9664	343,58	0,0049	1,6944
16	3,2392	2,5743	302,90	286,51	3,2391	2,5723	302,75	286,36	302,83	0,0001	0,0292	286,44	0,0020	0,5662
18	2,9701	2,0648	508,30	448,56	2,9756	2,0611	508,98	448,45	508,64	-0,0055	-2,8209	448,51	0,0036	1,6306
19	3,1799	3,0782	169,72	240,50	3,1644	3,0751	168,31	240,56	169,02	0,0155	2,6196	240,53	0,0031	0,7490
21	2,0112	1,7329	57,57	68,71	1,9958	1,7285	56,85	68,73	57,21	0,0154	0,8836	68,72	0,0044	0,3036
22	4,2959	3,7955	765,39	744,72	4,2942	3,7919	765,04	744,58	765,22	0,0018	1,3440	744,65	0,0036	2,6517
23	4,2127	3,6676	778,60	733,41	4,2141	3,6651	778,25	733,23	778,43	-0,0014	-1,1009	733,32	0,0025	1,8034
24	2,4690	2,2578	89,17	114,49	2,4536	2,2545	87,82	114,56	88,50	0,0154	1,3636	114,53	0,0033	0,3726
25	4,0040	3,1741	785,67	665,30	4,0060	3,1709	785,41	664,86	785,54	-0,0020	-1,5635	665,08	0,0032	2,1593
26	4,6306	4,3159	815,35	938,99	4,6152	4,3134	804,89	939,35	810,12	0,0154	12,5028	939,17	0,0025	2,3225
27	4,2368	3,7551	675,72	687,33	4,2372	3,7533	674,32	687,43	675,02	-0,0003	-0,2317	687,38	0,0017	1,1791
28	1,8012	1,1616	147,23	149,36	1,8058	1,1584	147,29	149,30	147,26	-0,0046	-0,6768	149,33	0,0032	0,4784
29	3,1493	2,3678	529,37	447,81	3,1527	2,3652	529,38	447,54	529,38	-0,0034	-1,7884	447,68	0,0026	1,1542
30	3,1104	2,1967	568,43	470,87	3,1131	2,1939	568,41	470,53	568,42	-0,0028	-1,5860	470,70	0,0028	1,3272
31	3,0419	2,0276	556,90	448,49	3,0466	2,0241	557,52	448,35	557,21	-0,0047	-2,6448	448,42	0,0035	1,5782
32	3,5269	2,5737	486,76	343,92	3,5279	2,5720	486,35	343,65	486,56	-0,0010	-0,4925	343,79	0,0017	0,5916
33	4,3096	3,7235	826,51	813,68	4,3118	3,7217	826,10	813,30	826,31	-0,0022	-1,8019	813,49	0,0018	1,4301
34	2,5167	2,3671	83,42	114,48	2,5012	2,3521	83,16	114,56	83,29	0,0155	1,2879	114,52	0,0150	1,7209
35	3,6130	3,3432	297,59	355,04	3,5975	3,3394	293,59	355,11	295,59	0,0155	4,5670	355,08	0,0039	1,3715
36	3,1841	2,9411	186,54	217,60	3,1687	2,9329	184,66	217,65	185,60	0,0154	2,8521	217,63	0,0082	1,7922
37	4,1228	4,0229	431,77	583,98	4,1074	4,0120	428,00	584,23	429,89	0,0154	6,6254	584,11	0,0109	6,3763
38	1,6326	1,8190	30,90	57,24	1,6172	1,8061	30,60	57,28	30,75	0,0155	0,4751	57,26	0,0129	0,7392
39	0,9428	0,1612	15,70	11,45	0,9276	0,1564	15,55	11,46	15,63	0,0152	0,2374	11,46	0,0048	0,0555
40	1,6812	1,1938	33,40	34,34	1,6659	1,1766	33,03	34,37	33,22	0,0154	0,5103	34,36	0,0172	0,5913
41	5,0374	4,0694	862,44	560,97	5,0219	4,0445	867,62	561,33	865,03	0,0155	13,3741	561,15	0,0249	13,9649
44	4,0986	2,9493	433,48	229,04	4,0832	2,9566	422,26	229,10	427,87	0,0154	6,5944	229,07	-0,0072	-1,6563
55	3,9676	2,9823	296,90	194,68	3,9521	2,8813	330,32	194,74	313,61	0,0155	4,8610	194,71	0,1009	19,6559
56	3,2372	3,1184	153,71	220,69	3,2217	3,0782	157,87	220,86	155,79	0,0155	2,4130	220,78	0,0402	8,8768
57	1,9627	1,8786	42,24	61,58	1,9474	1,8412	43,03	61,63	42,64	0,0153	0,6514	61,61	0,0374	2,3045
58	3,4562	3,6205	134,59	274,74	3,4407	3,5796	137,47	274,93	136,03	0,0154	2,1015	274,84	0,0409	11,2338
59	0,7056	3,1866	0,60	17,22	0,6886	3,1954	0,58	17,19	0,59	0,0170	0,0100	17,21	-0,0089	-0,1523
60	2,6099	2,6214	69,13	117,91	2,5944	2,5372	75,13	117,98	72,13	0,0154	1,1132	117,95	0,0842	9,9306
61	3,3176	3,2804	160,44	239,25	3,3022	3,2645	159,33	239,43	159,89	0,0155	2,4735	239,34	0,0159	3,8043
62	3,2372	3,3185	130,53	220,67	3,2218	3,3077	129,19	220,87	129,86	0,0155	2,0078	220,77	0,0108	2,3911
63	1,7429	5,7574	0,50	49,50	1,7257	5,7587	0,49	49,55	0,50	0,0172	0,0085	49,53	-0,0012	-0,0595
64	0,4665	4,9195	0,34	14,45	0,4386	4,9201	0,33	14,47	0,34	0,0279	0,0093	14,46	-0,0006	-0,0086
65	2,7136	2,8628	68,40	130,71	2,6982	2,8117	69,54	130,82	68,97	0,0155	1,0661	130,77	0,0511	6,6862
66	3,6608	3,8686	164,01	336,76	3,6453	3,8097	169,88	337,00	166,95	0,0155	2,5805	336,88	0,0590	19,8607
67	1,7900	1,6206	38,12	51,97	1,7744	1,6205	37,36	52,01	37,74	0,0156	0,5890	51,99	0,0001	0,0049
68	1,7899	1,5956	39,26	51,97	1,7743	1,5961	38,43	52,01	38,85	0,0156	0,6043	51,99	-0,0005	-0,0281
69	3,2372	3,0305	169,39	220,70	3,2218	3,0309	166,43	220,87	167,91	0,0154	2,5879	220,79	-0,0004	-0,0890
70	1,8168	1,7786	34,27	53,33	1,8013	1,7739	34,08	53,38	34,18	0,0155	0,5301	53,36	0,0047	0,2496
71	3,3464	3,2766	164,99	246,07	3,3309	3,2703	163,88	246,29	164,44	0,0155	2,5532	246,18	0,0062	1,5338
72	1,9901	1,8523	45,36	63,19	1,9746	1,8469	45,13	63,24	45,25	0,0155	0,7011	63,22	0,0054	0,3421
74	1,4014	1,6826	17,63	35,48	1,3861	1,6664	17,43	35,52	17,53	0,0153	0,2674	35,50	0,0162	0,5745
75	-2,6456	2,5527	0,03	9,40	-2,6429	2,5593	0,03	9,40	0,03	-0,0027	-0,0001	9,40	-0,0066	-0,0617
76	0,3642	3,8506	0,88	13,99	0,3414	3,8490	0,86	14,01	0,87	0,0228	0,0199	14,00	0,0016	0,0220
77	1,1207	3,7952	1,37	27,05	1,1053	3,8011	1,34	27,02	1,36	0,0154	0,0209	27,04	-0,0059	-0,1600
									$\Sigma$		69,05		$\Sigma$	133,80

$\Delta E(\Phi^*_{12})$     202,84    [Util]

Quelle-Ziel-Gruppe 13														
VBZ-Nr.	Ohnefall				Mitfall				Nutzen					
	$\theta_i$ [Util]	$\tau_j$ [Util]	$Q_i$ [OV]	$Z_j$ [OV]	$\theta_i$ [Util]	$\tau_j$ [Util]	$Q_i$ [OV]	$Z_j$ [OV]	$(Q_i^O+Q_i^M)/2$ [OV]	$\Delta\theta_i$ [Util]	$(Q_i^O+Q_i^M)/2*\Delta\theta_i$ [Util]	$(Z_j^O+Z_j^M)/2$ [OV]	$\Delta\tau_j$ [Util]	$(Z_j^O+Z_j^M)/2*\Delta\tau_j$ [Util]
6	4,3756	4,6938	1963,29	1982,03	4,3743	4,6980	1964,08	1981,60	1963,69	0,0013	2,5071	1981,82	-0,0041	-8,1933
7	3,7083	4,2255	919,57	1123,56	3,7075	4,2290	920,07	1123,60	919,82	0,0009	0,8058	1123,58	-0,0035	-3,9379
8	5,1467	5,5065	2654,14	2817,35	5,1511	5,5127	2657,62	2822,21	2655,88	-0,0043	-11,4943	2819,78	-0,0061	-17,2736
9	2,9729	3,2353	152,92	156,43	2,9919	3,2172	155,11	153,12	154,02	-0,0190	-2,9201	154,78	0,0181	2,8072
10	3,8332	4,2655	655,13	759,60	3,8370	4,2652	655,57	756,81	655,35	-0,0038	-2,4748	758,21	0,0004	0,2871
11	4,2912	4,6325	748,18	834,45	4,2728	4,6171	727,78	811,86	737,98	0,0184	13,6088	823,16	0,0154	12,6837
12	1,6268	2,5563	56,83	115,72	1,6240	2,5618	56,13	115,13	56,48	0,0028	0,1556	115,43	-0,0055	-0,6377
13	4,2450	4,3289	1670,49	1529,47	4,2443	4,3318	1665,36	1526,15	1667,93	0,0006	1,0545	1527,81	-0,0029	-4,5030
14	5,0020	5,1273	1269,24	1141,16	4,9843	5,1116	1256,86	1127,31	1263,05	0,0177	22,3021	1134,24	0,0157	17,7872
16	4,3043	4,4507	1420,70	1260,85	4,3011	4,4580	1425,35	1266,08	1423,03	0,0031	4,4808	1263,47	-0,0074	-9,2960
18	3,3095	3,6589	2082,87	2113,39	3,3052	3,6637	2084,78	2115,98	2083,83	0,0042	8,7880	2114,69	-0,0048	-10,0831
19	4,6635	4,7169	865,67	742,97	4,6216	4,7091	840,24	732,44	852,96	0,0419	35,7178	737,71	0,0078	5,7721
21	3,3362	3,5417	256,51	259,31	3,3122	3,5406	253,19	258,97	254,85	0,0240	6,1214	259,14	0,0011	0,2896
22	5,4430	5,6911	3233,23	3294,27	5,4366	5,6948	3240,39	3303,77	3236,81	0,0064	20,5928	3299,02	-0,0037	-12,2908
23	5,3130	5,5842	3236,76	3416,98	5,3079	5,5870	3234,85	3417,10	3235,81	0,0052	16,7268	3417,04	-0,0027	-9,3882
24	3,8845	4,0308	441,64	401,24	3,8712	4,0158	438,87	395,78	440,26	0,0133	5,8599	398,51	0,0149	5,9574
25	4,8795	5,2179	3294,05	3487,04	4,8742	5,2216	3291,99	3487,09	3293,02	0,0053	17,4099	3487,07	-0,0037	-12,8255
26	6,0004	6,1751	3737,32	3570,74	5,9661	6,1637	3651,42	3517,09	3694,37	0,0343	126,7851	3543,92	0,0114	40,3751
27	5,4367	5,6973	3011,47	3015,56	5,4317	5,7003	3007,91	3016,91	3009,69	0,0049	14,8600	3016,24	-0,0030	-9,1855
28	2,5968	2,7386	687,47	606,80	2,5952	2,7437	687,79	607,45	687,63	0,0017	1,1475	607,13	-0,0051	-3,0999
29	3,8630	4,2825	2094,98	2323,09	3,8612	4,2876	2096,71	2326,95	2095,85	0,0018	3,7588	2325,02	-0,0051	-11,7900
30	3,6852	4,1465	2170,64	2412,51	3,6823	4,1515	2172,42	2415,91	2171,53	0,0029	6,3187	2414,21	-0,0050	-12,1168
31	3,3334	3,7355	2146,84	2260,81	3,3299	3,7428	2150,19	2268,42	2148,52	0,0035	7,5779	2264,62	-0,0073	-16,5733
32	4,2893	4,8034	1741,25	2203,39	4,2859	4,8080	1741,85	2204,01	1741,55	0,0034	5,9520	2203,70	-0,0046	-10,0702
33	5,3168	5,6274	3496,57	3546,03	5,3138	5,6296	3490,07	3541,99	3493,32	0,0030	10,5155	3544,01	-0,0023	-8,0555
34	3,9372	4,0405	379,46	340,53	3,9170	4,0263	380,89	341,85	380,18	0,0202	7,6882	341,19	0,0142	4,8301
35	5,0274	5,1319	1442,69	1317,92	5,0053	5,1183	1421,96	1297,76	1432,33	0,0222	31,7305	1307,84	0,0136	17,7387
36	4,6023	4,7031	855,35	793,26	4,5753	4,6888	842,81	783,53	849,08	0,0270	22,9273	788,40	0,0143	11,2699
37	5,5925	5,6376	2018,77	1749,79	5,5739	5,6237	2010,95	1737,11	2014,86	0,0186	37,5483	1743,45	0,0139	24,2518
38	3,0774	3,1477	136,58	119,35	3,0786	3,1340	138,90	118,99	137,74	-0,0012	-0,1703	119,17	0,0138	1,6391
39	2,2400	2,7707	62,10	85,76	2,2154	2,7904	61,36	87,25	61,73	0,0246	1,5209	86,51	-0,0197	-1,7015
40	2,9327	3,4020	136,11	170,14	2,9187	3,3278	135,46	161,09	135,79	0,0140	1,8996	165,62	0,0743	12,3004
41	6,4441	6,6274	4043,28	3943,47	6,4210	6,5804	4060,17	3889,08	4051,73	0,0231	93,6867	3916,28	0,0469	183,8638
44	5,3605	5,7215	1903,17	2162,23	5,3431	5,6973	1853,93	2078,05	1878,55	0,0174	32,7084	2120,14	0,0242	51,2096
55	5,2149	5,6006	1278,20	1462,68	5,2057	5,5824	1426,89	1637,40	1352,55	0,0092	12,4671	1550,04	0,0182	28,1588
56	4,5587	4,7309	638,13	605,84	4,4854	4,7203	633,91	638,94	636,02	0,0734	46,6739	622,39	0,0106	6,5818
57	3,3167	3,4544	174,56	161,12	3,2787	3,4385	178,06	167,03	176,31	0,0380	6,6956	164,08	0,0159	2,6054
58	4,9759	4,9529	670,50	511,79	4,9806	4,9317	703,73	529,63	687,12	-0,0047	-3,2128	520,71	0,0212	11,0339
59	3,7370	2,1311	31,97	5,37	3,7688	2,1142	31,78	5,18	31,88	-0,0319	-1,0158	5,28	0,0169	0,0889
60	4,1024	4,0931	340,54	271,34	4,0582	4,0758	363,34	298,29	351,94	0,0441	15,5366	284,82	0,0172	4,9095
61	4,7966	4,8406	729,39	618,78	4,7839	4,8276	733,22	617,88	731,31	0,0126	9,2367	618,33	0,0130	8,0226
62	4,7148	4,7274	562,62	459,58	4,6994	4,7134	561,59	456,09	562,11	0,0154	8,6801	457,84	0,0140	6,4080
63	6,4690	3,2373	76,29	2,45	6,4702	3,2225	76,37	2,40	76,33	-0,0013	-0,0069	2,43	0,0148	0,0358
64	5,8722	0,9638	22,08	0,35	5,8918	0,9512	22,55	0,34	22,32	-0,0196	-0,4379	0,35	0,0126	0,0044
65	4,2135	4,2136	315,59	245,71	4,2272	4,1865	336,63	256,96	326,11	-0,0137	-4,4701	251,34	0,0271	6,8177
66	5,2581	5,1565	830,80	588,16	5,2359	5,1347	864,63	619,31	847,72	0,0222	18,8097	603,74	0,0218	13,1416
67	3,1992	3,2947	176,00	157,53	3,1950	3,2799	174,91	154,81	175,46	0,0042	0,7346	156,17	0,0148	2,3165
68	3,1812	3,3003	179,36	163,97	3,1801	3,2858	178,54	160,99	178,95	0,0011	0,1972	162,48	0,0146	2,3650
69	4,6057	4,7679	747,13	714,79	4,5830	4,7523	731,58	700,77	739,36	0,0228	16,8290	707,78	0,0156	11,0214
70	3,3105	3,3081	159,89	128,91	3,2564	3,3007	154,48	128,02	157,19	0,0540	8,4900	128,47	0,0074	0,9541
71	4,7933	4,8386	742,35	624,95	4,7464	4,8301	722,96	621,63	732,66	0,0468	34,3235	623,29	0,0085	5,3182
72	3,4158	3,5052	206,53	182,52	3,3588	3,4917	198,57	179,81	202,55	0,0571	11,5636	181,17	0,0134	2,4362
74	3,0573	2,8888	84,72	58,06	3,0647	2,8687	85,73	57,43	85,23	-0,0074	-0,6322	57,75	0,0201	1,1628
75	2,6920	-1,9520	10,25	0,08	2,6971	-1,9290	10,25	0,08	10,25	-0,0050	-0,0517	0,08	-0,0229	-0,0018
76	4,6727	0,8258	20,96	1,05	4,6499	0,7949	20,55	1,03	20,76	0,0228	0,4737	1,04	0,0309	0,0321
77	4,3415	2,5857	45,96	6,88	4,3430	2,5686	45,78	6,67	45,87	-0,0015	-0,0696	6,78	0,0171	0,1160
									$\Sigma$		726,42		$\Sigma$	345,57

$\Delta E(\Phi^*_{13})$	1071,99	[Util]
-------------------------	---------	--------