

Technische Universität Dresden
Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr
Fakultät für Verkehrswissenschaften „Friedrich List“

Ein simultanes Erzeugungs-, Verteilungs-, Aufteilungs-
und Routenwahlmodell
(EVA-U)

Verfasser: Dr.-Ing. Birgit Dugge

Dezember 2006

Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr
ISSN 1432-5500 Heft 9/2006
Theorie der Verkehrsplanung

*Dieses Dokument basiert auf der Dissertationsschrift von Birgit Dugge.
Gutachter: D. Lohse, TU Dresden, K.W. Axhausen, ETH Zürich, M. Bell, Imperial College London; Einreichung am 3.08.2005, Verteidigung am 13.04.2006.*

Technische Universität Dresden
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
Institut für Verkehrsplanung und Straßenverkehr
MommSENstraße 3
01062 Dresden

Geschäftsführender Institutsdirektor:
Prof. Dr. phil. habil. Bernhard Schlag

Fachgebiet Theorie der Verkehrsplanung
Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dieter Lohse
Tel: +49 (351) 463-36500 oder +49 (351) 463-36501 (Skr.)
Fax: +49 (351) 463-36502
Besucheradresse: Hettnerstraße 3 (Potthoff-Bau), Raum 157
email: Dieter.Lohse@theoretische-verkehrsplanung.de
Homepage: <http://www.theoretische-verkehrsplanung.de>

Vorwort

Ermöglicht durch die enorm anwachsenden Potentiale der Rechentechnik in den letzten beiden Jahrzehnten hat sich die Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung des Personenverkehrs in theoretischer und praktischer Hinsicht intensiv und extensiv stark weiterentwickelt. Früher vor allem sequentiell betrachtete Verfahrensbausteine können nun in ihrem komplexen Zusammenhang gemeinsam modelliert werden. Durch die erhöhten Speicherkapazitäten und größeren Rechengeschwindigkeiten gelangen Theorien und Algorithmen zur Anwendung, die vorher nicht im Blickfeld der Verkehrsplanungsforschung lagen.

Seit ca. einem halben Jahrhundert ist der so genannte Vier-Stufen-Algorithmus im praktischen Gebrauch, um den Personenverkehr sequentiell in den Stufen Verkehrserzeugung (Ermittlung der Quell- und Zielverkehrsaufkommen der Verkehrsbezirke), Verkehrsverteilung (Ermittlung der Verkehrsströme zwischen den Verkehrsbezirken), Verkehrsaufteilung (Ermittlung der Anteile der Verkehrsarten) und Verkehrsumlegung (Bestimmung der Verkehrsstärken der Strecken der Verkehrsnetze) zu berechnen. In diesem Zeitraum sind nach und nach viele Modellansätze entstanden, die die einzelnen Stufen bzw. die damit verbundenen Wahlentscheidungen (Aktivitätenwahl, Zielwahl, Verkehrsmittelwahl, Routenwahl) nicht mehr isoliert behandeln sondern zusammenführen.

Hierzu gehören die zahlreichen unterschiedlichen Ansätze, die häufig unter dem Begriff der Nested-Logit-Modell-Familie zusammengefasst werden. Bei diesen Ansätzen können mehrere Stufen zu einseitig gekoppelten Verkehrsnachfragemodellen zusammengefasst werden. Als ein Beispiel sei die an der Fakultät im Jahre 2004 verteidigte Dissertation „Simultanes Routen- und Verkehrsmittelwahlmodell“ von Milenko Vrtic genannt.

Bei den so genannten zwei- oder mehrseitig gekoppelten Modellen der Verkehrsnachfrage werden neben den Wahlentscheidungen weitere Bilanzbedingungen berücksichtigt. Diese Modellfamilie wird relativ ausführlich im Heft

5 dieser Schriftenreihe („Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen – Verkehrsnachfragemodellierung –“ von Lohse, Teichert, Dugge und Bachner) vorgestellt und zu einem simultanen Verkehrsnachfragemodell der ersten drei Stufen ausgeformt. Die „Integration des ruhenden Verkehrs in die Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung“ (Dissertation von Christian Schiller) wurde im Heft 8 der Schriftenreihe beschrieben.

Die in diesem Heft vorgestellte, geringfügig erweiterte Textfassung der Dissertation der Verfasserin setzt die angedeutete Entwicklungslinie fort und integriert auf der bewährten theoretischen Basis alle vier Stufen zu einem simultanen Verkehrsnachfragemodell. Dabei wird darauf geachtet, dass durch die Berücksichtigung aller Wechselwirkungen und Rückkopplungen ein stochastisches Nutzergleichgewicht entsteht.

Durch die Dissertation wird eine praxisnahe Umsetzung der simultanen Verkehrsnachfrageberechnung aller vier Stufen in ein Softwarepaket, in dem der ruhende und fließende bezüglich Verkehrsnachfrage und Verkehrsangebot enthalten sind, vorbereitet.

Der Herausgeber würde sich freuen, wenn die durch die Dissertation ausgesprochenen Anregungen von der breiten Fachöffentlichkeit aufgenommen und weitergereicht sowie in zukünftigen Arbeiten nachgenutzt werden.

Dieter Lohse

Dresden, im November 2006

Kurzbeschreibung

In dieser Arbeit wird ein simultanes Quell-, Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahlmodell entwickelt, welches ein stochastisches Nutzergleichgewicht erreicht (Modell EVA-U). Die Routen der Verkehrsmittel zwischen Quelle und Ziel sind die zu wählenden Alternativen. Die Routenwahlmodelle der Verkehrsarten sind nicht mehr Teil der Umlegungsalgorithmen, sondern in das Nachfragemodell integriert. Die Vorteile des Modells EVA-U sind eine konsistente Bewertung aller Alternativen und eine Laufzeiteinsparung, da die wiederholten Umlegungen entfallen. Das Simultanmodell EVA-U stellt eine Weiterentwicklung des Simultanmodells EVA von LOHSE dar. Das EVA-U-Modell ist den universalen Logit-Modellen zuzuordnen.

Die Bewertung der Alternativen erfolgt mittels Generalisierter Kosten. Die Abhängigkeit von Routen wird berücksichtigt, ebenso die Tagesganglinie der Verkehrsnachfrage und die Fahrpläne des ÖV-Systems. Das Modell EVA-U erlaubt auch die Berücksichtigung von Routen intermodaler Verkehrsarten (z.B. P+R). Die Randsummenbedingungen der Verkehrsverteilung werden beachtet. Es gibt verschiedene Modellvarianten für die unterschiedlichen homogenen Schichten (Quelle-Ziel-Gruppen) der Verkehrsnachfrage. Die Integration eines Modells des ruhenden Verkehrs ist möglich.

Um die Wirkung der Abhängigkeit von Routen auf die Routenauswahlwahrscheinlichkeit und die Eigenschaften einer stochastischen Routensuche zu untersuchen, wurden Monte-Carlo-Simulationen der MIV-Umlegungen realisiert. Die verschiedenen Bewertungsfunktionen wurden hinsichtlich Elastizität und resultierender Auswahlwahrscheinlichkeit dargestellt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Nachfragemodellierung	5
2.1	Verkehrserzeugung	5
2.2	Verkehrsverteilung	18
2.2.1	Entropiemaximierung	19
2.2.2	Informationsgewinnminimierung	20
2.2.3	Axiom von BAYES	22
2.3	Verkehrsaufteilung	24
2.3.1	Multinomiales Logit-Modell	25
2.3.2	IIA-Eigenschaft von Logit-Modellen	26
2.4	Routenwahlmodelle	27
2.4.1	Stochastische Routenwahlmodelle	31
2.4.2	Deterministische Routenwahlmodelle	35
2.4.3	Abhängigkeit von Routen	37
2.4.4	Fazit	42
2.5	Simultanmodelle	43
2.5.1	Hierarchische Logit-Modelle	43
2.5.2	Simultanes EVA-Modell	51
2.5.3	Simultanmodelle auf der Basis eines deterministischen Gleichgewichts	60
2.5.4	Fazit	60
2.6	Bewertung von Alternativen	61
2.6.1	Bewertungsfunktionen	62
2.6.2	Zusammenfassung von Aufwänden	77
2.6.3	Fazit	81

3	Angebotsmodellierung	83
3.1	Modellierung eines MIV-Netzes	85
3.2	Modellierung fahrplangebundener Netze	88
3.3	Modellierung intermodaler Routen	92
3.4	Fazit	93
4	Simulation	95
4.1	Motivation und Vorgehensweise	95
4.2	Simulation in Netzen	96
4.2.1	Simulationsprogramm	96
4.2.2	Netzmodelle	103
4.2.3	Ergebnisse	104
4.3	Simulation in Netzmaschen	112
4.3.1	Bestimmung des Schätzparameters	115
4.3.2	Ergebnisse	118
4.4	Fazit	121
5	Modellentwicklung	127
5.1	Basis	127
5.2	Ableitung des Nachfragemodells	131
5.3	Bewertung von Alternativen	135
5.3.1	Bewertung der Relation	137
5.3.2	Auswahlwahrscheinlichkeit von Routen	138
5.3.3	Bestimmung und Bewertung von Abhängigkeit	142
5.4	Ablauf, Rückkopplung und Gleichgewicht	151
5.5	Zeitscheiben	155
5.6	Berücksichtigung des ruhenden Verkehrs	162
5.7	Generierung von Routen	166
5.8	Modellbeispiel	170
6	Ergebnisse und Ausblick	185
A	Definitionen und Erläuterungen	187
A.1	Details zum Logit-Modell	187
A.2	Elastizität	193
A.3	Annahmen über das Verkehrsverhalten	194

B	Simulationsergebnisse	197
B.1	Simulationsprogramm	197
B.2	Simulationsergebnisse Großenhain	200
B.3	Simulationsergebnisse Dresden	206
C	Lösungsverfahren	215
C.1	Das trilineare MULTI-Verfahren	215
	Literaturverzeichnis	217
	Index	221

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schema einer zweidimensionalen Verkehrsstrommatrix	18
2.2	Ablauf einer verkehrsstärkenabhängigen Umlegung	30
2.3	Netzmasche mit abhängigen und unabhängigen Routen	38
2.4	Hierarchiestufen in einem Nested-Logit-Modell	44
2.5	Hierarchiestufen im CNL-Modell zur Stromaufteilung	50
2.6	Bipolares Einzugsgebiet eines Erwerbstätigen	59
2.7	Potenzfunktion, verschiedene Graphen	64
2.8	Exponentialfunktion, verschiedene Graphen	65
2.9	Graph der β -Funktion	66
2.10	Logit-Modell Modifikation 2, verschiedene Graphen	68
2.11	EVA1-Funktion, verschiedene Graphen	69
2.12	EVA2-Funktion, verschiedene Graphen	72
2.13	Box-Cox-Transformation	73
2.14	Box-Tukey-Transformation, verschiedene Graphen	75
2.15	EVA-Transformation mit direktem Zusammenhang	76
2.16	EVA-Transformation mit indirektem Zusammenhang	76
3.1	Aufgelöster Straßenknoten	85
3.2	Kapazitätsbeschränkungsfunktion (Typ: BPR)	86
3.3	Dreidimensionaler Fahrplangraph	90
4.1	Ablaufdiagramm für die Simulation	98
4.2	Doppelanbindung und deren Auflösung	103
4.3	Netzmodell Großenhain: Mittlere Routenanzahl	105
4.4	Netzmodell Großenhain: Standardabweichung	106
4.5	Netzmodell Großenhain: Variationskoeffizient	107
4.6	Netzmodell Dresden: Mittlere Routenanzahl	108

4.7	Netzmodell Dresden: Standardabweichung	109
4.8	Netzmodell Dresden: Variationskoeffizient	110
4.9	Netzmasche mit parallelen Routen	113
4.10	Netzmasche mit abhängigen Routen	114
4.11	Ergebnisse Masche 1, Entf.-kl. B, $\kappa = 1$, MC-Simulation	116
4.12	Ergebnisse Masche 1, Entf.-kl. B, $\kappa = 3$, MC-Simulation	117
4.13	Ergebnisse Masche 1, Entf.-kl. B, $\kappa = 6$, MC-Simulation	117
4.14	Ergebnisse Masche 1, Entf.-kl. F, $\kappa = 3$, MC-Simulation	118
4.15	Ergebnisse Masche 1, Entf.-kl. B, Lernverfahren	119
4.16	Ergebnisse Masche 1, Entf.-kl. F, Lernverfahren.	119
4.17	Ergebnisse Masche 2, Testfall A, MC-Simulation.	120
4.18	Ergebnisse Masche 2, Testfall A, Lernverfahren.	121
4.19	Ergebnisse Masche 2, Entf.-kl. B, MC-Simulation	122
4.20	Ergebnisse Masche 2, Entf.-kl. F, MC-Simulation	122
4.21	Ergebnisse Masche 2, Entf.-kl. B, Lernverfahren	123
4.22	Ergebnisse Masche 2, Entf.-kl. F, Lernverfahren	123
5.1	Struktur einer Matrix im Modell EVA-U	128
5.2	Ablauf und Rückkopplungen im Modell EVA und EVA-U . . .	129
5.3	Struktur der EVA-U-Bewertungsgröße	136
5.4	Auswahlwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit der Mehrkosten .	143
5.5	Netzmasche mit überlappenden Routen	148
5.6	Berechnungsablauf des Simultanmodells EVA-U	152
5.7	Berechnungsablauf des Modells EVA-U mit Zeitscheiben	158
5.8	Netzmasche mit Umsteigepunkten	168
5.9	Beispiel 3 – Netzmodell	171
5.10	Beispiel 3 – Verkehrsstärken im Nullfall	177
5.11	Beispiel 3 – Verkehrsstärken im Planfall 1	180
5.12	Beispiel 3 – Verkehrsstärken im Planfall 2	180
5.13	Beispiel 3 – Verkehrsstärken im Planfall 3	181
5.14	Beispiel 3 – Verkehrsstärken im Planfall 4	181
A.1	Graphen der Gumbel-Verteilung	190
A.2	Gumbel-Verteilungen von Alternativen und deren Maximum . .	192
B.1	Hauptformular des Simulationsprogramms	198
B.2	Zeitbezogener Umwegfaktor im Modell Großenhain	201
B.3	Entfernungsbezogener Umwegfaktor im Modell Großenhain . .	202
B.4	Routenhäufigkeit Großenhain, MC-Simulation	203

B.5	Routenhäufigkeit Großenhain, MC-Simulation	204
B.6	Routenhäufigkeit Großenhain, Lernverfahren	205
B.7	Zeitbezogener Umwegfaktor im Modell Dresden	206
B.8	Entfernungsbezogener Umwegfaktor im Modell Dresden	207
B.9	Routenhäufigkeit Dresden, MC-Simulation, Ausschnitt 1	208
B.10	Routenhäufigkeit Dresden, Lernverfahren, Ausschnitt 1	209
B.11	Routenhäufigkeit Dresden, MC-Simulation, Ausschnitt 2	210
B.12	Routenhäufigkeit Dresden, Lernverfahren, Ausschnitt 2	211
B.13	Routenhäufigkeit Dresden, MC-Simulation, Ausschnitt 3	212
B.14	Routenhäufigkeit Dresden, Lernverfahren, Ausschnitt 3	213

Tabellenverzeichnis

2.1	Beispiel für eine Einteilung in 17 QZG	8
2.2	Attribute von Quelle-Ziel-Gruppen	9
2.3	Kennwertmodell des Personenverkehrs	10
2.4	Aktivitätenkombinationen in Wegeketten	12
2.5	Modellvarianten des simultanen EVA-Modells	56
4.1	Ergebnisse der Simulation in Netzen	111
4.2	Grundreisezeiten der Netzmasche 1 bzw. 2	115
5.1	Beispiel 1 – Daten der Netzmasche	149
5.2	Beispiel 1 – Bewertung der Generalisierten Kosten	149
5.3	Beispiel 1 – Berechnung der Abhängigkeit (Strecken)	149
5.4	Beispiel 1 – Berechnung der Abhängigkeit	150
5.5	Beispiel 1 – Routenauswahlwahrscheinlichkeiten	150
5.6	Beispiel 2 - Bewertung der Routen	150
5.7	Beispiel 2 - Bewertung der Relation	151
5.8	Beispiel 3 – Streckenliste	172
5.9	Beispiel 3 – Routenliste	176
5.10	Beispiel 3 – Ergebnisse der Iteration	182
5.11	Beispiel 3 – Ergebnisse der Planfälle 1 und 2	183
5.12	Beispiel 3 – Ergebnisse der Planfälle 3 und 4	184

Gleichungsverzeichnis

2.1 Vorläufige Potenziale in QZG SS	16
2.2 Potenzial in QZG SS mit Randsummenausgleich	16
2.3 und 2.4 Randsummen	18
2.5 und 2.6 Randsummenbedingungen	18
2.7 Bilineares Grundmodell der Verkehrsverteilung	21
2.8 MN-Logit-Modell	26
2.9 Nutzenfunktion des MNL-Modells	26
2.10 Stromaufteilung (Grundmodell)	32
2.11 Stromaufteilung (Parameter β)	33
2.12 Zielfunktion für ein stochastisches Nutzergleichgewicht	35
2.13 Zielfunktion für ein deterministisches Nutzergleichgewicht	35
2.14 Path-Size-Logit-Modell	39
2.15 PS-Faktor	39
2.16 PS-Faktor, allgemeinere Form	39
2.17 CF-Faktor des C-Logit-Modells	40
2.18 C-Logit-Modell	40
2.19 Modell Eigenständigkeit	41
2.20 Faktor Eigenständigkeit (Teil 1)	41
2.21 Faktor Eigenständigkeit (Teil 2)	41
2.22 Zweistufiges Nested-Logit-Modell	45
2.23 Auswahlwahrscheinlichkeit zweistufiges NL-Modell	46
2.24 Dreistufiges NL-Modell	47
2.25 Auswahlwahrscheinlichkeit dreistufiges NL-Modell	47
2.26 C-Nested-Logit-Modell	48
2.27 Cross-Nested-Logit-Modell	48
2.28 Trilineares EVA-Modell	51
2.29 Randsummenbedingungen des trilineares EVA-Modells	52
2.30 Trilineares EVA-Modell, Prognose	53

2.31 Potenzfunktion	63
2.32 Exponentialfunktion	63
2.33 Bewertungsfunktion Logit-Modell, Modifikation 2	66
2.34 EVA-Funktion	67
2.35 Elastizität der EVA-Funktion	70
2.36 EVA2-Funktion	71
2.37 Elastizität der EVA2-Funktion	71
2.38 Box-Cox-Transformation	73
2.39 Box-Tukey-Transformation	74
2.40 Elastizität der Exponentialfunktion mit Box-Tukey-Transf. . .	74
2.41 EVA-Transformationsfunktion	74
2.42 EVA-Bewertungsgröße, trilineares Modell	80
2.43 Generalisierte Kosten mit nichtlinearen Gewichtsfunktionen . .	80
4.1 BPR-Funktion	97
4.2 Schätzzeit der Strecke, Glättungswert	97
4.3 Lernverfahren, Grenzwert	100
4.4 Lernverfahren, Prüfwert	100
4.5 Faltung, Erwartungswert	101
4.6 Faltung, Standardabweichung	101
4.7 Faltung, Variationskoeffizient	101
4.8 Standardabweichung einer Strecke	101
4.9 Variabler relativer Fehler einer Streckenreisezeit	101
5.1 EVA-U-Modell	129
5.2 EVA-U-Modell, Prognose	131
5.3 Axiom von BAYES	133
5.4 EVA-U-Modell, wahrscheinlichkeitstheoretische Darstellung . .	133
5.5 EVA-U-Bewertungsgröße	135
5.6 Bewertungsgröße einer Relation	137
5.7 Auswahlwahrscheinlichkeit für Routen	138
5.8 Bewertungsgröße für Routen	138
5.9 Generalisierte Kosten einer Route	140
5.10 EVA-Transformationsfunktion	141
5.11 EVA2-Funktion	141
5.12 Parameter α	142
5.13 Mehrkosten q	142
5.14 Bewertungsfunktion der Generalisierten Kosten einer Route . .	142
5.15 Auswahlwahrscheinlichkeit gemäß der Generalisierten Kosten .	142

5.16 Auswahlwahrscheinlichkeit gemäß der Abhängigkeit	144
5.17 Bewertungsgröße für Abhängigkeit	144
5.18 Generalisierte Kosten einer Strecke	145
5.19 Auswahlwahrscheinlichkeit für Routen mit Tagesganglinie . . .	147
5.20 Bewertungsgröße einer Relation mit Tagesganglinie	148
5.21 Parking-Restraint-Funktion	162
5.22 Modell EVA-RV (Modell mit Parkstandswahl)	164
5.23 Aufkommen von P+R-Parkständen	165
5.24 Hochrechnungsfaktor für Routen	165
A.1 Lageparameter des Maximums (Logsummenparameter)	191
A.2 Auswahlwahrscheinlichkeit des MN-Logit-Modells	192
A.3 Bedingung für die IIA-Eigenschaft	193
A.4 Elastizität	193
C.1 MULTI-Algorithmus für trilineare Gleichungssysteme	215

Abkürzungen

BPR	Bureau of public road, Bezeichnung einer bestimmten Kapazitätsbeschränkungsfunktion für freie Strecken
CRF	Capacity-Restraint-Function (Kapazitätsbeschränkungsfunktion)
CNL-Modell	Cross-Nested-Logit-Modell
DTV	durchschnittlicher täglicher Verkehr
EVA-Modell	Simultanes Erzeugung-, Verteilungs- und Aufteilungsmodell
EVA-U-Modell	Simultanes Erzeugung-, Verteilungs-, Aufteilungs- und Routenwahlmodell
EVA-RV-Modell	Simultanes Erzeugung-, Verteilungs und Aufteilungsmodell mit Parkstandswahl
IV	Individualverkehr (Fußgänger-, Rad- und Kraftfahrzeugverkehr)
IIA-Eigenschaft	Independence from Irrelevant Alternatives
MC-Simulation	Monte-Carlo-Simulation
MID	Mobilität in Deutschland (Erhebung)
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MNL-Modell	multinominales Logit-Modell
MS	Microsoft
NL-Modell	Nested-Logit-Modell
NMIV	Nichtmotorisierter Individualverkehr
OV	Ortsveränderung
ÖV	Öffentlicher Verkehr

ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
P+R	Park and Ride
PS-Faktor	Path-Size-Faktor des PS-Logit-Modells
PR(-Funktion)	Parking-Restraint-Funktion
QZG	Quelle-Ziel-Gruppe
QZG SS	Quelle-Ziel-Gruppe „Sonstige Aktivität – Sonstige Aktivität“
QZGT	Quelle-Ziel-Gruppen-Typ
RSA	Randsummenausgleich
RSB	Randsummenbedingungen
SrV	System repräsentativer Verkehrsbefragung der TU Dresden
SV	Spezifisches Verkehrsaufkommen
VB	Visual Basic; eine Interpretersprache von Microsoft, mit der ausführbare Exe-Dateien erstellt werden können
VBA	Visual Basic für Applications; Makrosprache der Microsoft-Office-Produkte
WISEM	Programmsystem der PTV AG Karlsruhe zur Ermittlung der Verkehrsnachfrage
WISEVA	Programmsystem der PTV AG Karlsruhe in Zusammenarbeit mit der TU Dresden zur Ermittlung der Verkehrsnachfrage
VISUM	Programmsystem der PTV AG Karlsruhe zur Routensuche und Umlegung
Wkt.	Wahrscheinlichkeit

Notationen

a_k	Bilanzfaktor des Gleichungssystems mit Nebenbedingungen für Verkehrsart k
AB	Zeitpunkt der Abfahrt (minutenfein) des Stromes v_{ij} in der Zeitscheibe \hat{s}
AN	Zeitpunkt der Ankunft (minutenfein) des Stromes v_{ij} in der Zeitscheibe \hat{s}
A_k	Verkehrsaufkommen einer Verkehrsart k , Summe aller Ströme der Verkehrsart k : $A_k = \sum_{i'j'} v_{i'j'k}$
AP_k	Verkehrsartpotenzial einer Verkehrsart k , wird extern ermittelt z.B. auf Grundlage einer Verkehrsbefragung
BG	Bewertungsgröße
BW	Bewertungswahrscheinlichkeit
Ca_k	Verkehrsmittelgunstfaktor
C_a	Kapazität einer Strecke a
$\delta_{ar'}$	Wert der Strecke-Route-Inzidenzmatrix ($\delta = 1$: Strecke a ist Teil der Route r , $\delta = 0$: sonst)
D_s	Dauer der Zeitscheibe s
ϵ	stochastischer Anteil des Nutzens (Störterm)
$F(w)$	Bewertungsfunktion eines Aufwandes w
$f q_i, f z_j, f a_k$	Bilanzfaktoren des Gleichungssystems mit Nebenbedingungen
$\gamma_k(w)$	Gewichtsfunktion in den Generalisierten Kosten: nichtlinear wachsende Funktion des Aufwandes w für das Verkehrsmittel k

GK	Generalisierte Kosten
h_{iks}	relative Häufigkeit in Zeitscheibe s für den Quellbezirk i des Verkehrsmittels k (Wert der Tagesganglinie)
H_e	Heimatverkehrsaufkommen des Bezirkes e
l_a	Länge einer Strecke a
L_r	Länge einer Route r
μ	Skalierungsparameter der Gumbel-Verteilung
M_a	Verkehrsstärke einer Strecke a (auch: Belegung)
$M(R)$	Auswahlwahrscheinlichkeit gemäß ihren Mehrkosten
$N^{(x)}$	Anzahl der Elemente in der Indexmenge x bzw. höchste Indexziffer
q_{ijkr}	Mehrkosten der Route r gegenüber der aufwandsgeringsten Route der Relation ijk
Q_i	Quellverkehrsaufkommen eines Bezirkes i , entspricht der Zeilensumme der Matrix: $Q_i = \sum_{j'k'} v_{ij'k'}$
QP_i	Quellpotenzial eines Verkehrsbezirkes i , Ergebnis des Erzeugungmodells oder externe Vorgabe
q_i	Bilanzfaktor des Gleichungssystems mit Nebenbedingungen für Quellverkehrsbezirk i
π	Besetzungsgrad von Fahrzeugen
$P(R_{ijkr})$	Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route r der Relation ijk
S_r	Menge der Strecken, die zur Route r gehören
$T0$	Reisezeit bei freiem Verkehrsfluss einer Strecke a oder Route r
TM	verkehrsstärkenabhängige Reisezeit einer Strecke a oder Route r
TS	Schätzzeit des Lernverfahrens einer Strecke a oder Route r
u	Eigenverkehrsanteil der Produktionsseite
uz_{ijkr}	Bewertungsgröße für die zeitliche Ähnlichkeit einer Route r im Vergleich zu den übrigen Routen der Relation ijk
U	Nutzen
$U(R)$	Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route gemäß ihrer Abhängigkeit
v	Eigenverkehrsanteil der Attraktionsseite

v_{ij}	Verkehrsstrom von Bezirk i nach Bezirk j
v_{ijk}	Verkehrsstrom von Bezirk i nach Bezirk j mit Verkehrsart k , es gilt: $v_{ij} = \sum_{k'} v_{ijk'}$
$v_{ijk'r}$	Routenstrom, d.h. der Verkehrsstrom von Bezirke i nach j mit Verkehrsart k auf Route r , es gilt: $v_{ij} = \sum_{k'} v_{ijk'} =$ $\sum_{k'} \sum_{r'} v_{ijk'r'}$
V	Gesamtverkehrsaufkommen (Ecksumme der Matrix) Es gilt: $V = \sum_{i'} Q_{i'} = \sum_{j'} Z_{j'} = \sum_{e'} H_{e'}$
V_k	im Kontext von Logit-Modellen: deterministischer Nutzen (auch: Generalisierte Kosten) der Alternative k
w	Aufwand
z_w	Zeitbewertungsfaktor für die Umrechnung von (zeitlichen) Aufwänden w in monetäre Größen
z_j	Bilanzfaktor des Gleichungssystems mit Nebenbedingungen für Zielverkehrsbezirk j
Z_j	Zielverkehrsaufkommen eines Bezirkes j , entspricht der Spal- tensumme der Matrix: $Z_j = \sum_{i'k'} v_{i'jk'}$
ZP_j	Zielpotenzial eines Verkehrsbezirkes j , Ergebnis des Erzeu- gungsmodells oder externe Vorgabe

Indizes:

i'	Laufindex, z.B. $\sum_{i'} Q_{i'}$ Für die Notation von Laufindizes bei Summen und Produk- ten gilt: $i' = 1, 2, \dots, i, \dots, N^{(i)}$. Falls ein konkretes i aus- drücklich aus der Menge ausgeschlossen werden soll, wird $\sum_{i', i \neq i'}$ angegeben.
a	Strecke
e	Heimatverkehrsbezirk
g	Quelle-Ziel-Gruppe
i	Quellverkehrsbezirke
j	Zielverkehrsbezirke
k	Verkehrsart
l	Strukturgröße
p	Personengruppe (Kontext Erzeugung) oder P+R-Parkplatz (Kontext EVA-U-Modell)

<i>r</i>	Route
<i>s</i>	Zeitscheibe

Kapitel 1

Einführung

Modelle spielen in der Wissenschaft eine zentrale Rolle für den Erkenntnisgewinn. In den Sozialwissenschaften finden oft Prinzipmodelle ihre Anwendung. Diese stützen sich auf rein qualitative Annahmen und erzielen sehr allgemeine Aussagen. Innerhalb der Natur- und Ingenieurwissenschaften sind hingegen quantitative Aussagen wichtig. Diese Aufgabe übernehmen die quantitativen Modelle. Die Verkehrsnachfragemodelle gehören zu dieser Modellgruppe. Es ist die Aufgabe der Nachfragemodelle, den Erwartungswert der Verkehrsströme zu einem zukünftigen Zeitpunkt¹ unter konkret zu spezifizierenden Bedingungen (z.B. wirtschaftliche oder demographische Entwicklung oder Veränderung des Verkehrsangebots) zu bestimmen. Die Entwicklung eines solchen quantitativen Modells ist der Gegenstand dieser Arbeit. Die Basis der Modellierung bildet die Annahme, dass ein Bedürfnis nach Aktivitäten (Wohnen, Arbeiten, Versorgen etc.) vorliegt. Da diese Aktivitäten nur an verschiedenen Standorten im Raum realisiert werden können, sind Ortsveränderungen zwingend notwendig.

Zentrale Idee Der klassische Ansatz für die Modellierung des fließenden Verkehrs ist der Vier-Stufen-Algorithmus. Die vier aufeinander aufbauenden Stufen Erzeugung, Verteilung, Aufteilung und Umlegung modellieren die Verkehrsströme des Untersuchungsgebietes.

Die Behandlung in vier isolierten Stufen mit unterschiedlichen Datengrundlagen und unterschiedlichen modelltheoretischen Ansätzen (sequenzielle Modellierung) birgt das Problem in sich, dass Eingangsdaten für den aktuellen

¹In der Nachfragemodellierung sind sehr häufig die mittel- bis langfristigen Planungshorizonte üblich.

Modellschritt möglicherweise erst im nachfolgenden Schritt bekannt werden. Deshalb sind sie durch Hilfsgrößen oder Schätzungen zu ersetzen. Um valide Ergebnisse zu erreichen, werden zahlreiche Rückkopplungen, d.h. das Einspeisen von Ergebnissen des Folgeschrittes und eine Wiederholung des aktuellen Modellschrittes, ausgeführt. Diese zahlreichen Rückkopplungen sind aber im Hinblick auf die Rechenzeit ineffizient. Die Zerlegung in einzelne Nachfragemodelle birgt auch die Gefahr in sich, dass in einzelnen Modellschritten verschiedene Aufwandsarten berücksichtigt und verschiedene Bewertungsfunktionen verwendet werden (Problem der Inkonsistenz).

Die Zusammenfassung der einzelnen Modelle zu einem Simultanmodell überwindet diese Probleme. Die Konsistenz und eine minimale Zahl von Rückkopplungsschleifen können erreicht werden, wenn alle vier Modellstufen in einem Modell zusammengefasst werden. In diesem Fall sind die Routen aller Verkehrsarten einer Quelle-Ziel-Relation die konkurrierenden Alternativen. Die Entwicklung eines simultanen Erzeugungs-, Verteilungs-, Aufteilungs- und Routenwahlmodells ist das Ziel dieser Arbeit. Dazu müssen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie sieht ein allgemeines Routenwahlmodell aus, das sich für die Routenwahl *aller* Verkehrsarten eignet?
- Kann ein bestehendes Simultanmodell so erweitert werden, dass damit auch die Routenwahl abgebildet wird? Wie lässt sich ein Routenwahlmodell in dieses Simultanmodell integrieren?
- Kann das Modell so allgemein formuliert werden, dass auch die Nachfrage nach intermodalen Routen ermittelt werden kann?
- Führt die Anwendung des Simultanmodells zu einem stochastischen Nutzergleichgewicht?

Die vorliegende Arbeit entwickelt ein *makroskopisches Nachfragemodell*. Dieser mehrstufige Ansatz ist heute weit verbreitet und eine effiziente Methode, den Erwartungswert der Verkehrsströme zu berechnen. In jüngster Zeit wurden Simultanmodelle wieder intensiv entwickelt (VRTIC [55], THUST [50], BOBINGER [13]). Diese Arbeiten zusammen mit den Arbeiten von LOHSE [33], [43], SCHILLER [41] und RAMMING [38] enthalten wesentliche wissenschaftliche Grundlagen.

Leitfaden für diese Arbeit Der „rote Faden“ dieser Arbeit führt von der Analyse wichtiger Nachfragemodelle (Kapitel 2) und der Angebotsmodellierung (Kapitel 3) über die Simulation der Routenwahl (Kapitel 4) zur Entwicklung

des Simultanmodells EVA-U² einschließlich eines Beispiels (Kapitel 5).

Die einzelnen Abschnitte des Kapitels Nachfragemodellierung sind unterschiedlich umfangreich. Bereits zu Beginn dieser Arbeit deutete sich an, dass ein Simultanmodell die Basis des neuen Modells bilden wird. Ein Simultanmodell wiederum kombiniert immer elementare Modelle des Vier-Stufen-Algorithmus. Für das obligate Literaturstudium in einer Dissertation würde daraus folgen, dass es die Modelle der Erzeugung, der Verteilung, der Aufteilung und der Umlegung und darauf aufbauend die Simultanmodelle und schließlich auch die Angebotsmodellierung umfassen müsste. Alle Module in gleicher Weise ausführlich zu behandeln, würde den Rahmen einer Arbeit sprengen. Statt dessen wurde der Kompromiss eingegangen, nur die für die Entwicklung wesentlichen Modelle bzw. Modell Aspekte ausführlicher zu beschreiben. Dazu gehören:

- die Erzeugungsmodelle, darunter insbesondere das Kennwertmodell (dieses ist ein Teil des EVA³-Simultanmodells und wegen der differenzierten Bildung der Verkehrsbezirkspotenziale und des Randsummenausgleichs von Bedeutung),
- die Modelle der Verkehrsverteilung, da sich hier die Möglichkeit der Präsentation der unterschiedlichen methodische Ansätze ergibt,
- das EVA-Simultanmodell, da es die Basis für das EVA-U-Modell darstellt,
- die Routenwahlmodelle, da eines dieser Modell zu integrieren ist sowie
- ein Abschnitt zu den Eigenschaften von Bewertungsfunktionen.

Das Aufteilungsmodell wird aus Gründen der Vollständigkeit zwar beschrieben, jedoch nur in eingeschränktem Umfang. Die Ableitung des multinomialen Logit-Modells hingegen wird im Anhang ausführlicher dargestellt, denn die Ableitung enthält einige für das Verständnis von Nested-Logit-Modellen (diese gehören zu den Simultanmodellen) wichtige Details.

²EVA-U: **E**rzeugungs-, **V**erteilungs-, **A**ufteilungs- und **R**outenwahlmodell.

³EVA-Modell: **E**rzeugungs-, **V**erteilungs- und **A**ufteilungsmodell.

Kapitel 2

Nachfragemodellierung – Ermittlung von Verkehrsströmen

Mit dem Sammelbegriff Verkehrsstrommodelle wird die Gesamtheit der Nachfragemodelle – die Quell- und Zielwahl, Verkehrsmittel- und Routenwahl – bezeichnet. Allen Modellen ist gemein, dass sie eine Menge (Verkehrsaufkommen der Verkehrsbezirke oder einen Verkehrsstrom einer Verkehrsbeziehung) auf Alternativen aufteilen und so die Anteile der jeweiligen Konkurrenten bestimmen. In diesem Kapitel werden die für den jeweiligen Arbeitsschritt verbreiteten Modelle vorgestellt sowie deren generelle Struktur, Gemeinsamkeiten und Unterschiede aufgezeigt. Zuerst wird eine Einführung in den Modellschritt Verkehrserzeugung gegeben.

2.1 Verkehrserzeugung

Im Schritt Verkehrserzeugung werden die Quell- und Zielpotenziale QP_i bzw. ZP_j der Verkehrsbezirke bestimmt. Die Potenziale sind ein Maß für die verkehrsrelevanten Wirkungen der raumstrukturellen Gegebenheiten (Flächennutzung) und können unter Anwendung eines Erzeugungsmodells errechnet werden.

Ein Erzeugungsmodell stellt einen mathematischen Zusammenhang zwischen verkehrsrelevanten Raumstrukturgrößen, der Mobilität der Einwohner

und dem Potenzial her. Für die *Personengruppenmodelle* ist es typisch, dass verhaltenshomogene Personengruppen gebildet und aus Erhebungen zugehörige Mobilitätskenngrößen abgeleitet werden. Verkehrserzeugungsmodelle auf der Basis des Gruppenkonzepts wurden unter anderem von KUTTER [29] und SCHMIEDEL [42] entwickelt.

Das Kennwertmodell der Verkehrserzeugung nach LOHSE et al. [33] ist ein weiteres Modell dieses Typs. Es ist Teil des EVA-Simultanmodells. Einige für die Modellentwicklung wichtige Details des Kennwertmodells werden im Folgenden kurz dargestellt¹.

Quelle-Ziel-Gruppen Wegeketten beschreiben die Folge von Aktivitäten (Wohnen, Arbeiten, Einkaufen, Schulbesuch etc.), die eine Person im Laufe des Tages ausführt. Der räumliche Wechsel zwischen den Aktivitäten wird als Ortsveränderung (kurz: OV) bezeichnet und durch die Kombination der Aktivitätenkürzel gekennzeichnet (z. B. WA für Wohnung-Arbeitsstätte). Jede OV wird mit einem bestimmten Verkehrsmittel ausgeführt. Die Person kann aufgrund ihrer soziodemographischen Merkmale einer bestimmten Personengruppe zugeordnet werden.

Die Quelle-Ziel-Gruppen (QZG) sind die homogenen Verkehrsklassen des EVA-Modells. Eine QZG bildet alle Ortsveränderungen des Untersuchungsgebietes ab, die an der Quelle und am Ziel gleiche Aktivitäten aufweisen, beispielsweise alle OV von der eigenen Wohnung zur eigenen Arbeitsstätte, von der eigenen Arbeitsstätte zur eigenen Wohnung, etc. Den QZG werden maßgebende Personengruppe(n) und maßgebende Strukturgröße(n) zugeordnet. Bei dieser Zuordnung werden sachlogische Zusammenhänge berücksichtigt. So sind beispielsweise in der QZG Wohnung-Arbeitsstätte die Erwerbstätigen, die die Ortsveränderungen durchführen, die maßgebende Personengruppe in den Quellverkehrsbezirken und die Zahl der Arbeitsplätze die maßgebende Strukturgröße für die Zielverkehrsbezirke. Die Einteilung in homogene Klassen ist eine wichtige Voraussetzung für eine sachgerechte Modellierung. Eine Einteilung des Verkehrsgeschehens in 17 QZG zeigt die Tabelle 2.1.

Der Wohnstandort der maßgebenden Personengruppe wird als Heimatstandort bezeichnet. Mit Hilfe des Heimatstandortes werden die QZG verschiedenen QZG-Typen zugeordnet, die wie folgt definiert sind:

¹Geringe Unterschiede in der Darstellung gegenüber der zitierten Literatur sind dem Fortschreiten der Modellentwicklung geschuldet.

- *QZG-Typ 1*: Die Quelle der Ortsveränderung ist gleichzeitig der Heimatstandort der maßgebenden Person.
- *QZG-Typ 2*: Das Ziel der Ortsveränderung ist gleichzeitig der Heimatstandort der maßgebenden Person.
- *QZG-Typ 3*: Der Heimatstandort der maßgebenden Person ist weder die Quelle noch das Ziel der Ortsveränderung.

Damit sind drei Standorte für das Kennwertmodell wesentlich: der Heimatstandort der maßgebenden Personengruppe sowie die Quelle und das Ziel der Ortsveränderung.

Die Eingabedaten für das Kennwertmodell können aus den erhobenen Wegeketten² bestimmt werden. Wichtige Kenngrößen sind die für die QZG maßgebenden Personengruppen und deren Spezifisches Verkehrsaufkommen. Die relative Häufigkeit des gewählten Verkehrsmittels k (Verkehrsartenpotenzial AP_k bzw. Modal-Split MS_k , es gilt: $AP_k = MS_k \cdot V$) je QZG ist ebenfalls ein Ergebnis solcher Auswertungen und eine wichtige Eingabegröße für die simultane Verteilung und Aufteilung.

Das Spezifische Verkehrsaufkommen ist die mittlere Anzahl der Ortsveränderungen pro maßgebender Person P und Zeiteinheit ZE :

$$SV = \frac{OV}{P \cdot ZE}$$

wobei i.d.R. die Zeiteinheit einen ganzen Tag umfasst. Zu dieser Definition analog ist die Erzeugungsrate die mittlere Anzahl von OV pro Strukturgröße und Zeiteinheit. In Tabelle 2.2 sind die Attribute der QZG dargestellt.

In Tabelle 2.3 ist der Algorithmus zur Berechnung des Gesamt- und Heimatverkehrsaufkommens (V bzw. H_e) sowie der Quell- und Zielverkehrspotenziale (QP_i, ZP_j) dargestellt. In Tabelle 2.3 und im nachfolgenden Text bedeuten:

BP	maßgebende Personengruppe,
ER	Erzeugungsrate (=Attraktionsrate),
H	Heimatbezirksaufkommen,
Q	Quellverkehrsaufkommen, Zeilensumme der Verkehrsstrommatrix,
QP	Potenzial des Quellbezirkes,
SQ	maßgebende Strukturgröße an der Quelle,
SZ	maßgebende Strukturgröße an dem Ziel,

²Haushaltsbefragungen sind die Quellen für die Erfassung von Wegeketten, z.B. SrV, KONTIV, MiD

Zielaktivität → Quellaktivität ↓	W	A	K	B	D	E	F	S
eigene Wohnung		WA	WK	WB	WD	WE	WF	WS
eigene Arbeits- stätte	AW		AS					
Kinder- einrichtung	KW	SA	SS					
Bildungs- einrichtung	BW							
Dienstliche Erle- digung	DW							
Einkaufen	EW							
Freizeit	FW							
Sonstige Ak- tivität	SW							

Tabelle 2.1: Beispiel für eine Einteilung in 17 QZG

SV	Spezifisches Verkehrsaufkommen (=Produktionsrate),
u	Eigenverkehrsanteil an der Produktionsseite,
v	vom Eigenverkehr beanspruchter Anteil des Verkehrsaufkom- mens der Attraktionsseite,
V	Gesamtverkehrsaufkommen,
Z	Zielverkehrsaufkommen, Spaltensumme der Verkehrsstromma- trix,
ZP	Potenzial des Zielbezirkes.
	Indizes:
e	Heimatverkehrsbezirk ,
g	Quelle-Ziel-Gruppe $g = 1 \dots N^{(g)}$,
i	Quellverkehrsbezirk,
j	Zielverkehrsbezirk,
l	Strukturgröße,
p	Personengruppe,
x'	Laufindex über alle Elemente mit $N^{(x)}$ als dem höchsten Index.

Produktion und Attraktion In der Literatur (z.B. ORTÚZAR et al. [36]) werden die Begriffe Verkehrsproduktion und Verkehrsattraktion benutzt. Diese Terminologie kann auf das Kennwertmodell angewandt werden. Das Teilmodell Produktion beschreibt die Beziehung von Personenanzahl, Spezifischem

QZG	QZG- Typ	Personengruppe Produktion	Strukturgröße(n) Attraktion	SV ⁽¹⁾
WA	1	Ewt	Bes	0,70
WK	1	K	KP	0,51
WB	1	Sch	SchP	0,90
WD	1	Ewt	BesT	0,03
WE	1	Einw	BesH	0,32
WF	1	Einw	BesF	0,48
WS	1	Einw	BesT und Einw	0,01
AW	2	Ewt	Bes	0,57
KW	2	K	KP	0,43
BW	2	Sch	SchP	0,82
DW	2	Ewt	BesT	0,05
EW	2	Einw	BesH	0,36
FW	2	Einw	BesF	0,49
SW	2	Einw	BesT und Einw	0,03
SA	3	Ewt	Q: BesT u. Einw, Z: Bes	0,06
AS	3	Ewt	Q: Bes, Z: BesT u. Einw	0,19
SS	3	Einw	Q: BesT u. Einw, Z: BesT u. Einw	0,26

Die Abkürzungen bedeuten: SV: Spezifisches Verkehrsaufkommen, Einw: Einwohner, Ewt: Erwerbstätige, K: Kinder, KP: Kinderbetreuungsplätze, Sch: Schüler, SchP: Schulplätze, Bes: Beschäftigte, BesT: Beschäftigte im tertiären Sektor (Verwaltung, Dienstleistung, Handel u.ä.), BesH: Beschäftigte im Einzelhandel, BesF: Beschäftigte in Freizeiteinrichtungen

⁽¹⁾ Quelle: MID 2003 für Frankfurt/Main [5]

Tabelle 2.2: Attribute von Quelle-Ziel-Gruppen (vgl. Tabelle 2.1)

Verkehrsaufkommen und der Menge der Ortsveränderungen. Das Spezifische Verkehrsaufkommen kann in diesem Sinne auch als Produktionsrate bezeichnet werden. Die Menge der Ortsveränderungen wird in einem ersten Schritt dem Heimatstandort der Personen zugeordnet.

Das Teilmodell Attraktion beschreibt die Anziehungskraft der Verkehrsbezirke auf die Verkehrsteilnehmer. Durch das Attraktionsmodell wird das Quell- und Zielpotenzial der Verkehrsbezirke bestimmt. Analog zu der Produktionsrate ist die Erzeugungsrate auch als Attraktionsrate aufzufassen.

Wegekettens versus QZG Für die Modellierung mit Hilfe von QZG wird eine Wegekette in eigenständige Ortsveränderungen zerlegt. Dadurch geht für die nichtheimgebundenen Ortsveränderungen der Bezug zum Wohnstandort und den sonstigen Standorten innerhalb der Wegekette verloren. Dies ist ein methodischer Nachteil bei der Verwendung homogener Schichten.

QZG-Typ	Heimat- verkehrsaufkommen	Quell- verkehrspotenzial	Gesamtverkehrs- aufkommen	Ziel- verkehrspotenzial
Typ 1	1. Schritt: Produktion $H_e = \sum_{p'} SV_{ep'} \cdot BP_{ep'} \cdot u_{ep'}$	2. Schritt: wie Produktion $QP_i = H_e$	3. Schritt: $V = \sum_{e'} H_{e'}$	4. Schritt: Attraktion verschiedene Varianten möglich, es gilt: $ZP_j = \frac{\sum_{i'} ER_{ji'} \cdot SZ_{ji'} \cdot v_{ji'}}{\sum_{j'} ER_{ji'} \cdot SZ_{ji'} \cdot v_{ji'}} \cdot V$
Typ 2	1. Schritt: Produktion $H_e = \sum_{p'} SV_{ep'} \cdot BP_{ep'} \cdot u_{ep'}$	4. Schritt: Attraktion verschiedene Varianten möglich, es gilt: $QP_i = \frac{\sum_{l'} ER_{li'} \cdot SQ_{li'} \cdot v_{li'}}{\sum_{i'} ER_{li'} \cdot SQ_{li'} \cdot v_{li'}} \cdot V$	3. Schritt: $V = \sum_{e'} H_{e'}$	2. Schritt: wie Produktion $ZP_j = H_e$
Typ 3 ohne RSA	1. Schritt: Produktion $H_e = \sum_{p'} SV_{ep'} \cdot BP_{ep'} \cdot u_{ep'}$	3. Schritt: Attraktion verschiedene Varianten möglich, es gilt: $QP_i = \frac{\sum_{l'} ER_{li'} \cdot SQ_{li'} \cdot v_{li'}}{\sum_{i'} ER_{li'} \cdot SQ_{li'} \cdot v_{li'}} \cdot V$	2. Schritt: $V = \sum_{e'} H_{e'}$	4. Schritt: Attraktion verschiedene Varianten möglich, es gilt: $ZP_j = \frac{\sum_{i'} ER_{ji'} \cdot SZ_{ji'} \cdot v_{ji'}}{\sum_{j'} ER_{ji'} \cdot SZ_{ji'} \cdot v_{ji'}} \cdot V$
Typ 3 mit RSA (QZG SS)	1. Schritt: Produktion $H_e = \sum_{p'} SV_{ep'} \cdot BP_{ep'} \cdot u_{ep'}$	3. Schritt: Attraktion verschiedene Varianten möglich, es gilt: $QP_i = \frac{\sum_{l'} ER_{li'} \cdot SQ_{li'} \cdot v_{li'}}{\sum_{i'} ER_{li'} \cdot SQ_{li'} \cdot v_{li'}} \cdot V$ $\cdot [1 - \frac{\Delta Q_{li}}{V}] + \Delta Q_i$	2. Schritt: $V = \sum_{e'} H_{e'}$	4. Schritt: Attraktion verschiedene Varianten möglich, es gilt: $ZP_j = \frac{\sum_{i'} ER_{ji'} \cdot SZ_{ji'} \cdot v_{ji'}}{\sum_{j'} ER_{ji'} \cdot SZ_{ji'} \cdot v_{ji'}} \cdot V$ $\cdot [1 - \frac{\Delta Z_j}{V}] + \Delta Z_j$

Tabelle 2.3: Kennwertmodell des Personenverkehrs, Basis: LOHSE et al. [33]. Die angegebenen Quell- und Zielverkehrspotenziale der QZG 1, 2 und 3 (ohne RandsummenAusgleich (kurz: RSA)) dienen lediglich der Orientierung, die Beschreibung des vollständigen Berechnungsansatzes erfolgt im Text.

Anhand der in Tabelle 2.4 gezeigten Auswertung zweier Mobilitätshebungen wird deutlich, dass der überwiegende Teil der Wegekettens (mehr als 75%) kurze Ketten sind, die ausschließlich heimgelundenen Ortsveränderungen aufweisen. Die 30 häufigsten Muster enthalten bereits rund 80% aller Ketten. Die übrigen Kettenmuster sind äußerst diffus und jedes Muster für sich ist eher ein seltenes Ereignis.

Bei einer kettenorientierten Modellierung wird für die Simulation jeder Ortsveränderung der gleiche rechentechnische Aufwand betrieben, und zwar unabhängig davon, ob diese Ortsveränderung eine häufiges Ereignis ist oder nicht. Nach den empirischen Ergebnissen in Tabelle 2.4 entfällt damit ein großer Teil des Berechnungsaufwandes auf die Simulation seltener Ereignisse.

Im Gegensatz dazu erfolgt die Einteilung in Quelle-Ziel-Gruppen in einer Weise, dass sich die Mehrheit der Gruppen auf die heimgelundenen Ortsveränderungen bezieht. Die seltenen Ortsveränderung ohne Bindung an den Wohnstandort werden in den QZG SA, AS und SS abgebildet und für diese QZG wird der Verlust des Bezuges zum Wohnstandort in Kauf genommen. Dieses Vorgehen beeinflusst aber die Rechenzeit positiv, denn der Berechnungsaufwand wird durch Teilmenge der seltene Ereignisse nicht wesentlich beeinflusst. Trotzdem existieren innerhalb des EVA-Modells auch für die nichtheimgelundenen Ortsveränderungen sowohl eine exakte Lösung im Rahmen einer möglichen kettenorientierte Modellierung als auch verschiedene Näherungsverfahren speziell für die QZG SA, AS und SS (siehe EVA-Modell Abschnitt 2.5).

Randsommenbedingungen für die Attraktionsseite Für die Produktionsseite gelten harte Randsommenbedingungen (kurz: RSB). Das bedeutet, dass die durch die Verkehrsverteilung ermittelten Verkehrsaufkommen den in der Erzeugung bestimmten Potenzialen entsprechen. Für die Attraktionsseite sind verschiedene Varianten von Randsommenbedingungen möglich.

Das Quell- bzw. Zielverkehrsaufkommen Q_i bzw. Z_j der Attraktionsseite ist abhängig von den verkehrsrelevanten raumstrukturellen Gegebenheiten des Bezirkes und dem Verkehrsangebot, wobei die Raumstruktur und das Verkehrsangebot *in unterschiedlichem Maße* auf die Verkehrsaufkommen einwirken (LOHSE et al. [33]). Im Modell wird das Verkehrsangebot mit Hilfe der Bewertungsgrößen und die Raumstruktur der Bezirke durch die Potenziale beschrieben.

Das EVA-Modell bietet die Möglichkeit, verschiedene Arten von Randsommenbedingungen (d.h. Varianten ohne und mit RSB) zu berücksichtigen. Die zu modellierende Planungsaufgabe determiniert den Berechnungsansatz für das Potenzial in der Verkehrserzeugung und die Art der Randsommenbedingungen

	SrV Städtepegel		MID 2002	
	abs.	%	abs.	%
Personen in der Stichprobe	13158		45796 ⁵	
Wegeketten				
Anzahl vollständige Ketten ¹	17749	100,0	67536	100,0
... darunter <i>ohne</i> Zwischenortsveränderung ²	13586	76,6	53630	79,4
... darunter mit <i>einer</i> Zwischenortsveränderung	2449	13,8	8942	13,2
... darunter mit <i>zwei und mehr</i> Zwischenortsveränderungen	1692	9,6	4963	7,3
Anzahl verschiedener Kettenmuster ³	603		3210	
Anzahl Ketten, die den 30 häufigsten Kettenmustern entsprechen	16158	91,0	57916	78,3
Ortsveränderungen				
Anzahl Ortsveränderungen	42477	100,0	172119	100,0
... darunter heimgelbundene ⁴	35498	83,6	144285	83,8
... darunter nichtheimgelbundene ⁴	6979	16,4	27834	16,2

¹ Vollständige Wegekette beginnen *und* enden an der eigenen Wohnung.
² Zwischenortsveränderungen sind diejenigen OV, die zwischen der heimgelbundenen Anfangs- und Endortsveränderung stattfinden, so z.B. AE in dem Muster WAEW.
³ Muster sind z.B. WEW, WFW, WAW, WAEW usw.
⁴ Heimgelbundene Ortsveränderungen beginnen *oder* enden an der eigenen Wohnung z.B. WA, AW, EW usw.
⁵ Nur mobile Personen
Quellen: eigene Auswertungen im SrV Städtepegel [4] und MID 2003 [5]

Tabelle 2.4: Aktivitätskombinationen in Wegekette

des Simultanmodells der Verteilung und Aufteilung sowie die Variante des Lösungsverfahrens (siehe 2.5.2). Das Verkehrsaufkommen ist dann letztlich ein Ergebnis der simultanen Verteilung und Aufteilung. Im folgenden Text werden die verschiedenen Berechnungsansätze für die Potenziale vorgestellt.

Eine **harte Randsummenbedingung** ist die klassische Variante, die auch in der Literatur (z.B. in ORTÚZAR et al. [36]) beschrieben wird („constraint“). Das Aufkommen ist ausschließlich von den Raumstrukturgrößen abhängig, das Verkehrsangebot ist unerheblich. In diesem Fall ergibt sich das Potenzial, z.B. für die Attraktionsseite vom QZG-Typ 1 (siehe Tab. 2.3)

$$ZP_j = \frac{\sum_{l'} ER_{jl'} \cdot SZ_{jl'} \cdot v_{jl'}}{\sum_{j'l'} ER_{j'l'} \cdot SZ_{j'l'} \cdot v_{j'l'}} \cdot V \quad .$$

Die Verkehrsstrommatrix ist so zu bestimmen, dass die Spaltensummen $Z_j = \sum_{i'l'} v_{i'jk'}$ und die Potenziale ZP_j hinreichend genau übereinstimmen

$$\begin{aligned} ZP_j &= Z_j \quad , \quad \text{bzw. in anderen QZG-Typen gilt} \\ QP_i &= Q_i \quad . \end{aligned}$$

Die harten RSB sind insofern ein Sonderfall, da für ein Verkehrsaufkommen ausschließlich die Raumstruktur maßgebend ist und somit das Verkehrsaufkommen bereits im Modellschritt Erzeugung abschließend bestimmt wird. Harte RSB sind bei allen Quelle-Ziel-Gruppen mit Pflichtaktivitäten anzuwenden, da die Lagegunst eines Standortes für die Zielwahl irrelevant ist.

Bei einer **elastischen Randsummenbedingung** ist das Verkehrsaufkommen sowohl von der Raumstruktur als auch vom Verkehrsangebot abhängig. Die Potenziale werden so bestimmt, dass – bezogen auf die Potenziale der harten RSB – eine Überlastung möglich ist. Es wird ein Überlastungsfaktor U für die Bestimmung der maximal zulässigen Überschreitung eingeführt:

$$ER_{jl}^{\max} = U_{jl} \cdot ER_{jl} \quad \text{und damit ist}$$

$$ZP_j = \left(\frac{\sum_{l'} ER_{jl'}^{\max} \cdot SZ_{jl'} \cdot v_{jl'}}{\sum_{j'l'} ER_{j'l'}^{\max} \cdot SZ_{j'l'} \cdot v_{j'l'}} \cdot V \right) \quad .$$

Der Wert ZP_j hat den Charakter eines Maximalwertes (maximale Aufnahmefähigkeit eines Verkehrsbezirkes), den die Spalten- bzw. Zeilensumme der Verkehrsstrommatrix im Fall eines bestmöglichen Verkehrsangebotes erreichen kann.

$$ZP_j \geq Z_j$$

Der Überlastungsfaktor U ermöglicht einen gleitenden Übergang zwischen Modellen mit und ohne Randsummenbedingungen. Im Fall $U = 1$ für alle Strukturgrößen aller Bezirke ergibt sich ein Modell mit harten RSB. Falls U sehr groß gewählt wird, dann nehmen die Potenziale zwar noch Einfluss auf die Aufteilung des Gesamtverkehrsaufkommens V auf die konkurrierenden Zielverkehrsbezirke, sie sind aber nicht mehr als Kapazitätsgrenzwerte wirksam. Die restriktive Wirkung der Randsummenbedingungen verliert immer mehr an Gewicht, so dass sich das Modell einem Ansatz ohne Randsummenbedingungen annähert.

Wenn die Nachfrage so ausgeprägt ist, dass noch über die maximale Kapazität hinaus eine Nachfrage für diesen Bezirk besteht, dann werden die Verkehrsteilnehmer notwendigerweise andere konkurrierende Verkehrsziele in anderen Verkehrsbezirken nutzen. Die Abbildung dieses Nutzerverhaltens ist Bestandteil des Algorithmus zur Lösung des Gleichungssystems des Simultanmodells. Ein typischer Anwendungsfall für elastische RSB ist die Modellierung von Einkaufsaktivitäten unter Beachtung der Größe, der (maximalen) Kundenkapazität und der Erreichbarkeit des Standortes.

Die elastische RSB berücksichtigt beispielsweise auch den Sachverhalt, dass ein Zielbezirk unattraktiver wird, wenn die Stellplätze des Bezirkes nahezu ausgeschöpft sind und folglich die Parksuchzeit überproportional ansteigt. Innerhalb des Algorithmus zur Lösung des Gleichungssystems der Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung wird dann zusätzlich eine Bewertungsgröße $g(Z_j)$ für die Kapazitätsauslastung eines Bezirkes bezüglich der Verkehrsnachfrage eingefügt (siehe LOHSE et al.[33] und SCHILLER [41]).

Im **Modell ohne Randsummenbedingung (Modifikation 1)**³ gehen neben dem Verkehrsangebot auch die Potenziale in die Berechnung der Verkehrsaufkommen ein. Die Potenziale haben jedoch nur einen Gewichts- und keinen Grenz- oder Sollwertcharakter. Der Ansatz zur Berechnung der Potenziale der Verkehrsbezirke ist identisch mit dem der harten RSB. Analog zu den harten RSB ist beispielsweise das Zielpotenzial eines Verkehrsbezirkes

$$ZP_j = \frac{\sum_{j'} ER_{jj'} \cdot SZ_{jj'} \cdot v_{jj'}}{\sum_{j',j''} ER_{jj'} \cdot SZ_{jj'} \cdot v_{jj'}} \cdot V \quad .$$

Das Verkehrsaufkommen der Verkehrsstrommatrix in einem **Modell ohne Randsummenbedingung (Modifikation 2)**⁴ ist ausschließlich vom Verkehrsangebot abhängig. Die Potenziale werden nicht beachtet. Das entspricht

³In LOHSE [33] wird diese Variante als offene RSB bezeichnet.

⁴In LOHSE [33] wird diese Variante als offene RSB(2) bezeichnet.

dem Fall, dass alle Bezirke über ein identisches konstantes Potenzial gleich Eins verfügen:

$$ZP_1 = ZP_2 = \dots = ZP_{N(j)} = 1 \quad .$$

Randsummenausgleich Man geht davon aus, dass die Wegekette einer Person im Verlauf eines Tages zum Wohnstandort zurückführen. Geringe Abweichungen von dieser Regel treten durch außerhäusige Übernachtungen auf (z. B. Dienst- oder Urlaubsreise) und werden über längere Zeiträume weitgehend ausgeglichen. Damit gilt für einen längeren „geschlossenen“ Zeitraum (z.B. für einen mittleren Werktag) für jeden beliebigen Verkehrsbezirk i über alle QZG g hinweg die verkehrsplanerisch sinnvolle Annahme der Identität der Quell- und Zielverkehrsaufkommen.

$$\sum_{g'} Q_{ig'} = \sum_{g'} Z_{jg'} \quad \text{wobei} \quad i = j$$

Verschiedene Unzulänglichkeiten in der Erhebung und Verwendung von Daten führen zu einer Unsymmetrie der Verkehrsaufkommen.

$$\sum_{g'} Q_{ig'} \neq \sum_{g'} Z_{jg'} \quad \text{für} \quad i \neq j$$

Bei Verkehrserhebungen entstehen durch die Stichprobenproblematik Datenfehler. An einem Stichtag erhobene, nicht geschlossene Wegekette führen dazu, dass nach Abschluss der Auswertung ein Unterschied zwischen den Verkehrsaufkommen der an der Wohnung beginnenden und der an der Wohnung endenden OV existiert und häufig unbemerkt in die Berechnung übernommen wird. In anderen praktischen Planungsfällen werden die erhobenen Kennziffern einer Stadt bzw. Region für andere Untersuchungsgebiete genutzt, obwohl sich die zwei Gebiete durch die Anteile der Personengruppen unterscheiden. Damit vergrößert oder verkleinert sich der Anteil bestimmter QZG am Gesamtverkehrsaufkommen, und diese Verschiebung kann ebenfalls zu der beschriebenen Unsymmetrie führen.

Es ist daher für einen *geschlossenen* Zeitraum sinnvoll, eine Ausgleichsrechnung (den Randsummenausgleich, kurz: RSA) durchzuführen, mit der die Unsymmetrie in eine Symmetrie überführt wird. Die Ausgleichsrechnung ist in der QZG SS⁵ (Sonstige Aktivität – Sonstige Aktivität) durchzuführen, da auch in der Realität dieser Ausgleich in dieser QZG stattfindet. Zunächst werden das

⁵Es ist auch denkbar, die Ausgleichsrechnung über alle QZG vom Typ 3 auszuführen.

Gesamtverkehrsaufkommen V und die „vorläufigen“ Quell- und Zielverkehrsaufkommen $\tilde{Q}P_i$ und $\tilde{Z}P_j$ der QZG SS auf der Basis der Strukturgrößen und Erzeugungsraten bestimmt:

$$\tilde{Q}P_i = \frac{\sum_{i'} ER_{i' i} \cdot SQ_{i' i} \cdot v_{i' i}}{\sum_{i' i'} ER_{i' i'} \cdot SQ_{i' i'} \cdot v_{i' i'}} \cdot V \quad (2.1)$$

bzw.

$$\tilde{Z}P_j = \frac{\sum_{j'} ER_{j j'} \cdot SQ_{j j'} \cdot v_{j j'}}{\sum_{j' j'} ER_{j' j'} \cdot SQ_{j' j'} \cdot v_{j' j'}} \cdot V$$

mit dem Gesamtverkehrsaufkommen V

$$V = \sum_{e'} H_{e'} = \sum_{e' p'} SV_{e' p'} \cdot BP_{e' p'} \cdot u_{e' p'} \quad .$$

Diese Potenziale werden dahingehend verändert, dass sie die Unsymmetrien der übrigen QZG ausgleichen. Die Summe GQ bzw. GZ der Verkehrsaufkommen aller QZG (ausgenommen der QZG SS) ist

$$GQ_i = \sum_{g', g' \neq N(g)} Q_{ig'} \quad , \quad GZ_j = \sum_{g', g' \neq N(g)} Z_{jg'} \quad .$$

Die Ausgleichspotenziale sind

$$\Delta QP_i = \max(0; GZ_j - GQ_i) \quad , \quad \Delta ZP_j = \max(0; GQ_i - GZ_j) \quad .$$

Das endgültige Potenzial der QZG SS ist

$$\begin{aligned} QP_i &= \tilde{Q}P_i \cdot \left(1 - \frac{\sum_{i'} \Delta QP_{i'}}{V}\right) + \Delta QP_i \quad \text{und} \\ ZP_j &= \tilde{Z}P_j \cdot \left(1 - \frac{\sum_{j'} \Delta ZP_{j'}}{V}\right) + \Delta ZP_j \quad . \end{aligned} \quad (2.2)$$

Drei praktische Voraussetzungen für die Durchführung des RSA sind zu beachten:

- Die Quell- und Zielverkehrsaufkommen Q_i und Z_j aller QZG sind bekannt. Daraus folgt, dass bei allen Randsummenvarianten (außer den harten RSB) der RSA erst durchgeführt werden kann, wenn die Verkehrsstrommatrizen der QZG bestimmt sind.

- Die Menge der Quell- und Zielbezirke ist identisch, d.h. es liegt ein räumlich geschlossenes Untersuchungsgebiet vor.
- Das Gesamtverkehrsaufkommen V der QZG SS ist ausreichend groß, um die in den übrigen QZG entstandenen Differenzen auszugleichen.

Eigenverkehr des Untersuchungsgebietes Durch die Eigenverkehrsanteile u der Produktionsseite bzw. v der Attraktionsseite des Kennwertmodells werden nur diejenigen Ortsveränderungen der Einwohner betrachtet, die vollständig im Untersuchungsgebiet realisiert werden. Ortsveränderungen, die das Untersuchungsgebiet verlassen bzw. gänzlich außerhalb durchgeführt werden, gehen nicht in die Berechnung der Verkehrsstrommatrix des Untersuchungsgebietes ein. Die Größe der Faktoren u bzw. v muss abgeschätzt werden. Der Wert ist abhängig von der Lage des Verkehrsbezirkes im Untersuchungsgebiet (Bezirke am Rand des Untersuchungsgebietes haben i. d. R. einen geringeren Eigenverkehrsanteil), von der Verkehrsbezirksgröße und der im Mittel realisierten Reisedistanz.

Abschließend folgt eine **Zusammenfassung** der verschiedenen Aspekte der eingeführten Begriffe **Potenzial** und **Verkehrsaufkommen**.

Die Potenziale QP_i und ZP_j

- sind Maßzahlen für die verkehrsrelevante Wirkung der Raumstruktur innerhalb der Verkehrsbezirke und
- werden im Modellschritt Erzeugung mit Hilfe eines Erzeugungsmodells ermittelt, wobei die Planungsaufgabe den Berechnungsansatz und folglich den „Charakter“ des Potenzials determiniert.
 - harte RSB: \rightarrow Potenzial = Sollwert
 - elastische RSB: \rightarrow Potenzial = oberer Grenzwert
 - ohne RSB (Modifikation 1): \rightarrow Potenzial = Gewicht
 - ohne RSB (Modifikation 2): \rightarrow Potenzial = \emptyset (*ohne Bedeutung*)

Die Verkehrsaufkommen Q_i und Z_j

- enthalten die Mengen der beginnenden und endenden Ortsveränderungen in den jeweiligen Verkehrsbezirken und es gilt daher:

$$Q_i = \sum_{j'} v_{ij'} \text{ (Quellverkehrsaufkommen),}$$

$$Z_j = \sum_{i'} v_{i'j} \text{ (Zielverkehrsaufkommen).}$$
- sind abhängig vom Verkehrsangebot der Verkehrsbeziehung und dem Potenzial der Bezirke und letztlich das Ergebnis der Verkehrsnachfrageberechnung.

2.2 Verkehrsverteilung

In der Verkehrsverteilung werden die Zielwahl der Verkehrsteilnehmer modelliert und somit die Verkehrsströme v_{ij} der Verkehrsstrommatrix bestimmt (Abbildung 2.1). Die Größen

$$Q_i = \sum_{j'} v_{ij'} \quad \text{und} \quad (2.3)$$

$$Z_j = \sum_{i'} v_{i'j} \quad (2.4)$$

sind die Verkehrsaufkommen der Verkehrsbezirke und die Randsummen der Matrix. Für die Bestimmung der Matrix sind die Randsummenbedingungen

$$QP_i = Q_i \quad \text{und} \quad (2.5)$$

$$ZP_j = Z_j \quad (2.6)$$

zu beachten. QP_i bzw. ZP_j sind die Potenziale der Bezirke und determiniert durch deren verkehrsrelevante Raumstruktur. Es ergibt sich im Allgemeinen ein

nach von	1	...	j	...	$N^{(j)}$	Σ
1	v_{ij}					Q_i
...						
i						
...						
$N^{(i)}$						
Σ	Z_j					V

Abbildung 2.1: Schema einer zweidimensionalen Verkehrsstrommatrix

hochgradig unbestimmtes Gleichungssystem mit $N^{(i)} \cdot N^{(j)}$ unbekannten Verkehrsströmen v_{ij} und $N^{(i)} + N^{(j)}$ Gleichungen der Randsummenbedingungen.

Für dieses Gleichungssystem können prinzipiell mehrere Lösungen existieren. Um eindeutige Lösungen zu erhalten, wurden durch die Fachwelt u. a. die folgende Lösungsansätze⁶ vorgeschlagen:

1. Entropieansatz,
2. Ansatz auf der Basis der Minimierung des Informationsgewinns,
3. Ansatz auf der Basis des BAYES'schen Axioms.

Die Ansätze 2 und 3 führen grundsätzlich zu dem gleichen Ergebnis.

2.2.1 Verkehrsverteilung nach dem Prinzip der Entropiemaximierung

Von WILSON [56] wurde bereits im Jahre 1967 ein Verkehrsverteilungsmodell vorgestellt, welches die Maximierung der Informationsentropie der Verkehrsstrommatrix als Grundannahme der Ableitung verwendet. Die Suche nach einer Verkehrsstrommatrix mit einer maximalen Informationsentropie bei vorgegebenen Quell- und Zielverkehrsaufkommen (siehe ORTÚZAR et al. [36]) ist in diesem theoretischen Kontext identisch mit der Suche nach derjenigen Verkehrsstrommatrix, die mit größter Wahrscheinlichkeit eintritt. Die Maximierung der Informationsentropie der Verkehrsstrommatrix führt unter Beachtung der Nebenbedingungen nach Gl. 2.5 und 2.6 zu einem Gleichungssystem, das häufig als Entropiemodell bezeichnet wird:

$$v_{ij} = \exp(\beta \cdot w_{ij}) \cdot f_{q_i} \cdot f_{z_j} \quad .$$

Der Ausdruck $\exp(-\beta \cdot w_{ij})$ wird verallgemeinernd als Bewertungsgröße BG bezeichnet mit dem Parameter β und dem Aufwand w_{ij} der Relation ij . Die Faktoren f_{q_i} und f_{z_j} sind die Unbekannten dieses Gleichungssystems. Sie werden als Bilanzfaktoren bezeichnet und sind so zu bestimmen, dass die Randsummenbedingungen erfüllt werden.

Bei diesem Ansatz wird unterstellt, dass sich die Verkehrsteilnehmer bei ihrer Zielwahl dem sehr allgemeinen Entropiemaximierungsprinzip (unbewusst) unterwerfen. Dies ist höchstwahrscheinlich unrealistisch. Daher wird die Modellableitung hier nicht im Detail ausgeführt und im Folgenden auch nicht weiter verwendet.

⁶Die wahrscheinlich ersten Lösungsansätze wurden durch Analogieschlüsse dem Gravitationsgesetz der Physik entlehnt. Deshalb werden die Verteilungsmodelle auch häufig als Gravitationsmodelle bezeichnet.

2.2.2 Verkehrsverteilung nach dem Prinzip der Informationsgewinnminimierung

Die Modellableitung über die Minimierung des Informationsgewinns ist eine wesentliche Basis der nachfolgend verwendeten Modellphilosophie und wird deshalb etwas ausführlicher dargestellt.

Die Verkehrsteilnehmer wählen mögliche Ziele unter Beachtung der Zielpotenzialverteilung im Untersuchungsgebiet und in Abhängigkeit ihrer Bewertung des Aufwandes zur Zielerreichung. Durch die im Allgemeinen ungleichmäßige Verteilung der Quell- und Zielpotenziale im Raum und infolge des sehr unterschiedlichen Aufwandes für die Zielerreichung entstehen Einschränkungen für die Wahlfreiheit der Verkehrsteilnehmer. Die Verkehrsteilnehmer sind jedoch bestrebt, möglichst wenig von ihrer eigenen Bewertung des Aufwandes (anders ausgedrückt: von ihrer „Zahlungsbereitschaft“ oder von dem „angestrebten“ Nutzen) abweichen zu müssen. Die restriktiven Einschränkungen werden durch die Randsummenbedingungen abgebildet. Die Bewertung des Aufwandes einer Relation ij durch die Verkehrsteilnehmer sei durch eine Bewertungsgröße BG_{ij} beschrieben.

Der Bewertungs- und Entscheidungsvorgang der Verkehrsteilnehmer kann als *Minimierung des Informationsgewinns* (siehe SCHÜRGER [46], S. 292) beschrieben werden. Im mathematischen Sinne stellt sich der Sachverhalt als ein Extremwertproblem mit Nebenbedingungen dar. In einer Arbeit von LAMOND et al. (vgl. [30]), in der eine von BREGMAN entwickelte Relaxationsmethode zur Lösung konvexer Optimierungsaufgaben und ihre Anwendung auf bestimmte Probleme der Verkehrsplanung erläutert werden, wird gezeigt, dass die zu einer Bewertungsmatrix BG_{ij} und Randsummenbedingungen der Form 2.5 und 2.6 gehörige Verkehrsstrommatrix v_{ij} auch als Lösung des konvexen Optimierungsproblems

$$I = \sum_{i'j'} \left[v_{i'j'} \cdot \ln \left(\frac{v_{i'j'}}{BG_{i'j'}} \right) \right] \rightarrow \min$$

unter Beachtung der Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} QP_i &= Q_i & \text{und} \\ ZP_j &= Z_j \end{aligned}$$

beschrieben werden kann. Durch Anwendung der Multiplikationsmethode von LAGRANGE auf das Optimierungsproblem mit den Randsummenbedingungen

von 2.5 und 2.6 kann die nachstehende LAGRANGE-Funktion entwickelt werden:

$$\begin{aligned} \Phi = & \sum_{i'j'} \left[v_{i'j'} \cdot \ln \left(\frac{v_{i'j'}}{BG_{i'j'}} \right) - v_{i'j'} \right] \\ & + \sum_{i'} \lambda_{i'} \cdot \left[\sum_{j'} v_{ij'} - QP_{i'} \right] + \sum_{j'} \mu_{j'} \cdot \left[\sum_{i'} v_{i'j} - ZP_{j'} \right] . \end{aligned}$$

Besitzt das System mindestens eine zulässige Lösung, so existiert auch eine eindeutig bestimmte optimale Lösung, die der Gleichung

$$\frac{\partial \Phi}{\partial v_{ij}} = \ln \left(\frac{v_{ij}}{BG_{ij}} \right) + \lambda_i + \mu_j = 0$$

und den Randsummenbedingungen genügt. Daraus folgt für die optimale Lösung

$$v_{ij} = BG_{ij} \cdot \exp(-\lambda_i) \cdot \exp(-\mu_j)$$

und letztendlich die Form des **Grundmodells der Verkehrsverteilung**

$$\boxed{v_{ij} = BG_{ij} \cdot f q_i \cdot f z_j} \quad (2.7)$$

mit harten Randsummenbedingungen

$$\begin{aligned} QP_i &= Q_i \quad , \\ ZP_j &= Z_j \quad . \end{aligned}$$

Da eine Matrix dieser Form durch die Randsummenbedingungen eindeutig bestimmt ist, stimmt sie mit der optimalen Lösung des Optimierungsproblems überein.

Die Minimierung des Informationsgewinns ergibt ein allgemeineres Modell, da hier die Bewertung eines Aufwandes nicht wie im Entropiemodell mit Hilfe einer Exponentialfunktion erfolgen *muss*, sondern frei gewählt werden kann.

Das Ergebnis dieser Ableitung ist identisch mit dem **bilinearen EVA-Modell** nach LOHSE [43]. In diesem Modell wird für die Bewertung des Aufwandes w sogenannte EVA-Funktion verwendet (diese Funktion werden ausführlicher im Abschnitt 2.6 vorgestellt). Möglich ist aber auch eine Kombination aus den Funktionswerten verschiedener Größen wie z.B.

$$BG_{ij} = F(RZ_{ij}) \cdot F(K_{ij}) \cdot F(E_{ij})$$

mit RZ – Reisezeit, K – Kosten und E – Entfernung. Für das bi- und trilineare EVA-Modell werden verschiedene Modellvarianten ausführlich im Abschnitt des EVA-Simultanmodells 2.5.2 beschrieben.

2.2.3 Verkehrsverteilung auf der Basis des Axioms von BAYES

Die Wahl eines Zielverkehrsbezirkes j durch einen Verkehrsteilnehmer für eine Ortsveränderung, ausgehend vom Quellverkehrsbezirk i , wird mit einer bedingten a-priori-Wahrscheinlichkeit BW_{ij} (Bewertungswahrscheinlichkeit der Relation ij bezüglich des Aufwandes aus der Sicht der Verkehrsteilnehmer) angenommen und mit der Wahrscheinlichkeit $1 - BW_{ij}$ abgelehnt (zur Ableitung des Modells siehe auch LOHSE [43]). Es werden folgende Ereignisse eingeführt:

A_i	Wahl des Verkehrsbezirkes i als eine potenzielle Quelle,
E_j	Wahl des Verkehrsbezirkes j als ein potenzielles Ziel,
W	Annahme einer Ortsveränderung ij bezüglich des zugehörigen Aufwandes,
\overline{W}	Ablehnung einer Ortsveränderung ij bezüglich des zugehörigen Aufwandes.

Wenn $P(\cdot)$ die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses bezeichnet, so können Bewertungswahrscheinlichkeiten BW_{ij} als bedingte Wahrscheinlichkeiten formuliert werden:

$$BW_{ij} = P(W|(A_i \cap E_j)) \quad \text{und} \quad \overline{BW}_{ij} = P(\overline{W} |(A_i \cap E_j)) = 1 - BW_{ij} \quad .$$

Durch die Bewertung der Verkehrsrelation ij wird die individuelle Entscheidungssituation durch die Verkehrsteilnehmer bezüglich des Angebots der Verkehrsinfrastruktur modelliert. Das Ereignisfeld besteht aus den aufgrund der „individuellen“ Bewertung des Aufwandes angenommenen und abgelehnten Ortsveränderungsereignissen

Ereignisfeld = [angenommene + abgelehnte] Ortsveränderungen O_{ij}

$$\begin{aligned} \tilde{v}_{ij} &= [v_{ij} + \bar{v}_{ij}] \\ &= [P(O_{ij} \cap W) + P(O_{ij} \cap \overline{W})] \cdot \tilde{V} \quad \text{mit} \quad \tilde{V} = \sum_{i'j'} \tilde{v}_{i'j'} \\ v_{ij} &= P(A_i) \cdot P(E_j) \cdot P(W|(A_i \cap E_j)) \cdot \tilde{V} \\ \bar{v}_{ij} &= P(A_i) \cdot P(E_j) \cdot P(\overline{W} |(A_i \cap E_j)) \cdot \tilde{V} \quad . \end{aligned}$$

Die angegebenen Wahrscheinlichkeiten ergeben sich unmittelbar aus der Definition des Ereignisfeldes und den elementaren Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Die Verkehrsströme entstehen durch eine Bewertung BW der

Aufwände durch die Verkehrsteilnehmer und unter gleichzeitiger Wirkung der Strukturpotenziale $P(A_i)$ und $P(E_j)$ sowie der im Gesamtsystem bestehenden Bilanzprobleme (Randsummenbedingungen).

Da für die Verkehrsnachfrageberechnung nur die angenommenen Ortsveränderungen interessieren, kann die Teilmenge V als neue Grundgesamtheit festgelegt werden. Wenn die Wahrscheinlichkeit einer angenommenen Ortsveränderung durch die totale Wahrscheinlichkeit der angenommenen Ortsveränderungen dividiert wird, erhält man eine Wahrscheinlichkeitsaussage für den Verkehrsstrom v_{ij} , die sich auf die neue Grundgesamtheit bezieht und genau dem BAYES'schen Axiom für bedingte Wahrscheinlichkeiten entspricht:

$$\begin{aligned} v_{ij} &= P((A_i \cap E_j)|W) \cdot V \\ v_{ij} &= \frac{P(A_i \cap E_j) \cdot P(W|(A_i \cap E_j))}{\sum_{i',j'} P(A_{i'} \cap E_{j'}) \cdot P(W|(A_{i'} \cap E_{j'}))} \cdot V \\ v_{ij} &= \frac{P(A_i) \cdot P(E_j) \cdot P(W|(A_i \cap E_j))}{\sum_{i',j'} P(A_{i'}) \cdot P(E_{j'}) \cdot P(W|(A_{i'} \cap E_{j'}))} \cdot V \quad . \end{aligned}$$

Im Falle von **harten Randsummenbedingungen** für die Quell- und Zielverkehrsaufkommen sind die bedingten Wahrscheinlichkeiten bereits über die Verkehrserzeugung durch

$$P(A_i|W) = \frac{QP_i}{V} \quad \text{und} \quad P(E_j|W) = \frac{ZP_j}{V}$$

festgelegt. Aus dem Verhältnis der unbedingten und bedingten Ereignisse für die Fahrtanfänge im Verkehrsbezirk i und für die Fahrtenden im Verkehrsbezirk j lassen sich Lagefaktoren q_i und z_j der Verkehrsbezirke ableiten:

$$q_i = \frac{P(A_i)}{P(A_i|W)} \quad \text{und} \quad z_j = \frac{P(E_j)}{P(E_j|W)} \quad .$$

Mit

$$P(A_i) = q_i \cdot P(A_i|W) \quad \text{und} \quad P(E_j) = z_j \cdot P(E_j|W)$$

entsteht

$$v_{ij} = \frac{P(A_i|W) \cdot q_i \cdot P(E_j|W) \cdot z_j \cdot P(W|(A_i \cap E_j))}{\sum_{i',j'} P(A_{i'}|W) \cdot q_{i'} \cdot P(E_{j'}|W) \cdot z_{j'} \cdot P(W|(A_{i'} \cap E_{j'}))} \cdot V \quad .$$

Für gegebene Bewertungswahrscheinlichkeiten $BW_{ij} = P(W|(A_i \cap E_j))$ und gegebene bedingte Wahrscheinlichkeiten $P(A_i|W) = QP_i/V$ und $P(E_j|W) = ZP_j/V$ sind die (zunächst unbekannten) Lagefaktoren q_i und z_j bzw. die Wahrscheinlichkeiten $P(A_i)$ und $P(E_j)$ und damit auch die Verkehrsströme v_{ij} grundsätzlich eindeutig bestimmt.

Durch mathematisch identische Umformungen und Zusammenfassungen ergibt sich das Grundmodell der Verkehrsverteilung mit harten Randsummenbedingungen in einer einfachen Schreibweise, welches

- die Bewertungen durch die Verkehrsteilnehmer und
- die harten Randsummenbedingungen, welche durch die Erzeugung bestimmt sind,

beachtet. Durch weiteres Zusammenfassen entsteht die Form des Grundmodells

$$v_{ij} = BW_{ij} \cdot \frac{QP_i}{V} \cdot q_i \cdot \frac{ZP_j}{V} \cdot z_j \cdot f = BW_{ij} \cdot fq_i \cdot fz_j$$

mit harten Randsummenbedingungen

$$\begin{aligned} QP_i &= Q_i \quad , \\ ZP_j &= Z_j \quad . \end{aligned}$$

Das wahrscheinlichkeitstheoretisch abgeleitete Verkehrsverteilungsmodell mit den Bilanzfaktoren q_i , z_j und f bzw. fq_i und fz_j stellt sich als bilineares Gleichungssystem mit Nebenbedingungen dar. Es ist letztlich identisch mit dem Modell, welches über die Informationsgewinnminimierung abgeleitet wurde. Die Bewertungswahrscheinlichkeit BW wird im folgenden Text – im Hinblick auf die Vergleichbarkeit mit den Strukturen anderer Modelle – als Bewertungsgröße BG bezeichnet.

Lösungsverfahren Zur Lösung des bilinearen Grundmodells stehen verschiedene spezielle Algorithmen zur Verfügung (FURNESS z.B. in ORTÚZAR et al. [36] oder der MULTI-Algorithmus, siehe LOHSE [43]).

2.3 Verkehrsaufteilung

Die Verkehrsströme v_{ijk} der Verkehrsarten k jeder Quelle-Ziel-Relation ij sind das Ergebnis der Verkehrsaufteilung. Es gibt zwei methodisch unterschiedliche Verfahrensweisen der Verkehrsaufteilung, die als Trip-End- und Trip-Inter-

change-Modelle bezeichnet werden. In einem Trip-End-Modell werden die Verkehrsaufkommen der Verkehrsbezirke auf die Verkehrsmittel – meist auf der Grundlage empirischer Daten und mit Kennwertmodellen – aufgeteilt und dann für jede Verkehrsart gesondert mit Hilfe eines Verteilungsmodells die Verkehrstrommatrix errechnet. In einem Trip-Interchange-Modell werden zuerst die Verkehrsströme v_{ij} der Relationen ij mit einem Verteilungsmodell berechnet und anschließend jeder Verkehrsstrom v_{ij} einzeln auf die Verkehrsmittel k mit einem speziellen Modell aufgeteilt. In dieser Arbeit wird nur auf das Trip-Interchange-Modell eingegangen.

Das wichtigste Aufteilungsmodell dieser Gruppe ist das multinomiale Logit-Modell. Darüber hinaus existieren aber weitere Logit-Modelle (Nested-Logit, Generalisiertes Logit, Hybrid-Logit etc.), die zusammenfassend auch als Logit-Modell-Familie bezeichnet werden (BEN AKIVA [8], MAIER et al. [35], THUST [50]). BOBINGER [13] hat eine Klassifizierung der Logit-Modelle angegeben. Einige Mitglieder dieser Modellfamilie (z.B. Nested-Logit-Modell) können mehrere Modellstufen vereinigen und werden als Simultanmodelle verwendet. Diese Modelle werden im Abschnitt 2.5 gesondert behandelt. BHAT [10] zeigt eine Zusammenstellung der Modellanwendungen der letzten fünf Jahre.

Die Logit-Modelle gehören zu den diskreten Wahlmodellen. Diskret bedeutet, dass der Verkehrsteilnehmer unter verschiedenen Alternativen nur *eine* Alternative wählen kann, d.h. die Alternativen können nicht zu beliebigen Anteilen gemischt werden.

Die Modelle diskreter Entscheidungen basieren auf der Annahme, dass Individuen ihren Nutzen maximieren. Welchen Nutzen die Individuen den einzelnen Alternativen zuordnen, kann jedoch nicht genau beobachtet werden. Deshalb bedient man sich der Zufallsnutzentheorie. Hierin wird der Nutzen als *Zufallsgröße* aufgefasst. Bei den Logit-Modellen unterliegt die Zufallsgröße immer einer Gumbel-Verteilung (auch: Extremwertverteilung Typ I). Die Gumbel-Verteilung hat günstige Eigenschaften für eine relativ leichte praktische Handhabung: sie sieht einer Normalverteilung ähnlich und die für die Modellierung notwendige Verteilung des Maximums der Zufallsgrößen lässt sich leicht ermitteln. Detaillierte Ausführungen zum Logit-Modell finden sich im Abschnitt A.1.

2.3.1 Multinomiales Logit-Modell (MNL)

Das multinomiale Logit-Modell wird sehr häufig für die Verkehrsaufteilung verwendet. Die Auswahlwahrscheinlichkeit für eine Alternative k (Verkehrsmittel

k) ist

$$\begin{aligned}
 P_k &= \frac{\exp(V_k)}{\sum_{k'} \exp(V_{k'})} = \frac{BG_k}{\sum_{k'} BG_{k'}} \\
 &= \frac{\text{Bewertung der Alternative } k}{\text{Summe der Bewertungen aller Alternativen}}.
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Die Größe V_k beschreibt den Nutzen (Nutzen = Maß für die Vorteilhaftigkeit), den der Verkehrsteilnehmer der Alternative k zuordnet. Für den Nutzen wird im allgemeinen folgende Struktur angenommen

$$V_k = \sum_{x'} \beta_{k,x'} \cdot w_{k,x'} \tag{2.9}$$

mit

$\beta_{k,x}$	Parameter, $\beta < 0$
$w_{k,x}$	Wert des x -ten Aufwandes für Alternative k .

Der Nutzen ist hier negativ, da er in zusammengefasster Form die Aufwände (=Kosten) der Verkehrsteilnehmer abbildet. Die Form des Nutzens – eine Linearkombination von Parametern und Aufwänden – wird auch als *Generalisierte Kosten* bezeichnet. Je nach Anwendung werden unterschiedliche Aufwände w verwendet. Beispiele für die Generalisierten Kosten sind in Abschnitt 2.6.2 dargestellt. Der Nutzen V_k einer Alternative k wird bei den Logit-Modellen mit einer Exponentialfunktion transformiert und damit in eine Bewertungsgröße umgewandelt. Die Elastizität dieser Bewertungsfunktion und die sich ergebenden Auswahlwahrscheinlichkeiten sind in Abschnitt 2.6.1 beschrieben.

2.3.2 Die IIA-Eigenschaft von Logit-Modellen

Eine wichtige Annahme bei der Ableitung bzw. Eigenschaft des Logit-Modells ist die der Unabhängigkeit von Alternativen. In der englischsprachigen Literatur wird diese als *Independence from Irrelevant Alternatives* – kurz IIA – bezeichnet. Die Eigenschaft besagt, dass das Verhältnis der Auswahlwahrscheinlichkeit von zwei Alternativen unabhängig von der Verfügbarkeit und Charakteristik anderer Alternativen ist. In diesem Kontext bedeutet das Wort unabhängig, dass der Nutzen anderer Alternativen das besagte Auswahlverhältnis *nicht* verändert, egal wie viele und welche anderen Alternativen in der Alternativenmenge enthalten sind oder hinzugefügt werden (MAIER et al. [35],

BEN AKIVA [7] S. 141). Ob ein Modell über die IIA-Eigenschaft verfügt, kann gezeigt werden, wenn es die Gleichung A.3 erfüllt (siehe Abschnitt A.1).

Für die Anwendung des MNL-Modells folgt daraus, dass die Alternativmenge nur unabhängige Alternativen enthalten darf. Im dem typischen Anwendungsfall einer Verkehrsaufteilung auf die elementaren Verkehrsarten Fuß, Rad, MIV und ÖV ist diese Forderung erfüllt, denn hier werden die zur Auswahl stehenden Alternativen als voneinander unabhängig betrachtet.

Im Abschnitt 2.4 wird auf das Problem der Routenwahl im Zusammenhang mit der IIA-Eigenschaft näher eingegangen. Um die bei manchen Anwendungen durch die IIA-Eigenschaft verursachten Probleme zu lösen, führt man in das Modell Alternativengruppen (engl: nests) ein. Ein Vertreter dieser Modelle ist das Nested-Logit-Modell. Diese Modelle sind im Abschnitt 2.5 beschrieben.

Beim **Probit-Modell** wird die Normalverteilung anstelle der Gumbel-Verteilung verwendet. Die Korrelationen zwischen den Alternativen werden berücksichtigt. Die Bestimmung der Auswahlwahrscheinlichkeit auf analytischem Wege ist speziell für den multinomialen Fall schwierig. Die numerische Behandlung ist ebenfalls aufwändig, so dass in der Literatur (z.B. MAIER et al. [35]) teilweise von der Anwendung des Probit-Modells regelrecht abgeraten wird. Deshalb wird das Modell hier nicht weiter betrachtet.

Das **Hybrid-Logit-Modell** (auch: Mixed-Logit-Modell oder Multinomiales Probit mit Logit-Kernel, siehe BEN-AKIVA et al. [7], ORTÚZAR et al. [36], RAMMING [38]) wurde entwickelt, um die Vorteile des Probit (Berücksichtigung von Korrelationen zwischen Alternativen) und des Logit-Modells (einfache analytische Form) zu verbinden. Der „deterministische“ Nutzen V wird zusätzlich zur Störgröße ϵ als normalverteilte, die Korrelation zwischen den Alternativen berücksichtigende Zufallsgröße aufgefasst.

Die Bestimmung der Auswahlwahrscheinlichkeit auf analytischem Wege ist schwierig. Deshalb müssen auch in einem Hybrid-Logit-Modell (normalverteilte) Zufallszahlen gezogen werden. Aus diesem Grund eignet sich das Hybrid-Logit-Modell nicht für die Integration in ein makroskopisches Simultanmodell und wird deshalb hier nicht weiter berücksichtigt.

2.4 Routenwahlmodelle

Die Routenwahlmodelle bilden die Routenwahl der Verkehrsteilnehmer ab und teilen den vorhandenen Verkehrsstrom v_{ijk} eines Verkehrsmittels k auf die in einem Verkehrsnetz vorgefundenen Routen r auf; es entstehen die Routenströme v_{ijk_r} . Die Verkehrsstärke einer Netzstrecke a der Verkehrsart k ergibt sich

als Summe derjenigen Routenströme v_{ijkr} , die über diese Strecke führen

$$M_{ak} = \sum_{i'j'r'} v_{i'j'kr'} \cdot \delta_{ar'} \cdot \pi \quad ,$$

wobei $\delta_{ar'}$ der Wert der Strecke-Route-Inzidenzmatrix ($\delta = 1$: Strecke a ist Teil der Route r , $\delta = 0$: sonst) und π der Besetzungsgrad der Fahrzeuge ist. Innerhalb des klassischen Vier-Stufen-Algorithmus ist die Routenwahl ein Teil der Umlegung.

Verkehrsstärkenabhängigkeit Innerhalb der Umlegung wird ein Gleichgewicht zwischen dem Angebot (Aufwände im Netzmodell) und der Nachfrage (Routenströme) angestrebt. Wenn die Aufwände verkehrsstärkenabhängig sind, ergibt sich das Problem, dass das Ergebnis der Routenwahl die ursprüngliche Eingangsgröße Aufwand verändert. Das erwünschte Gleichgewicht kann demnach nur mit Hilfe eines Iterationsverfahrens erreicht werden.

Die Berücksichtigung der Verkehrsstärkenabhängigkeit ist für den MIV die gängige verkehrsplanerische Praxis. Sie wird modelltechnisch realisiert, indem zwischen dem Aufwand (hier in der Regel die Reisezeit) und der Auslastung der Strecken- oder der Knotenkapazität ein funktionaler Zusammenhang hergestellt wird (Kapazitätsbeschränkungsfunktion, siehe Kapitel 3). Im klassischen Fall einer ÖV-Umlegung (Verkehrsstärkenunabhängigkeit) wird nur ein Iterationsschritt ausgeführt. Für die Verkehrsart ÖV ist allerdings die Berücksichtigung der Verkehrsstärke ebenso möglich. Die Attraktivität einer Route sinkt z.B. bei einem hohen Fahrzeugbesetzungsgrad. Fahrgäste müssen unter Umständen abgewiesen werden, wenn reservierungspflichtige Züge ausgebucht sind. Die tatsächliche Fahrzeit zwischen Haltestellen von straßengebundenen ÖV-Fahrzeugen ohne gesonderte Fahrspur ist abhängig von der MIV-Auslastung dieser Strecke bzw. der Knoten. Für die modelltechnische Umsetzung einer kapazitätsabhängigen Umlegung ist es dann notwendig, die Auslastung zu berücksichtigen und mehrere Iterationsschritte auszuführen. Dieses kapazitätsabhängige Verfahren einer ÖV-Umlegung wird jedoch seltener praktiziert (ORTÚZAR et al. [36]).

Die im MIV, Fußgängerverkehr, Radverkehr und im ÖV verwendeten Routenwahlmodelle sind identisch. In den folgenden Abschnitten wird deshalb nicht mehr zwischen den ÖV- und MIV-Umlegungen unterschieden.

Ablauf Die meisten verkehrsstärkenabhängigen Umlegungsverfahren haben einige Gemeinsamkeiten:

- Der Zusammenhang zwischen Aufwand und Verkehrsstärke wird mit einer Kapazitätsbeschränkungsfunktion beschrieben. Der Aufwand steigt an, wenn sich der Wert der Verkehrsstärke dem Wert der Streckenkapazität nähert (siehe Abschnitt 3.1).
- In der Praxis wird häufig mit Bestwegroutensuchverfahren gearbeitet, obwohl Mehrwegalgorithmen bekannt und die Verwendung auch ausdrücklich vorgeschlagen wird (LOHSE [43]). Der Grund hierfür liegt darin, dass der Bestwegalgorithmus algorithmisch einfach sowie weniger rechenzeit- und speicherplatzintensiv ist und folglich leicht in Softwareprodukte implementiert werden kann.
- In verkehrsstärkenabhängigen Umlegungsverfahren wird der Quelle-Ziel-Strom trotz Anwendung eines *Bestweg*algorithmus auf mehrere Routen umgelegt. Die Kapazitätsbeschränkungsfunktion bewirkt, dass die Aufwände der im aktuellen Iterationsschritt gefundenen Routen ansteigen. Im Nachfolgeschritt können damit unter Umständen neue Routen gefunden werden.
- Die Iteration wird solange durchgeführt, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist.

Die Abbildung 2.2 zeigt einen Ablaufplan für eine verkehrsstärkenabhängige Umlegung.

Überlappende Routen Wenn Routen über gemeinsame Teilrouten verfügen, dann werden diese Teilrouten während der ersten Iterationsschritte stärker belastet und der Aufwand steigt an. In nachfolgenden Iterationsschritten tritt ein Verdrängungseffekt auf. Die Abhängigkeit von Routen in verkehrsstärkenabhängigen Umlegungen wird – unabhängig von dem verwendeten Routenwahlmodell – folglich prinzipiell berücksichtigt. In den Verkehrsarten ohne Verkehrsstärkenabhängigkeit fehlt diese Rückkopplung. Falls die Abhängigkeit dann auch im Routenwahlmodell unberücksichtigt bleibt, führt das im Falle abhängiger Routen zu problematischen Ergebnissen. Ansätze zur Berücksichtigung der Abhängigkeit werden im Abschnitt 2.4.3 vorgestellt.

Gleichgewicht In der Literatur werden die Begriffe stochastisches und deterministisches Gleichgewicht bzw. Modell benutzt (SHEFFI [48]). In beiden Fällen wird davon ausgegangen, dass jeder Verkehrsteilnehmer die Alternative mit dem größten Nutzen wählt.

Im Falle eines *deterministischen Gleichgewichts* wird angenommen, dass

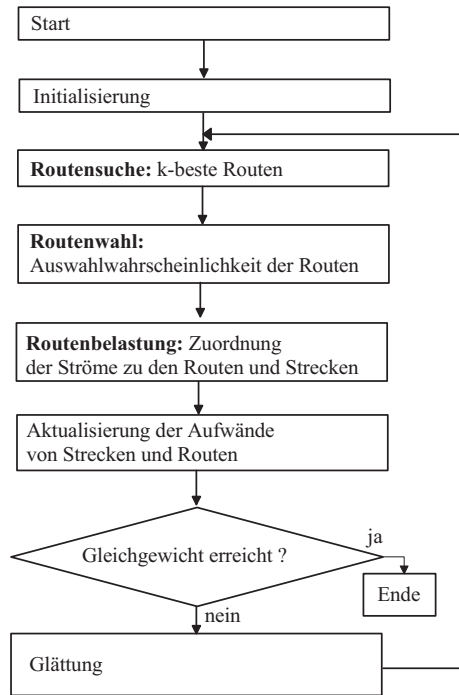


Abbildung 2.2: Schematischer Ablauf einer verkehrsstärkenabhängigen Umleitung

jeder Fahrer die *tatsächlichen* Aufwände aller Routen kennt und dadurch befähigt ist, die objektiv beste Route zu wählen. Bezogen auf das Kollektiv der Verkehrsteilnehmer wird angenommen, dass alle über eine identische Definition von „die beste Route“ verfügen. Der Gleichgewichtszustand ist erreicht, wenn kein Fahrer durch einen Wechsel auf eine andere Route seinen Aufwand verringern kann.

Bei einem *stochastischen Gleichgewicht* wird von unvollständiger bzw. unpräziser Information und einer subjektiven Bewertung ausgegangen. Es wird unterstellt, dass die Entscheidung des Nutzers von einem *wahrgenommenen* Aufwand abhängt. Die Größe des wahrgenommenen Aufwandes ist wiederum de-

terminiert durch den exakten Aufwand *und* durch einen Zufallseinfluss⁷. Der Gleichgewichtszustand ist erreicht, wenn kein Fahrer glaubt, durch einen Wechsel auf eine andere Route seinen wahrgenommen Aufwand verringern zu können. Betrachtet man nun das Kollektiv der Fahrer, dann werden in diesem Verfahren viele attraktive und nicht nur die eine objektiv beste Alternativen ausgewählt.

Im Hinblick auf die Realität ist sowohl die Annahme unvollständiger Information als auch die Annahme einer subjektiven Bewertung ein vernünftiger Ansatz. Dafür sprechen folgende Überlegungen:

- *Prozessaspekt*: Der Verkehr selbst ist eine stochastische Größe und der tatsächliche Aufwand ist bei Fahrtantritt unbekannt.
- *Physiologischer Aspekt*: Verkehrsteilnehmer besitzen kein Sinnesorgan zur Zeitmessung. Sie können die Reisezeit nur schätzen, wobei ihre Schätzung möglicherweise auch noch eine gewisse Körnigkeit (Schätzung nur als ganzzahlige Werte oder sogar nur in einem 5-Minuten-Raster) aufweist.
- *Psychologischer Aspekt*: Die Auffassungen darüber, welche Kriterien (Reisezeit, Entfernung, Anzahl Signalanlagen, Anzahl Linksabbiegevorgänge etc.) eine „beste Route“ auszeichnen, sind von Mensch zu Mensch unterschiedlich. Die Bewertung der Aufwände durch den Menschen ist subjektiver Natur.
- *Technischer Aspekt*: Es mangelt an einer flächendeckenden und vollständigen Information über Reisezeiten aller Routen und zwar sowohl auf der Seite der Informationssender (Erfassung und Senden von Routenwahlvorschlägen) als auch auf der Seite der Informationsempfänger (technische Ausrüstung der Verkehrsteilnehmer einschließlich dem Willen zur Befolgung der empfangenen Vorschläge).

In der Modellierung wird die Art des Gleichgewichtes durch das Wahlmodell determiniert. Die stochastischen bzw. deterministischen Modelle werden im Abschnitt 2.4.1 bzw. 2.4.2 vorgestellt.

2.4.1 Stochastische Routenwahlmodelle

In der *analytisch-stochastischen* Modellierung von Entscheidungen wird für die Zufallsgröße, die die Alternativen charakterisiert, eine bestimmte Verteilung

⁷Zufallseinfluss ist hier so zu interpretieren, dass die Verkehrsteilnehmer die Aufwände nur schätzen und ihnen bei dieser Schätzung zufällig verteilte Fehler unterlaufen.

unterstellt. Ein Beispiel für ein analytisch-stochastisches Modell ist das Logit-Modell (siehe MAIER et al. [35]). Die Voraussetzung für die Anwendung von Modellen dieser Art ist die Kenntnis der zur Verfügung stehenden Routen einschließlich ihrer wesentlichen Merkmale. Die Modelle unterscheiden sich lediglich durch die Bewertungsfunktion. Für alle analytisch-stochastischen Modelle gilt, dass sich die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative r ergibt durch

$$P_r = \frac{F(w_r)}{\sum_{r'} F(w_{r'})} \quad . \quad (2.10)$$

Die Eigenschaften der verschiedenen Bewertungsfunktionen $F(w)$ werden im Abschnitt 2.6.1 gemeinsam mit den Bewertungsfunktionen von Simultanmodellen dargestellt.

Multinomiales Logit-Modell Das Modell ist identisch mit dem Aufteilungsmodell und wurde bereits im Abschnitt 2.3 vorgestellt. Die Bewertung einer Routenalternative r mit dem Aufwand w (im Logit-Modell der Nutzen $V_r = \sum_{x'} \beta_{r,x'} \cdot w_{r,x'}$) erfolgt mit einer Exponentialfunktion

$$F(V_r) = \exp(V_r) \quad .$$

Modifikation mit einer Potenzfunktion Dieses Modell unterstellt eine Potenzfunktion für die Bewertung des Aufwandes w einer Route

$$F(w_r) = w_r^{-\alpha} \quad .$$

Es lässt sich leicht zeigen, dass dieses Modell eine Variante des Logit-Modells ist, denn die Bewertung mittels Potenzfunktion lässt sich in eine Bewertung mittels Exponentialfunktion transformieren

$$F(w_r) = w_r^{-\alpha} = \exp(\ln(w_r^{-\alpha})) = \exp(V_r) \quad .$$

Die Wertebereiche für α sind in der Literatur angegeben (z.B. LOHSE [43], S. 295). Sie sind abhängig von der Art des zu untersuchenden Raumes (Stadtnetz, Fernstraßennetz) und stellen so einen Zusammenhang zur absoluten Länge bzw. absoluten Reisezeit einer Route her.

Weitere Modifikationen des Logit-Modells In LOHSE [43] ist ein auf die Routenwahl spezialisiertes Modell angegeben. Die Bewertungsfunktion $F(w_r)$ in Gl. 2.10 ist

$$F(w_r) = \exp \left[- \left(\beta^2(w^{\min}) \cdot \left(\frac{w_r}{w^{\min}} - 1 \right)^2 \right) \right]$$

mit $w^{\min} = \min_{r'}(w_{r'})$. Für β wird eine heuristische Funktion vorgeschlagen, welche von dem absoluten Aufwand (hier in Minuten) der aufwandsgeringsten Route der Relation abhängig ist:

$$\beta = f(w^{\min}) = \frac{E}{1 + \exp(F - G \cdot w^{\min})} \quad (2.11)$$

mit den Parametern $E = 12$, $F = 0,7$ und $G = 0,015$. Der Graph der β -Funktion ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Die Umwandlung des Exponenten 2 in eine Variable γ , $\gamma > 1$ ermöglicht eine zusätzliche Variabilität.

Aufteilung nach Bestweghäufigkeit Die Aufteilung des Verkehrstroms v_{ijk} erfolgt proportional zu der Häufigkeit des Auffindens als Bestweg.

$$P_r = \frac{\text{Häufigkeit von Route } r \text{ als Bestweg}}{\text{Gesamtzahl der Versuche bzw. Iterationen}} = \frac{h_r}{N(n)}$$

Bei einer ausreichend großen Zahl von Experimenten ist die Wahlhäufigkeit einer Route der Auswahlwahrscheinlichkeit gleichzusetzen. Dieser Ansatz wird innerhalb der Monte-Carlo-Simulation oder des Lernverfahrens mit Bestweg-routensuche verwendet.

Umlegung mit Monte-Carlo-Simulation Eine Alternative zum analytischen Vorgehen ist die Monte-Carlo-Simulation (kurz: MC-Simulation). Bei dieser Methode wird eine große Zahl von Zufallsexperimenten durchgeführt. In jedem dieser Experimente wird den Alternativen eine Zufallszahl zugeordnet. Nach Abschluss aller Experimente ist die relative Wahlhäufigkeit der Alternativen bekannt, und die Auswahlwahrscheinlichkeit kann abgeleitet werden (Bestweghäufigkeit). Verschiedene Autoren haben verschiedene Ansätze beschrieben (FALKENHAUSEN [20], BURRELL [16], SHEFFI et al. [47]).

Für die technische Umsetzung bedeutet dies, dass den Streckenaufwänden (in anderen Verfahren auch den Routenaufwänden) eine Zufallszahl, die einer Gleichverteilung, einer logarithmischen Normalverteilung oder einer Normalverteilung unterliegt, zugeordnet wird. Wenn eine Verkehrsstärkenabhängigkeit vorgesehen ist, dann wird der verkehrsstärkenabhängige Aufwand zum Mittelwert der Verteilung erklärt. Die Streuung bzw. der relative Fehler muss durch den Nutzer vorgegeben werden. Bei dieser Art von Monte-Carlo-Simulation tritt der sogenannte Seiteneffekt auf. Das bedeutet, dass die Auswahlwahrscheinlichkeit nicht allein vom Routenaufwand, sondern auch von der Anzahl der zur Route gehörenden Strecken abhängig ist.

FALKENHAUSEN nimmt eine Abschätzung der notwendigen Wiederholungen der Schätzung vor. Unter der Bedingung, dass der Routenstrom einer Route mit einer Sicherheit von 95% richtig abgebildet werden soll, ermittelt er (bei einem sehr einfachen Netzmodell!) mehr als 1000 notwendige Schritte. Deshalb schlägt FALKENHAUSEN vor, die Wiederholungen nur so häufig auszuführen, bis die relative Änderung der Verkehrsstärke (Änderung zum Vorgängerschritt) einer Strecke geringer wird als ein Grenzwert. Die Prüfung ist für alle Strecken vorzunehmen.

Die Vorteile der MC-Simulation liegen darin, dass sehr viele sinnvolle Routen gefunden werden können und die Abhängigkeit von Routen berücksichtigt wird. Nachteilig an der MC-Simulation gegenüber den analytischen Ansätzen (z.B. Logit-Modell) ist die Laufzeit. Für die Integration eines Routenwahlmodells in ein makroskopisches Nachfragemodell – das ist das Ziel dieser Arbeit – ist deshalb der Ansatz der MC-Simulation wenig nützlich.

Prinzipiell ist auch ein Verfahren denkbar, in welchem die MC-Simulation lediglich zur Generierung von Routen verwendet wird und die Routenwahl selbst mit einem anderen stochastischen Modell (Logit-Modell etc.) erfolgt. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten MC-Simulationen (siehe Kapitel 4) und die Arbeit von RAMMING [38] zeigen, dass die Simulation als Verfahren zur Routenerzeugung durchaus geeignet ist. Für das gewählte Routenwahlmodell ist im einzelnen zu prüfen, ob es die Abhängigkeit von Routen berücksichtigt.

Stochastisches Gleichgewicht als Optimierungsaufgabe SHEFFI [48] stellt das stochastische Nutzergleichgewicht als Optimierungsaufgabe dar (siehe auch BEKHOR [6], VRTIC [55]). Es bedeuten:

c_a	verkehrsstärkenabhängige Kosten der Strecke a ,
	$c_a = c(M_a)$,
C_r^{ij}	verkehrsstärkenabhängige Kosten der Route r ,
	$C_r^{ij} = \sum_{a'} c_{a'} \cdot \delta_{a'r}^{ij}$,
$\mathbf{C}^{ij} = (C_r^{ij})$	Vektor der Kosten aller Routen von i nach j ,
δ_{ar}	Wert der Strecke-Route-Inzidenzmatrix ($\delta = 1$: Strecke a ist Teil der Route r der Relation ij , $\delta = 0$: sonst),
M_a	Verkehrsstärke der Strecke a ,
	$M_a = \sum_{r'} v_{ijr'} \cdot \delta_{ar'}^{ij}$,
$\mathbf{M} = M_a$	Vektor der Verkehrsstärken aller Strecken,

P_{ijr}	Routenauswahlwahrscheinlichkeit für Route r der Relation ij , $P_{ijr} = \text{Prob}(C_r^{ij} \leq C_s^{ij}) \quad \forall r \neq s$,
$S[\mathbf{C}(\mathbf{M})]$	erwartete wahrgenommene Kosten, $S[\mathbf{C}(\mathbf{M})] = E[\min_r \{C_r^{ij}\} \mathbf{C}(\mathbf{M})]$,
v_{ijr}	Rutenstrom der Route r der Relation ij , $v_{ijr} = v_{ij} \cdot P_{ijr}$, $v_{ijr} \geq 0$.

Es wird ein stochastisches Nutzergleichgewicht erreicht, wenn die folgende Optimierungsaufgabe gelöst wird:

$$\begin{aligned} \min_M z(\mathbf{M}) = & - \sum_{i'j'} v_{i'j'} \cdot S_{i'j'}[\mathbf{C}^{i'j'}(\mathbf{M})] \\ & + \sum_{a'} M_{a'} \cdot c_{a'}(M_a) - \sum_{a'} \int_0^{M_{a'}} c_{a'}(M) dM \quad . \end{aligned} \quad (2.12)$$

Das stochastische Gleichgewicht kann als eine Verallgemeinerung des deterministischen Nutzergleichgewichtes aufgefasst werden.

2.4.2 Deterministische Routenwahlmodelle

Das folgende abstrakte Prinzip von WARDROP wurde zur Basis für eine Reihe von Umlegungsalgorithmen:

Durch die Verkehrsteilnehmer werden alle Routen einer Relation so lange erkundet, bis durch einen Wechsel auf eine alternative Route keine Aufwandsverringerung mehr möglich ist. Folglich wählt jeder Fahrer die Route mit dem geringsten Aufwand. Es stellt sich ein Zustand ein, bei dem alle benutzten Routen über den gleichen minimalen und die nichtbenutzten Routen über einen höheren (im Grenzfall auch den minimalen) Aufwand verfügen.

Im mathematischen Sinne ist die Lösung dieser Aufgabe äquivalent zur Lösung der folgenden Optimierungsaufgabe

$$\min_M z(\mathbf{M}) = \sum_{a'} \int_0^{M_{a'}} T_{a'}(M) dM \rightarrow \min \quad (2.13)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\sum_{r'} v_{ijr'} = v_{ij} \quad \text{für alle } i, j$$

$$v_{ijr} \geq 0 \quad \text{für alle } i, j, r$$

mit

M_a Verkehrsstärke der Strecke a ,
 $T_a(M)$ verkehrsstärkenabhängige Reisezeit der Strecke a .

Algorithmen zur Lösung des Problems (Method of Successive Average [MSA], Frank-Wolfe-Algorithmus) sind z.B. in SHEFFI [48], PATRIKSSON [37], ORTÚZAR et al. [36] und BOBINGER [13] angegeben. Es stellt sich eine Stromaufteilung ein, die die oben genannte Bedingung erfüllt. Die Iteration wird abgebrochen, wenn sich die Routenaufwände nur noch um einen definierten Betrag voneinander unterscheiden.

Das deterministische Nutzergleichgewicht ist ein Sonderfall des stochastischen Nutzergleichgewichtes. Unter bestimmten Bedingungen führt eine deterministische Gleichgewichtsumlegung zu einer Bestwegumlegung⁸, und zwar

- in Netzen mit einer geringen Nachfrage (in diesem Fall reicht die Nachfrage nicht aus, den Aufwand der besten Route so weit ansteigen zu lassen, dass auch eine zweite Route gefunden und damit auch benötigt wird) und
- bei Umlegungen ohne Verkehrsstärkenabhängigkeit (z.B. ÖV).

Lernverfahren nach LOHSE Das Lernverfahren von LOHSE auf der Basis von Bestwegalgorithmen strebt (theoretisch) zum deterministischen Gleichgewicht. Durch die spezielle Schrittweitenoptimierung des Verfahrens und ein Abbruchkriterium, welches einem stochastischen Nutzergleichgewicht genügt, werden im Allgemeinen etwas mehr Routen gefunden. Auf diese Weise wird ein Zustand erreicht, der dem stochastischen Gleichgewicht näher kommt. In diesem Sinne ist das Lernverfahren zwischen den deterministischen und stochastischen Modellen einzuordnen. Eine Beschreibung des Verfahrens findet sich in LOHSE [43].

Die Routensuche erfolgt mit einem Bestwegalgorithmus. Die Routenwahl erfolgt mit dem Modell der Bestweghäufigkeit, d.h. die Auswahlwahrscheinlichkeit P_r für eine Route r nach $N^{(n)}$ Schritten ist $P_r = h_r/N^{(n)}$. Durch die

⁸Der Verkehrsstrom wird nur auf die aufwandsgeringste Route umgelegt. Dieses Verfahren ist als Alles-oder-Nichts-Umlegung bzw. All-or-Nothing-Assignment bekannt.

Schrittweitenoptimierung mittels einer empirisch modifizierten exponentiellen Glättung wird eine stabile und schnelle Konvergenz erreicht. Bei der Abbruchprüfung wird jede Strecke dahingehend untersucht, ob die relative Änderung eines Prüfwertes im Vergleich mit dem Wert des Vorgängerschritt geringer ist als ein Grenzwert (siehe auch Abschnitt 4).

Dadurch, dass auch Routen mit einem geringfügig höheren Aufwand zulässig sind, werden insgesamt mehr Routen gefunden als bei einer Umlegung mit exaktem deterministischen Gleichgewicht. Dieser Umstand wurde durch Stichproben an einem Netzmodell für den Raum Dresden und Umland bestätigt. Die höhere Zahl von Routen verbunden mit einer Annäherung an ein stochastisches Nutzergleichgewicht und einer schnellen Konvergenz sind die Hauptvorteile dieses Verfahrens. Allerdings strebt in Netzen mit geringer Nachfrage auch dieses Verfahren zu einer Bestwegumlegung.

Wenn das Lernverfahren nach LOHSE mit einem Mehrwegalgorithmus und einem stochastischen Aufteilungsmodell für die Routenwahl gekoppelt wird (siehe LOHSE [43]), entsteht ein Umlegungsverfahren mit einem stochastischen Nutzergleichgewicht.

2.4.3 Abhängigkeit von Routen

Im Abschnitt 2.3.1 wurde in das Problem der IIA-Eigenschaft eingeführt. Um zu illustrieren, in welchen Fällen diese Eigenschaft zu unplausiblen Ergebnissen führt, wird häufig das *red bus/blue bus-Paradoxon* im Kontext der Verkehrsmittelwahl zitiert. Ein anschaulicheres Beispiel ist in BEN AKIVA et al. [7] dargestellt und wird hier zur Verdeutlichung des Problems wiedergegeben.

Beispiel zur IIA-Eigenschaft Gegeben sei eine Netzmasche nach Abbildung 2.3 mit insgesamt drei alternativen Routen $\{1, 2a, 2b\}$. Es wird angenommen, dass für den Nutzer nur die Reisezeit zwischen der Quelle und dem Ziel von Bedeutung ist. Die Reisezeit sei identisch für alle drei Routen $T_1 = T_{2a} = T_{2b} = T$. Die Reisezeit auf den kurzen Teilrouten a, b sei ebenfalls identisch und wird mit δ bezeichnet. Die Nachfrage zwischen Quelle und Ziel ist konstant.

Bei Anwendung des MNL-Modells erhält man für die Auswahlwahrscheinlichkeit der einzelnen Routen

$$\begin{aligned} P(1|1, 2a, 2b) &= P(2a|1, 2a, 2b) = P(2b|1, 2a, 2b) \\ &= \frac{\exp(-\beta T)}{\sum_{j \in \{1, 2a, 2b\}} \exp(-\beta T)} = \frac{1}{3} \end{aligned}$$

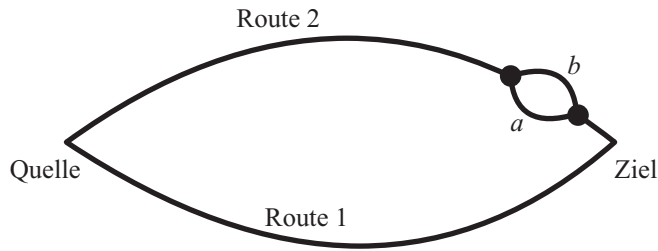


Abbildung 2.3: Netzmasche mit zwei abhängigen Routen und einer unabhängigen Route

Das Resultat ist unabhängig vom Wert δ . Wenn jedoch der δ -Wert sehr viel kleiner als die Gesamtreisezeit ist, wird man eher zu dem Urteil gelangen, dass es sich hier eigentlich nur um zwei (Haupt-)Routen handelt, von denen eine über eine unbedeutende Verzweigung verfügt. In diesem Fall erwartet man, dass sich die Wahrscheinlichkeiten den Werten 50%, 25%, 25% annähern. Dieses Ergebnis erhält man allerdings nicht bei einer typischen und einfachen Anwendung des MNL-Modells.

Die Ursache für die „Fehlleistung“ bei der Modellanwendung ist, dass die Forderung nach der Unabhängigkeit zwischen den betrachteten Alternativen verletzt worden ist. Zwischen den Alternativen 2a und 2b gibt es eine signifikante Korrelation, denn ein großer Anteil der Gesamtreisezeit entsteht auf gemeinsam genutzten Strecken. Die Routen 2a und 2b sind nicht unabhängig, sondern sehr ähnlich.

Ansätze zur Berücksichtigung von Abhängigkeit

Routen mit gemeinsamen Teilrouten (d.h. abhängige Routen) werden von den Verkehrsteilnehmern nicht als vollwertige Alternativen wahrgenommen. Folglich ist die Auswahlwahrscheinlichkeit abhängiger Routen geringer als jene, die sich bei ausschließlicher Berücksichtigung des Aufwandes ergäbe. Im folgenden Text werden einige Ansätze zur Berücksichtigung der Abhängigkeit von Routen vorgestellt. Die Verwendung dieser Modelle ist insbesondere dann unerlässlich, wenn die Routenströme mit einem stochastischen Routenwahlmodell ohne Verkehrsstärkenabhängigkeit bestimmt werden.

PS-Logit-Modell BEN-AKIVA et al. beschreiben in [9] bzw. [7] ein Path-Size-Logit-Modell (kurz: PS-Logit-Modell). Die Basis bildet ein multinomiales Logit-Modell, wobei der Nutzen um einen PS-Faktor ergänzt wird:

$$P_r = \frac{\exp(V_r - \ln PS_r)}{\sum_{r'} \exp(V_{r'} - \ln PS_{r'})} = \frac{PS_r \cdot \exp V_r}{\sum_{r'} (PS_{r'} \cdot \exp V_{r'})} \quad (2.14)$$

Der Faktor PS ist in einer ersten Variante

$$PS_r = \sum_{a' \in S_r} \left(\frac{l_{a'}}{L_r} \cdot \frac{1}{N_{a'}} \right) = \sum_{a' \in S_r} \left(\frac{l_{a'}}{L_r} \cdot \frac{1}{\sum_{r'} \delta_{a'r'}} \right) \quad (2.15)$$

mit

$\delta_{ar'}$	der Wert der Strecke-Route-Inzidenzmatrix ($\delta = 1$: Strecke a ist Teil der Route r , $\delta = 0$: sonst),
l_a	Länge (Kosten) der Strecke a ,
L_r	Gesamtlänge (Gesamtkosten) der Route r ,
N_a	Anzahl von Routen dieser Relation über Strecke a ,
S_r	Menge der Strecken, die zur Route r gehören,
V_r	Nutzen der Route r .

Diese erste Variante kann zu unplausiblen Ergebnissen führen, wenn eine Strecke von Routen mit sehr unterschiedlicher Gesamtlänge genutzt wird. RAMMING verändert deshalb den zweiten Term im PS-Faktor (auf diese Variante verweisen auch VRTIC [55] und BIERLAIRE [7]):

$$PS_r = \sum_{a' \in S_r} \left(\frac{l_{a'}}{L_r} \cdot \frac{1}{N_{a'}^*} \right) = \sum_{a' \in S_r} \left(\frac{l_{a'}}{L_r} \cdot \frac{1}{\sum_{r'} \delta_{a'r'} \frac{L_r^{\min}}{L_{r'}}} \right) \quad ,$$

wobei $L^{\min} = \min_{r'}(L_{r'})$ ist, also die geringste Gesamtlänge der Routen im Routenset. RAMMING nimmt weitere Umformungen vor und erhält als allgemeinen Ausdruck

$$PS_r = \sum_{a' \in S_r} \left(\frac{l_{a'}}{L_r} \cdot \frac{1}{N_{a'}^*} \right) = \sum_{a' \in S_r} \left(\frac{l_{a'}}{L_r} \cdot \frac{1}{\sum_{r'} \delta_{a'r'} \frac{G(L_r; \gamma)}{G(L_{r'}; \gamma)}} \right) \quad , \quad (2.16)$$

wobei $G()$ eine allgemeine Funktion mit dem Parameter γ ist. Der Ausdruck $\sum_{r'} (\delta_{a'r'} \cdot G(L_r; \gamma) / G(L_{r'}; \gamma))$ kann z.B. der kostenbezogenen Auswahlwahrscheinlichkeit $P = \exp(V) / \sum \exp(V)$ der Route entsprechen. Im Fall von Unabhängigkeit erreicht PS_r den Wert Eins.

RAMMING hat die verschiedenen Ansätze zur Berücksichtigung von Abhängigkeit in seiner Arbeit zusammengetragen und anhand eines Beispiels untersucht (Vergleichsmaßstab ist eine Befragung des Hochschulpersonals des Massachusetts Institute of Technology über ihren Arbeitsweg). Unter den (makroskopischen) Modellen favorisiert RAMMING das Path-Size-Logit, denn (1.) ist das Ergebnis der statistischen Tests positiv und (2.) die Laufzeit dieses Modells gering. HOOGENDORN et al. [24] untersucht die Anwendung von speziellen Varianten des PS-Logit in ÖV-Netzen und kommen zu dem Ergebnis, dass die Nutzung des PS-Faktors zu besseren Ergebnissen führt als die Nutzung des klassischen MN-Logit-Modells.

C-Logit-Modell CASCETTA [17] schlägt ebenfalls ein erweitertes MNL-Modell vor. Gegenüber dem MN-Logit-Modell ist die Nutzenfunktion ebenfalls um einen Term erweitert worden. Dieser Term stellt ein Abhängigkeitsmaß für Routen dar, genauer einen numerischen Ausdruck für den Anteil an *gemeinsam* benutzten Teilrouten. Der Term CF (engl: commonality factor) einer Route r ist

$$CF_r = \beta_0 \cdot \ln \sum_{r'} \left(\frac{L_{rr'}}{\sqrt{L_r} \cdot \sqrt{L_{r'}}} \right)^\mu \quad (2.17)$$

mit

β_0, μ	Parameter,
$L_{rr'}$	Summierte Länge derjenigen Strecken, die zur Route r und zur Route r' gehören,
$L_r, L_{r'}$	Gesamtlänge der Routen r bzw. r' .

In den Exponenten des C-Logit-Modells geht der Wert CF mit negativem Vorzeichen ein und verringert so den Nutzen. Durch eine weitere Umformung wird sichtbar, dass die Bewertung von Abhängigkeit und die Bewertung der Aufwände multiplikativ verknüpft sind:

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{\exp(V_r - CF_r)}{\sum_{r'} \exp(V_{r'} - CF_{r'})} = \frac{1 / \exp(CF_r) \cdot \exp(V_r)}{\sum_{r'} (1 / \exp(CF_{r'}) \cdot \exp(V_{r'}))} \\ &= \frac{f_r^{CF} \cdot \exp(V_r)}{\sum_{r'} (f_{r'}^{CF} \cdot \exp(V_{r'}))} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Der Koeffizient f^{CF} ist im Falle von vollständiger Unabhängigkeit gleich Eins und strebt gegen den Wert Null, wenn ein hohes Maß an Abhängigkeit von anderen Routen vorliegt. Der Faktor CF beruht immer auf dem Vergleich zweier

Routen. VRTIC [55] integriert den CF -Faktor in ein Nested-Logit-Modell für die simultane Verkehrsmittel- und Routenwahl (siehe Abschnitt 2.5.1).

Link-Nested-Logit-Modell Von VOVSHA et al. [54] wird die Anwendung eines Cross-Nested-Logit-Modells auf das Routenwahlproblem vorgestellt (die Autoren selbst bezeichnen das Modell als Link-Nested-Logit-Modell). RAMMING [38] hat dieses Modell in seiner Arbeit ebenfalls untersucht. Das Cross-Nested-Logit-Modell gehört zur Familie der hierarchischen Logit-Modelle und wird im Abschnitt 2.5 dargestellt.

Faktor Eigenständigkeit Von FRIEDRICH et al. [23] wird ein für die ÖV-Routenwahl spezialisiertes Modell vorgestellt. Die Grundlage bildet auch hier das MNL-Modell. Die Auswahlwahrscheinlichkeit für eine Route r des Zeitintervalls a ist

$$P_{a,r} = \frac{f_r^{IND} \cdot \exp(-\beta \cdot F^{(BC)}(w_{a,r}^*))}{\sum_{r'} (f_{r'}^{IND} \cdot \exp(-\beta \cdot F^{(BC)}(w_{a,r'}^*)))} \quad (2.19)$$

Der Ausdruck $F^{(BC)}(w^*)$ beschreibt die weiter unten erläuterte Box-Cox-Transformation nach Gl. 2.38 mit w^* als Nutzen

$$w_{a,r}^* = q_1 \cdot PJT_{a,r} + q_2 \cdot U_{a,r} + q_3 \cdot FARE_{a,r} \quad .$$

Die empfundene Reisezeit PJT der Route r ist festgelegt als

$$PJT = a_1 \cdot JT_r + 2 \cdot TT_r + 2 \cdot NT \quad .$$

Der Term f_r^{IND} ist definiert als

$$f_r^{IND} = \frac{1}{\sum_{r'} f_r(r')} = \frac{1}{1 + \sum_{r', r \neq r'} f_r(r')} \quad (2.20)$$

mit $f_r(r') < 1$ und als Sonderfall $f_r(r) = 1$. Der Wert $f_r(r')$ ist eine nicht-negative Bewertungsfunktion, die den Einfluß anderer Alternativen r' auf die betrachtete Alternative r angibt. Die Funktion $f_r(r')$ wiederum ist definiert als

$$f_r(r') = \left(1 - \frac{x_r(r')}{s_x}\right)^+ \cdot \left(1 - \gamma \cdot \min\left(1, \frac{s_z |y_r(r')| + s_y |z_r(r')|}{s_y \cdot s_z}\right)\right) \quad (2.21)$$

mit

$$\begin{aligned} x_r(r') &= \frac{(|DEP_r - DEP_{r'}| + |ARR_r - ARR_{r'}|)}{2} , \\ y_r(r') &= PJT_{r'} - PJT_r , \\ z_r(r') &= FARE_{r'} - FARE_r . \end{aligned}$$

Es bedeuten:

ARR	Ankunftszeitpunkt einer Route,
DEP	Abfahrtszeitpunkt einer Route,
f_r^{IND}	Term für die Berücksichtigung von Eigenständigkeit
$FARE$	Fahrtkosten einer Route,
JT	Reisezeit,
NT	Anzahl der Umsteigevorgänge,
PJT	Empfundene Reisezeit einer Route,
q_1, q_2, q_3, a_1	Parameter,
s_x, s_y, s_z, γ	Parameter,
TT	Umsteigewartezeit,
U	Differenz zwischen der erwünschten und der möglichen Abfahrtszeit.

Weiterhin gilt für den Ausdruck

$$\left(1 - \frac{x_r(r')}{s_x}\right)^+ = \left(1 - \frac{x_r(r')}{s_x}\right) \quad \text{wenn } \left(1 - \frac{x_r(r')}{s_x}\right) > 0, \quad \text{sonst } 0.$$

Anders als im C-Logit-Modell wird in diesem Modell nicht nur die räumliche Überlappung von Routen ausgewertet, sondern die Übereinstimmung von nutzerspezifischen Kenngrößen, wie z.B. die Differenz der Abfahrts- und Ankunftszeitpunkte (zeitliche Ähnlichkeit), der empfundenen Reisezeit und der Fahrtkosten. Voraussetzung für die Anwendung dieses Modells ist eine fahrlängenaue Ermittlung der Routen.

2.4.4 Fazit

Es existieren verschiedene Umlegungsmodelle, die zu einem Nutzergleichgewicht führen. Maßgebend für die praktische Verwendung eines Modells sind die

Eigenschaften der Auswahlwahrscheinlichkeit, der Laufzeit sowie die Berücksichtigung von Abhängigkeit.

Die Annahmen, die zu einem deterministischen Gleichgewicht führen, erscheinen nicht sehr realistisch. Zusätzlich ist die Eigenschaft, dass ein deterministisches Umlegungsverfahren im Falle von Verkehrsstärkenunabhängigkeit wie eine Bestwegumlegung arbeitet, als Schwachpunkt zu werten. Eine Bestwegumlegung genügt jedoch einer differenzierten Modellierung der Routenwahl grundsätzlich nicht und wird deshalb in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

Um die Wirkung abhängiger Routen zu berücksichtigen, existieren verschiedene Ansatzpunkte. Das PS-Logit-Modell, das C-Logit-Modell und der Faktor Eigenständigkeit basieren auf einem multinomialen Logit-Modell, verändern aber dessen Nutzenterm. Damit ist die IIA-Eigenschaft dieser Modellen zwar nicht aufgehoben, es wird aber trotzdem ein valides Ergebnis erreicht. Das Cross-Nested-Logit-Modell lässt prinzipiell Alternativen zu und führt ebenso zu validen Ergebnissen. Der Nachteil dieses Modells liegt allerdings in der Laufzeit (siehe RAMMING [38] bzw. Abschnitt 2.5).

2.5 Simultanmodelle

Die Simultanmodelle sind das Gegenstück zu den bisher vorgestellten sequenziellen Modellen. Simultanmodelle vereinigen zwei oder mehr der Modellschritte Erzeugung, Verteilung, Aufteilung und Umlegung und überwinden so das Dilemma der sequenziellen Modelle. Dieses Dilemma ergibt sich durch den Umstand, dass einige Eingangsdaten für die Berechnung eines Schrittes unter Umständen erst in einem nachfolgenden Schritt bekannt sind und deshalb für den aktuellen Schritt durch mehr oder weniger korrekte Hilfsgrößen oder Schätzungen ersetzt werden müssen.

2.5.1 Familie der hierarchischen Logit-Modelle

Nested-Logit-Modell (NL)

Im NL-Modell ist die Menge der zur Auswahl stehenden Alternativen ein kartesisches Produkt der Alternativenmenge. Die grundlegende Idee ist, die Menge von Alternativen G in m Gruppen ähnlicher Alternativen (Nester) G_m zu zerlegen. Jede Alternative wird eindeutig einem Nest zugeordnet. Durch die Bildung von Nestern werden Hierarchiestufen eingeführt (siehe Abb. 2.4 für ein dreistufiges Modell). Theoretisch können in einem NL-Modell beliebig viele Hierarchiestufen benutzt werden (siehe z.B. BEN AKIVA et al. [7], MAIER et al. [35],

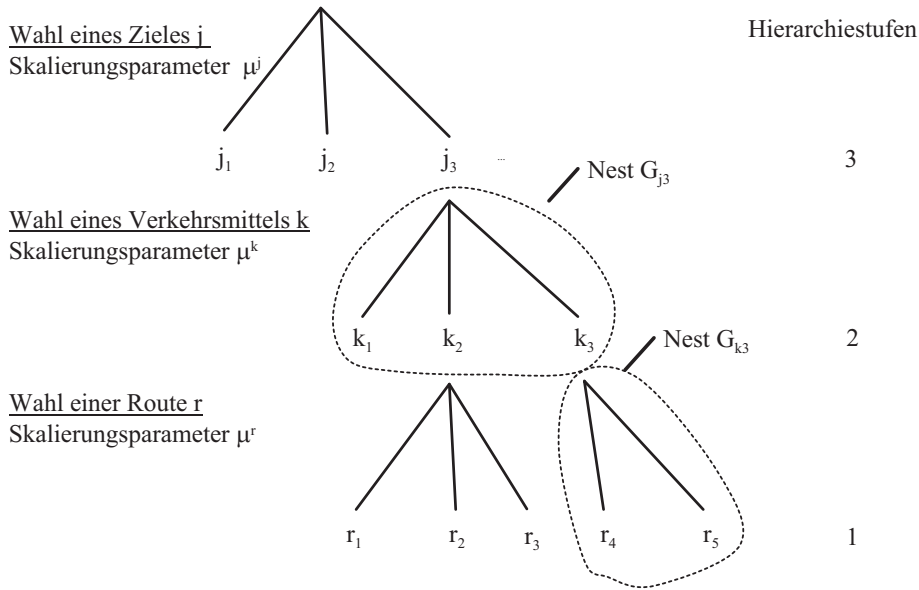


Abbildung 2.4: Hierarchiestufen in einem dreistufigen Nested-Logit-Modell.
Quelle: in Anlehnung an BEN AKIVA [8]

BOBINGER [13]). Bezüglich der Nester gilt die Annahme

$$G = \bigcup_{m'} G_{m'} \quad \text{mit} \quad G_{m'} \cap G_{m^*} = \emptyset \quad \text{für alle} \quad m \neq m^* \quad .$$

Der Nutzenterm einer jeden Alternative setzt sich aus verschiedenen Teilen zusammen: einem Teil für die Alternative selbst und einem Teil für den Nutzen des Nestes, zu welchem diese Alternative gehört. Im Beispiel eines *zweistufigen Nested-Logit-Modells* für die Modellierung der simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahl ergibt sich der deterministische Gesamtnutzen

$$V_{jk}^{ges} = V_j + \epsilon_j + V_{G_j} + \epsilon_{G_j} \quad ,$$

wobei V – deterministischer Anteil des Nutzens, ϵ – stochastischer Anteil des Nutzens (Störterm), j – Ziel, k – Verkehrsmittel, $k \in G_j$ ist (siehe auch Anhang A.1).

Bezüglich der Störterme gelten bestimmte Annahmen. Die Störterme ϵ_k der Alternativen k innerhalb eines Nestes G_j

- genügen alle einer Gumbel-Verteilung,
- sind alle identisch verteilt (d.h. besitzen eine identische Varianz),
- sind alle voneinander unabhängig.

Der Störterm eines Nestes ϵ_{G_j} ist determiniert durch die Störterme ϵ_k der im Nest enthaltenen Alternativen k . Die Störterme ϵ_j der Alternativen j und des Nestes ϵ_{G_j} sind unabhängig, aber nicht zwangsläufig identisch verteilt.

Die Auswahlwahrscheinlichkeit für eine Alternative jk ist das Produkt aus der Auswahlwahrscheinlichkeit der Alternativen gegenüber anderen Alternativen im gleichen Nest und der Auswahlwahrscheinlichkeit des Nestes G_j gegenüber den anderen Nestern

$$P_i(jk|G) = P_i(k|G_j) \cdot P_i(G_j|G) \quad . \quad (2.22)$$

Der Verkehrsstrom v_{ijk} bei einem Quellverkehrsaufkommen Q_i ist

$$v_{ijk} = Q_i \cdot P_i(jk|G) \quad .$$

Die Auswahlwahrscheinlichkeit $P_i(k|G_j)$ ergibt sich mit dem MNL-Modell nach Gleichung A.2 (im Beispiel der simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahl beschreibt dieser Ausdruck die Wahrscheinlichkeit für das Verkehrsmittel k unter allen alternativen Verkehrsmitteln zum Ziel j)

$$P_i(k|G_j) = \frac{\exp(\mu^k(V_k + V_{jk}))}{\sum_{k'} \exp(\mu^k(V_{k'} + V_{jk'}))}$$

mit dem Skalierungsparameter μ . Die Auswahlwahrscheinlichkeit $P_i(G_j|G)$ des Nestes ist abhängig vom Nutzen der Alternative j und vom Nestnutzen V_{G_j} – letzterer wird auf der Basis der im Nest enthaltenen Alternativen mit dem Logsummenparameter bestimmt (siehe Gl. A.1):

$$P_i(G_j|G) = \frac{\exp(\mu^j(V_j + V_{G_j}))}{\sum_{j'} \exp(\mu^j(V_{j'} + V_{G_{j'}}))}$$

und mit dem Logsummenparameter

$$V_{G_j} = \frac{1}{\mu^k} \ln \sum_{k' \in G_j} \exp(\mu^k(V_{k'} + V_{jk'}))$$

ergibt sich

$$\begin{aligned} P_i(G_j|G) &= \frac{\exp(\mu^j(V_j + \frac{1}{\mu^k} \ln \sum_{k'} \exp(\mu^k(V_{k'} + V_{jk'})))}{\sum_{j'} \exp(\mu^j(V_{j'} + \frac{1}{\mu^k} \ln \sum_{k'} \exp(\mu^k(V_{k'} + V_{j'k'})))} \\ &= \frac{\exp(\mu^j V_j) \cdot (\sum_{k'} \exp(\mu^k(V_{k'} + V_{jk'})))^{\frac{\mu^j}{\mu^k}}}{\sum_{j'} \exp(\mu^j V_{j'}) \cdot (\sum_{k'} \exp(\mu^k(V_{k'} + V_{j'k'})))^{\frac{\mu^j}{\mu^k}}} . \end{aligned}$$

Damit ist die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative jk

$$\begin{aligned} P_i(jk|G) &= \frac{\exp(\mu^k(V_k + V_{jk}))}{\sum_{k'} \exp(\mu^k(V_{k'} + V_{jk'}))} \\ &\cdot \frac{\exp(\mu^j V_j) \cdot (\sum_{k'} \exp(\mu^k(V_{k'} + V_{jk'})))^{\frac{\mu^j}{\mu^k}}}{\sum_{j'} \exp(\mu^j V_{j'}) \cdot (\sum_{k'} \exp(\mu^k(V_{k'} + V_{j'k'})))^{\frac{\mu^j}{\mu^k}}} \end{aligned}$$

bzw. in einer kompakteren Schreibweise mit $BG^{(\cdot)}$ als Bewertungsgröße

$$\begin{aligned} P(jk|G) &= \frac{BG_k^{(V)}}{\sum_{k'} BG_{k'}^{(V)}} \cdot \frac{BG_j^{(Z)} \cdot (\sum_{k'} BG_{k'}^{(V)})^{\frac{\mu^j}{\mu^k}}}{\sum_{j'} BG_{j'}^{(Z)} \cdot (\sum_{k'} BG_{k'}^{(V)})^{\frac{\mu^j}{\mu^k}}} \\ &= \frac{BG_k^{(V)}}{\sum_{k'} BG_{k'}^{(V)}} \cdot \frac{BG_{G_j}^{(ZV)}}{\sum_{G_{j'}} BG_{G_{j'}}^{(ZV)}} . \end{aligned} \quad (2.23)$$

In den NL-Modellen haben die Skalierungsparameter μ^k bzw. μ^j eine besondere Bedeutung. Jeder Hierarchiestufe wird ein eigener Skalierungsparameter zugeordnet. Es gilt die Bedingung $\mu^j \leq \mu^k$. Somit ist $0 \leq \mu^j/\mu^k \leq 1$. In praktischer Hinsicht bedeutet diese Annahme, dass die Varianz auf der niedrigeren Hierarchiestufe geringer ist als auf der höheren Stufe (Varianz und der Skalierungsparameter sind indirekt proportional, siehe Anhang A.1).

Das Verhältnis der Skalierungsparameter (μ^j/μ^k) beschreibt die Wirkungsintensität der Hierarchie. Wenn das Verhältnis $\mu^j/\mu^k \rightarrow 1$ strebt, dann werden die Nutzen der Alternativen der Zielwahl und der Verkehrsmittelwahl – unabhängig von der Nestbildung – zunehmend gleichberechtigt. Falls $\mu^j \rightarrow 0$ und damit auch das Verhältnis $\mu^j/\mu^k \rightarrow 0$ strebt, dann wird das Verkehrsanziehungspotenzial eines Verkehrsbezirkes zunehmend unerheblich bzw. im Extremfall $\mu^j = 0$ unwirksam. In diesem Fall ist für die Auswahl der Alternative jk nur noch das Verkehrsmittelangebot entscheidend, die Zielbezirke sind

untereinander gleichwertig. Da in dem Modell nur das Verhältnis der Skalierungsparameter identifizierbar ist (z.B. bei einer Stated-Preference-Schätzung), kann einer der beiden Parameter gleich Eins gesetzt werden.

BEN AKIVA [8] stellt ein *dreistufiges Nested-Logit-Modell* für die Ebenen Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahl vor (siehe Abbildung 2.4). Dementsprechend setzt sich die Nutzenfunktion aus dem deterministischen Nutzen der Nester zusammen: $V_{jkr}^{ges} = V_j + \epsilon_j + V_{G_j} + \epsilon_{G_j} + V_{G_k} + \epsilon_{G_k}$ wobei j – Ziel, k – Verkehrsmittel, r – Route, $k \in G_j$, $r \in G_k$ ist. Die Auswahlwahrscheinlichkeit für eine Route r eines bestimmten Verkehrsmittels k zu einem bestimmten Zielverkehrsbezirk j von einem Quellverkehrsbezirk i lautet analog Gl. 2.22

$$P_i(jkr|G) = P_i(r|G_k) \cdot P_i(G_k|G_j) \cdot P_i(G_j|G) \quad . \quad (2.24)$$

Unter Anwendung des Logsummenparameters ergibt sich die Auswahlwahrscheinlichkeit

$$\begin{aligned} P_i(rkj|G) &= \frac{BG_r}{\sum_{r'} BG_{r'}} \cdot \frac{BG_k \cdot (\sum_{r'} BG_{r'})^{\frac{\mu^k}{\mu^r}}}{\sum_{k'} BG_{k'} \cdot (\sum_{r'} BG_{r'})^{\frac{\mu^k}{\mu^r}}} \\ &\cdot \frac{BG_j \cdot [\sum_{k'} BG_{k'} \cdot (\sum_{r'} BG_{r'})^{\frac{\mu^k}{\mu^r}}]^{\frac{\mu^j}{\mu^k}}}{\sum_{j'} BG_{j'} \cdot [\sum_{k'} BG_{k'} \cdot (\sum_{r'} BG_{r'})^{\frac{\mu^k}{\mu^r}}]^{\frac{\mu^j}{\mu^k}}} \end{aligned} \quad (2.25)$$

und in einer kompakteren Schreibweise

$$P_i(rkj|G) = \frac{BG_r^{(R)}}{\sum_{r'} BG_{r'}^{(R)}} \cdot \frac{BG_{G_k}^{(VR)}}{\sum_{G_{k'}} BG_{G_{k'}}^{(VR)}} \cdot \frac{BG_{G_j}^{(ZVR)}}{\sum_{G_{j'}} BG_{G_{j'}}^{(ZVR)}} \quad .$$

Wie bereits für das zweistufige Modell ausgeführt, müssen die Verhältnisse der Skalierungsparameter positiv und ≤ 1 sein und damit die Bedingung $\mu^j \leq \mu^k \leq \mu^r$ erfüllen. Im Fall $\mu^j = \mu^k = \mu^r$ erhält man das Joint-Logit-Modell.

BOBINGER hat in [13] ein dreistufiges Nested-Logit-Modell für die Ebenen Tageszeit-, Ziel- und Verkehrsmittelwahl vorgestellt. Die Routenströme des MIV werden in diesem Modell mit einem Optimierungsansatz bestimmt, der zu einem deterministischen Nutzergleichgewicht zwischen den Routen führt (WARDROP-Prinzip). Die Auswahlwahrscheinlichkeit hat eine Struktur analog dem zwei- und dreistufigen Modell.

VRTIC [55] hat ein simultanes Verkehrsmittel- und Routenwahlmodell entwickelt. Um die Abhängigkeit von MIV-Routen zu berücksichtigen, wurde der

C-Faktor des C-Logit-Modells (siehe 2.4.3) integriert:

$$P(kr|G) = \frac{\exp(\mu^r(V_{kr} - CF_r))}{\sum_{r'} \exp(\mu^r(V_{kr'} - CF_{r'}))} \cdot \frac{\exp(\mu^k V_k) \cdot \left(\sum_{r'} \exp(\mu^r(V_{kr'} - CF_{r'})) \right)^{\frac{\mu^k}{\mu^r}}}{\sum_{k'} \exp(\mu^k V_{k'}) \cdot \left(\sum_{r'} \exp(\mu^r(V_{k'r'} - CF_{r'})) \right)^{\frac{\mu^k}{\mu^r}}} \quad (2.26)$$

Dieses Modell, wie auch alle anderen Logit-Modelle, führt zu einem stochastischen Nutzergleichgewicht.

Wenn in ein Nested-Logit-Modell die Wahl einer Route integriert wird, ist zu bedenken, dass die Wahl der übergeordneten Hierarchie von der Zahl der Routen abhängig wird. In Gl. 2.25 ist beispielsweise die Bewertung $BG_{G_j}^{(ZVR)}$ der Alternative im Term $P_i(G_j|G)$ folgender Ausdruck:

$$BG_{G_j}^{(ZVR)} = BG_j \cdot \left[\sum_{k'} BG_{k'} \cdot \left(\sum_{r'} BG_{r'} \right)^{\frac{\mu^k}{\mu^r}} \right]^{\frac{\mu^j}{\mu^k}}.$$

Je größer die Zahl der Routen r auf einer Relation ijk , desto größer ist die Zahl der Summanden BG_r . Folglich steigt die Bewertung $BG_{G_j}^{(ZVR)}$ an. Für die Ebene Verkehrsmittelwahl ist diese Eigenschaft unbedeutend, da die zu wählenden Alternativen den Verkehrsarten entsprechen und die Anzahl der Verkehrsarten für alle Ziele identisch ist.

Cross-Nested-Logit-Modell (CNL)

Beim CNL-Modell werden ebenso wie im NL-Modell Alternativgruppen gebildet, jedoch kann eine Alternative k zu mehr als einem einzigen Nest gehören. Der Inklusionsparameter $\alpha_{G_j k}$ der Alternative gibt an, wie stark die Zugehörigkeit der betrachteten Alternative zum Nest j ist (vgl. BEN-AKIVA et al. [7]). Es gilt: $0 \leq \alpha_{G_j k} \leq 1$ und $\sum_{G_{j'}} \alpha_{G_{j'} k} = 1$. Der Nutzen der Alternative ist gegeben durch

$$V_{jk}^{ges} = V_k + \epsilon_k + V_{G_j} + \epsilon_{G_j} + \ln \alpha_{G_j k} \quad .$$

Bezüglich der Störterme gelten die Annahmen des NL-Modells. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Alternative k im Nest j gewählt wird, ist

$$P(k|G) = \sum_{j'} P(G_{j'}|G) \cdot P(k|G_{j'}) \quad (2.27)$$

mit

$$P(G_j|G) = \frac{\exp(V_{G_j})}{\sum_{G_{j'}} \exp(V_{G_{j'}})}$$

und

$$P(k|G_j) = \frac{\alpha_{G_j k}^{1/\mu_k} \cdot \exp(V_k/\mu_k)}{\sum_{k'} \alpha_{G_j k'}^{1/\mu_k} \cdot \exp(V_{k'}/\mu_k)}$$

und mit dem speziellen Logsummenparameter

$$V_{G_j} = \mu_k \cdot \ln \sum_{k'} (\alpha_{G_j k'}^{1/\mu_k} \cdot \exp(V_{k'}/\mu_k)) \quad .$$

Falls der Inklusionsparameter nur die Werte Null oder Eins annimmt, dann ist jede Alternative eindeutig genau einem Nest zugeordnet. In diesem Fall geht das CNL-Modell in ein NL-Modell über.

Das CNL-Modell im Kontext Routenwahl wurde bereits im Abschnitt 2.4.3 erwähnt. Diese Modell wurden von VOVSHA et al. [54] vorgeschlagen, um die Abhängigkeit von Routen zu berücksichtigen. In diesem, auch als **Link-Nested-Logit-Modell** bezeichneten Modell wird jede Strecke a des Netzmodells als Nest G_a aufgefasst. Die Routen sind die Alternativen der Nester, wobei jede Strecke zu mehr als einer Route r gehören kann. Die Abbildung 2.5 verdeutlicht die Hierarchiestufen dieses Modells.

Der Inklusionsparameter α_{ar} ist die Maßzahl für die Überlappung von Routen und definiert als

$$\alpha_{ar} = \frac{L_a}{L_r} \cdot \delta_{ar}$$

mit

L_a	Länge oder Grundreisezeit der Strecke a ,
L_r	Länge oder Grundreisezeit der Route r ,
δ_{ar}	Wert der Strecke-Route-Inzidenzmatrix ($\delta = 1$: Strecke a ist Teil der Route r , $\delta = 0$: sonst).

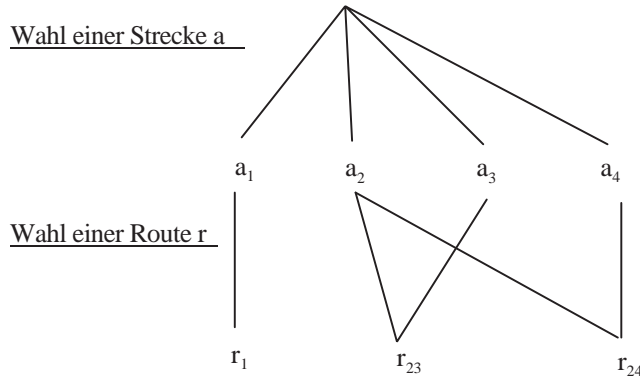


Abbildung 2.5: Hierarchiestufen im Cross-Nested-Logit-Modell, Anwendung für die Routenwahl. Quelle: in Anlehnung an VOVSHA et al. [54]

Der Wert α_{ar} ordnet jedem Streckennest Anteile an der betrachteten Route zu. Falls in einem Netzmodell die α -Werte nur Werte entweder von Null oder Eins annehmen, dann gehört keine Strecke gleichzeitig zu zwei Routen. In diesem Fall liegen ausschließlich parallele Routen vor und das Modell geht in ein Nested-Logit-Modell über. Analog zu Gl. 2.27 ergibt sich die Auswahlwahrscheinlichkeit für eine Route

$$P(r|G) = \frac{\exp(V_{G_a})}{\sum_{G_{a'}} \exp(V_{G_{a'}})} \cdot \frac{\alpha_{ar}^{1/\mu_r} \cdot \exp(V_r/\mu_r)}{\sum_{r' \in G_a} \alpha_{ar'}^{1/\mu_r} \cdot \exp(V_{r'}/\mu_r)}$$

mit dem speziellen Logsummenparameter

$$V_{G_a} = \mu_r \cdot \ln \sum_{r'} (\alpha_{ar'}^{1/\mu_r} \cdot \exp(V_{r'}/\mu_r)) \quad .$$

Die Ableitung des Modells erfordert einen konstanten Inklusionsparameter. Demzufolge eignen sich dafür nur konstante Werte wie z.B. die Streckenlänge. Die Nutzung verkehrsstärkenabhängiger Zeiten wird nicht ausgeschlossen, ist aber analytisch noch nicht untersucht (VOVSHA et al. [54]). RAMMING [38] weist darauf hin, dass der Rechenaufwand dieses Modells für große Netze deutlich höher ist als beispielsweise für das PS-Logit-Modell.

Allgemeinere Logit-Modelle Neben den vorgestellten NL-Modellen gibt es ein verallgemeinertes NL-Modell, das Generalized-Nested-Logit-Modell. Dieses Modell und dessen Eigenschaften wird z.B. von BIERLAIRE [11] vorgestellt. Das Generalized-Extreme-Value-Modell ist eine weitere Verallgemeinerung, welche z.B. das MNL-Modell mit einschließt. Da der Schwerpunkt dieser Arbeit nicht auf den Logit-Modellen liegt, soll auf die Darstellung und Ableitung dieser Modelle nicht weiter eingegangen werden.

Bei allen Logit-Modellen ist die Einhaltung von extern vorgegebenen Potenzialen für die Attraktionsseite *nicht* gewährleistet. Die Berücksichtigung von Randsummenbedingungen ist in den theoretischen Ableitungen nicht Gegenstand der Betrachtung. Es ist natürlich möglich, Randsummenbedingungen zu beachten. Die Bilanzfaktoren können zum Bestandteil der Nutzenfunktion erklärt werden. Die folgende Gleichung zeigt ein entsprechend modifiziertes MNL-Modell mit einem zusätzlichen Bilanzfaktor für die Zielwahl:

$$P_i(j) = \frac{e^{(V_j + \ln f z_j)}}{\sum_{j'} e^{(V_{j'} + \ln f z_{j'})}} = \frac{e^{V_j} \cdot f z_j}{\sum_{j'} e^{V_{j'}} \cdot f z_{j'}} \quad ,$$

wobei $f z_j$ so zu bestimmen ist, dass die harte RSB

$$Z P_j = Z_j$$

eingehalten wird.

2.5.2 Simultanes EVA-Modell

Im Abschnitt 2.2.3 wurde die Ableitung des bilinearen Grundmodells der Verkehrsverteilung mit den Ereignissen A_i , E_j und W vorgestellt. Wenn als weiteres Ereignis M_k die Wahl eines Verkehrsmittels k in die Betrachtung einbezogen wird, entsteht das Grundmodell der Verkehrsverteilung und Verkehrsaufteilung. Die Ableitungen mittels der Informationsgewinnminimierung ist ebenso übertragbar. SCHILLER zeigt in [41], Anhang A.III, dass das EVA-Modell ohne und mit Randsummenbedingungen auch ein universales Logit-Modell ist:

$$\begin{aligned} v_{ijk} &= BG_{ijk} \cdot \frac{Q P_i}{V} \cdot q_i \cdot \frac{Z P_j}{V} \cdot z_j \cdot \frac{A P_k}{V} \cdot a_k \cdot f \\ &= BG_{ijk} \cdot f q_i \cdot f z_j \cdot f a_k \end{aligned} \quad (2.28)$$

mit (beispielsweise) harten Randsummenbedingungen für jede Dimension der Matrix

$$\begin{aligned} QP_i &= \sum_{j'k'} v_{ij'k'} \quad , \\ ZP_j &= \sum_{i'k'} v_{i'jk'} \quad , \\ AP_k &= \sum_{i'j'} v_{i'j'k} \end{aligned} \quad (2.29)$$

und der Gesamtsummenbedingung

$$V = \sum_{e'} H_{e'} = \sum_{i'j'k'} v_{i'j'k'} \quad .$$

Die Größen $Q_i = \sum_{j'k'} v_{ij'k'}$ bzw. $Z_j = \sum_{i'k'} v_{i'jk'}$ beschreiben analog zum bilinearen EVA-Modell die Zeilen- bzw. Spaltensummen der dreidimensionalen Verkehrstrommatrix. Das Verkehrsartenaufkommen A_k ist die Ecksumme einer zweidimensionalen Verkehrsartenmatrix

$$A_k = \sum_{i'j'} v_{i'j'k} \quad .$$

Das Verkehrsartenpotenzial AP_k einer Verkehrsart k beschreibt die tatsächliche Nutzung des Verkehrsmittels und ergibt sich aus dem Produkt von Gesamtverkehrsaufkommen V und dem Modal-Split in der betrachteten homogenen Schicht. Für den Analysefall werden die Modal-Split-Werte aus Erhebungen gewonnen

$$AP_k = V \cdot MS_k \quad .$$

Durch die Lösung des Grundmodells werden die Bilanzfaktoren $f q_i, f z_j$ und $f a_k$ bestimmt. Eine mögliche EVA-Bewertungsgröße BG_{ijk} ist

$$\begin{aligned} BG_{ijk} = & \quad PVMV_{ik} \cdot F_k(VMA_{ijk}) \cdot F_k(KOST_{ijk}) \cdot F_k(ZU_{ijk}) \\ & \cdot F_k(WZ_{ijk}) \cdot F_k(UH_{ijk}) \cdot F_k(UZ_{ijk}) \cdot F^k(AB_{ijk}) \\ & \cdot [F_k(RZ_{ijk}) - PKF \cdot F_k(KF_{ijk})] \end{aligned}$$

mit

AB	Abgangszeit,
KF	Reisezeit der konkurrierende Verkehrsart Fußgänger,
$KOST$	Kosten,
PKF	Parameter, der dem Fußweganteil für $KF = 0$ entspricht,
$PVMV$	Verkehrsmittelverfügbarkeit des Bezirks i ,
RZ	Komplexe Reisezeit,
UZ	Umsteigezeit,
VMA	Verkehrsmittelangebot (z.B. mittlere Zugfolgezeit),
WZ	Wartezeit,
ZU	Zugangszeit

und mit einer monoton fallenden EVA-Bewertungsfunktion $F(w)$ für einen Aufwand w (hier die EVA-Funktion)

$$F(w) = \frac{1}{(1+w)^{\phi(w)}} \quad \text{mit} \quad \phi(w) = \frac{E}{1 + \exp(F - G \cdot w)} \quad .$$

Die Eigenschaften der EVA-Bewertungsfunktionen werden im Abschnitt 2.6.2 gemeinsam mit den Eigenschaften anderer Bewertungsfunktionen dargestellt.

Prognoseverfahren Im Prognosefall ist das Verkehrsartenpotenzial AP_k der Verkehrsart k im Allgemeinen nicht bekannt, folglich kann die Randsummenbedingung für Verkehrsarten nicht vorgegeben werden. Es wird nun unterstellt, dass die Bilanzfaktoren fa_k der Analyse auch im Prognosezeitraum gelten. Dabei ist es aus praktischen Gründen sinnvoll, die Bilanzfaktoren fa_k zu normieren. Der normierte Bilanzfaktor⁹ der Verkehrsarten (kurz: *Verkehrsmittelgunstfaktor*)

$$Ca_k^{(P)} = fa_k^{(A)} / \sum_{k'} fa_{k'}^{(A)}$$

((P) – Prognose, (A) – Analyse) wird im Prognosefall als zusätzlicher Bewertungsfaktor vorgegeben. Die Bestimmungsgleichung des bilinearen Gleichungssystems mit dreidimensionalen Matrizen für die Prognose lautet damit

$$v_{ijk}^{(P)} = \left(Ca_k^{(P)} \cdot BG_{ijk}^{(P)} \right) \cdot fq_i^{(P)} \cdot fz_j^{(P)} \quad , \quad (2.30)$$

⁹siehe hierzu Abschnitt C.1

beispielweise mit harten Randsummenbedingungen

$$QP_i^{(P)} = \sum_{j'k'} v_{ij'k'}^{(P)} \quad ,$$

$$ZP_j^{(P)} = \sum_{j'k'} v_{i'jk'}^{(P)} \quad .$$

Der Verkehrsmittelgunstfaktor ist eine Besonderheit dieses Modells. Die Relevanz der Nutzung des Bilanzfaktors Ca_k für die Prognoseberechnung wird deutlich, wenn die Eigenschaften der im Modell und der in der Realität wirkenden Einflussgrößen verglichen werden.

In der Realität ist die Verkehrsmittelwahl der Verkehrsteilnehmer abhängig von objektiven (= messbaren) Kriterien, aber auch von nichtmessbaren Größen (persönlichen Vorlieben und Zwänge). Der messbare Teil des Verkehrsangebots wird durch die Aufwandsmatrizen abgebildet. Darüber hinaus ist auch der Modal-Split der Analyse ein erhebbares Merkmal des Verkehrssystems. Er beschreibt für einen vergangenen Zeitpunkt die Reaktion der Verkehrsteilnehmer auf ein konkret vorhandenes und messbares Verkehrsangebot, die auch unter dem Einfluss nichtmessbarer Größen erfolgt ist.

In dem trilinearen Analyse-Modell werden – einfach ausgedrückt – die Kennwerte der Reaktion auf das Angebot und die Kennwerte des Angebots selbst miteinander in Beziehung gebracht und als Zahlenwert (Bilanzfaktor der Verkehrsart) ausgedrückt.

Ein hoher Zahlenwert entsteht, wenn das messbare Angebot zwar schwach (hohe Reisezeiten im gesamten Netz), aber der Modal-Split trotzdem vergleichsweise hoch ist. Das deutet darauf hin, dass die Vorlieben und Zwänge wesentliche Aspekte bei der Wahl dieses Verkehrsmittels in dieser QZG sind.

Für den Prognosefall wird nun angenommen, dass sich die allgemeinen Vorlieben und Zwänge der Verkehrsteilnehmer im Grundsatz nicht ändern. Die normierten Bilanzfaktoren Ca sind zusammen mit den Prognose-Aufwandsmatrizen die Eingangsgrößen in das Modell. Der Prognose-Modal-Split ist ein Ergebnis der Berechnung. Da das Prognosemodell für jede QZG getrennt ausgeführt wird, kann die Reaktion der verschiedenen Nutzergruppen differenziert untersucht werden.

Varianten des Grundmodells Im Abschnitt 2.1 wurden die Varianten von Randsummenbedingungen dargestellt. In einem trilinearen Grundmodell existiert neben den Quellen und Zielen zusätzlich eine dritte Dimension, die Verkehrsart. Durch die Kombination von Randsummenbedingungen für die Quelle-,

Ziel- und Verkehrsartendimension entstehen zahlreiche Modellvarianten. Die Produktions- und die Verkehrsartendimension unterliegen immer harten RSB. Die Modellvarianten unterscheiden sich nur in Bezug auf die Attraktionsseite. Aus der Festlegung der Randsummenbedingung der Attraktionsseite leitet sich auch der Berechnungsansatz für die Potenziale der Attraktionsseite ab. LOHSE [33] verwendet zusätzlich die Begriffe Kopplung und Fixierung für die Einteilung der Modellvarianten.

- *Fixierung*: Die Fixierung beschreibt Varianten der harten Randsummenbedingung. Die Varianten entstehen durch Modifikationen des Modellansatzes und unterschiedliche Lösungsverfahren. Bei einer fixierten Randsummenbedingung erreicht die Zeilensumme bzw. die Spaltensumme exakt das Potenzial, und zwar ohne die in Iterationsverfahren üblichen Abweichungen. Für eine unfixierte Randsummenbedingung (im Folgenden weiter als harte RSB bezeichnet) sind die im Iterationsverfahren üblichen Abweichungen zulässig. Ein Gleichungssystem kann über maximal eine fixierte RSB verfügen.
- *Kopplung*: Gekoppelte Modelle sind Modelle mit wenigstens zwei (fixierten, harten oder elastischen) Randsummenbedingungen. Die Bestimmungsgleichung enthält folglich mindestens zwei Bilanzfaktoren. Das Gleichungssystem ist nur iterativ lösbar.

Die möglichen Kombinationen sind in Tabelle 2.5 aufgeführt.

Beispielsweise entspricht die Variante **hart/hart/hart** dem oben bereits vorgestellten Grundmodell. Die vorgegebenen Potenziale QP , ZP und AP werden durch das verwendete approximativ arbeitende Lösungsverfahren näherungsweise eingehalten:

$$\begin{aligned} v_{ijk} &= BG_{ijk} \cdot \frac{QP_i}{V} \cdot q_i \cdot \frac{ZP_j}{V} \cdot z_j \cdot \frac{AP_k}{V} \cdot a_k \cdot f \\ &= BG_{ijk} \cdot f q_i \cdot f z_j \cdot f a_k \end{aligned}$$

mit den Randsummenbedingungen

$$\begin{aligned} QP_i &= \sum_{j'k'} v_{ij'k'} \quad , \\ ZP_j &= \sum_{i'k'} v_{i'jk'} \quad , \\ AP_k &= \sum_{i'j'} v_{i'j'k} \quad . \end{aligned}$$

Nr.	Quelle	Ziel	Verkehrs- art	Kopp- lung	QZG- Typ	typischer Anwendungsfall
1	fixiert	hart	hart	ja	1,3	Pflichtaktivität an Quelle und Ziel, exaktes Erreichen von Q_i
2	hart	fixiert	hart	ja	2,3	Pflichtaktivität an Quelle und Ziel, exaktes Erreichen von Z_j
3	hart	hart	fixiert	ja	1,2,3	Pflichtaktivität an Quelle und Ziel, exaktes Erreichen von AP_k
4	hart	elastisch	fixiert	ja	1,3	Pflichtaktivität an Quelle, Obergrenze für Z_j , exaktes Erreichen von AP_k
5	elastisch	hart	fixiert	ja	2,3	Pflichtaktivität am Ziel, Obergrenze für Q_i , exaktes Erreichen von AP_k
6	elastisch	elastisch	fixiert	ja	3	keine Pflichtaktivität an Quelle und am Ziel, jedoch Obergrenzen für Q_i und Z_j , exaktes Erreichen von AP_k
7	hart	Modif. 1	fixiert	ja	1,3	Pflichtaktivität an Quelle, Einfluss von Angebot und Raumstruktur auf Z_j , exaktes Erreichen von AP_k
8	Modif. 1	hart	fixiert	ja	2,3	Pflichtaktivität am Ziel, Einfluss von Angebot und Raumstruktur auf Q_i , exaktes Erreichen von AP_k
9	Modif. 1	Modif. 1	fixiert	nein	3	keine Pflichtaktivität an Quelle und Ziel, Einfluss von Angebot und Raumstruktur auf Q_i und Z_j , exaktes Erreichen von AP_k
10	Modif. 2	Modif. 2	fixiert	nein	3	keine Pflichtaktivität an Quelle und Ziel, Einfluss des Angebots auf Q_i und Z_j , exaktes Erreichen von AP_k

Tabelle 2.5: Modellvarianten und typische Anwendungsfälle des simultanen EVA-Modells

In der **Variante hart/elastisch/hart** wird im Arbeitsschritt Erzeugung für die weichen Randsummenbedingungen ein Zielbezirkspotenzial ZP_j auf der Basis der Raumstrukturdaten und Überlegungen zur Überlastungsfähigkeit der im Bezirk ansässigen Einrichtungen errechnet. Dieses Potenzial wirkt wie ein maximaler Grenzwert, die Ausschöpfung hängt vom Verkehrsangebot des Bezirkes und der Attraktionswirkung der konkurrierenden Verkehrsbezirke ab. Die Nebenbedingungen für die Ziele werden als Ungleichung formuliert. Das vollständige Gleichungssystem dieser Variante ist

$$\begin{aligned} v_{ijk} &= BG_{ijk} \cdot \frac{QP_i}{V} \cdot q_i \cdot \frac{ZP_j}{\sum_{j'} ZP_{j'}} \cdot z_j \cdot \frac{AP_k}{V} \cdot a_k \cdot f \\ &= BG_{ijk} \cdot f q_i \cdot f z_j^* \cdot f a_k \end{aligned}$$

mit den Randsummenbedingungen in der folgenden Form

$$\begin{aligned} QP_i &= \sum_{j'k'} v_{ij'k'} \quad , \\ ZP_j &\geq \sum_{j'k'} v_{ij'k'} \quad , \\ AP_k &= \sum_{j'k'} v_{ij'k} \quad . \end{aligned}$$

Ein Algorithmus für die iterative Lösung eines Gleichungssystems mit Ungleichungen als Nebenbedingungen ist in LOHSE [33] dargestellt.

Die folgende **Variante ohne Randsummenbedingung (Modifikation 1)** beschreibt den Fall, dass das Zielverkehrsaufkommen nur von dem Verkehrsangebot und dem Potenzial des Zielverkehrsbezirkes beeinflusst wird. Dann gilt

$$\begin{aligned} v_{ijk} &= BG_{ijk} \cdot \frac{QP_i}{V} \cdot q_i \cdot \frac{ZP_j}{\sum_{j'} ZP_{j'}} \cdot \frac{AP_k}{V} \cdot a_k \cdot f \\ &= BG_{ijk} \cdot f q_i \cdot \frac{ZP_j}{\sum_{j'} ZP_{j'}} \cdot f a_k \end{aligned}$$

mit

$$\begin{aligned} QP_i &= \sum_{j'k'} v_{ij'k'} \quad , \\ AP_k &= \sum_{j'k'} v_{ij'k} \quad . \end{aligned}$$

Ein Ansatz **ohne Randsummenbedingung (Modifikation 2)** für die Ziele ist mit dem folgenden Gleichungssystem gegeben:

$$\begin{aligned} v_{ijk} &= BG_{ijk} \cdot \frac{QP_i}{V} \cdot q_i \cdot \frac{AP_k}{V} \cdot a_k \cdot f \\ &= BG_{ijk} \cdot f q_i \cdot f a_k \end{aligned}$$

mit

$$\begin{aligned} QP_i &= \sum_{j'k'} v_{ij'k'} \quad , \\ AP_k &= \sum_{j'k'} v_{i'jk'} \quad . \end{aligned}$$

In diesem Fall sind die Potenziale des Zieles ohne Bedeutung.

Lösungsverfahren Für die Lösung von gekoppelten Modellen sind Iterationsverfahren notwendig. Neben den allgemeinen Verfahren (BREGMAN-Verfahren) existieren Spezialverfahren. Bekannte Lösungsverfahren sind das Verfahren von FURNESS (siehe z.B. ORTÚZAR et al. [36]) und das MULTI-Verfahren (LOHSE [43]). Das allgemeine n-lineare MULTI-Verfahren ist im Anhang C.1 beispielhaft für ein trilineares Gleichungssystem dargestellt. Das bekannte bilineare FURNESS-Verfahren kann auf ein trilineares Verfahren erweitert werden (LOHSE et al. [33]).

In der praktischen Anwendung für große Modelle (große Verkehrsbezirksanzahl) zeigt sich, dass das MULTI-Verfahren dann die Lösung schneller erreicht, wenn die Matrix eher häufig mit Bewertungsgrößen größer Null besetzt ist. Ist dies nicht der Fall, dann ist das FURNESS-Verfahren das schnellere Verfahren.

Berücksichtigung von Heimatstandorten Durch die Zerlegung einer Wegekette in eigenständige Ortsveränderungen entsprechend der Definition von Quelle-Ziel-Gruppen geht speziell für die Teilmenge der nichtheimgebundenen Ortsveränderungen der Bezug zum Wohnstandort verloren. LOHSE et al. [33] gibt für die Modellierung von Wegeketten einschließlich der Berücksichtigung der Randsummenbedingungen ein exaktes Verfahren an, welches jedoch außerordentlich aufwändig ist. Eine Alternative zur exakten Wegekettenmodellierung ist die Berücksichtigung von Einzugsgebieten.

Bei dieser Modellierungsvariante wird – wie in der Realität auch – beachtet, dass die Personen den Aktivitätenstandort in einem Einzugsgebiet wählen. Das Einzugsgebiet einer Person wird durch die Standorte der eigenen Wohnung und (falls die Person erwerbstätig ist) der eigenen Arbeitsstätte determiniert. Das führt beispielsweise bei erwerbstätigen Personen zu ellipsenförmigen Einzugsgebieten rings um die „Pole“ Wohnung und Arbeit (siehe Abbildung 2.6).

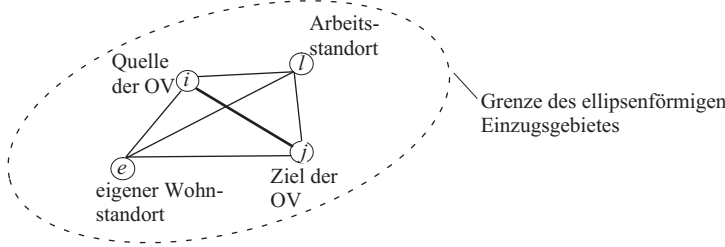


Abbildung 2.6: Aktivitätenstandorte und Ortsveränderungen in dem bipolaren Einzugsgebiet eines Erwerbstätigen. Quelle: LOHSE et al. [33]

Im Modell wird bei der Wahl von Quelle i und Ziel j von nichttheimgebundenen Ortsveränderungen deshalb zusätzlich berücksichtigt, über welches arbeitsstätten- oder wohnstandortbezogenes Potenzial die umgebenden Verkehrsbezirke verfügen. Folglich werden Quell- und Zielbezirke umso stärker nachgefragt, je dichter sie an den wichtigen Wohn- und Arbeitsstandorten liegen. Die Berücksichtigung des Arbeits- und des Heimatstandortes erfolgt durch die Verkehrsaufkommen dieser Bezirke, die als weitere harte Randsummenbedingung in die Berechnung eingehen. So sind beispielsweise für das bipolare Einzugsgebiet einer erwerbstätigen Person in der QZG SS die folgenden Randsummenbedingungen maßgebend:

$$HP_e = \sum_{i'j'k'l'} v_{i'j'k'el'} \quad \text{und} \\ DP_l = \sum_{i'j'k'e'} v_{i'j'k'e'l}$$

mit dem Wohnstandortpotenzial HP im Bezirk e und dem Arbeitsstandortpotenzial DP im Bezirk l . Das Wohnstandortpotenzial ist identisch mit dem Heimataufkommen H_e (bekannt aus dem Modellschritt Erzeugung), das Arbeitsstandortpotenzial entspricht dem Zielverkehrsaufkommen der QZG WA

und SA. Die Bestimmungsgleichung lautet analog zu Gleichung 2.28

$$v_{ijkl} = BG_{ijkl} \cdot fq_i \cdot fz_j \cdot fa_k \cdot fh_e \cdot fd_l$$

mit den zusätzlichen Bilanzfaktoren fh_e und fd_l . Die infrastrukturelle Verknüpfung der betrachteten Bezirke wird durch die Bewertungsgröße BG_{ijkl} berücksichtigt. Diese Bewertungsgröße ist das Produkt der Bewertungen der räumlichen Beziehungen aller einzelnen Standorte

$$BG_{ijkl} = F(w_{ijk}) \cdot F(w_{eik}) \cdot F(w_{ejk}) \cdot F(w_{elk}) \cdot F(w_{lik}) \cdot F(w_{ljk}) \quad ,$$

wobei die Parameter der monoton fallenden Bewertungsfunktion $F(w)$ unterschiedlich sein können. Dieser Ansatz ist der aufwändigste aller von LOHSE et al. [33] angedeuteten Ansätze zur Berücksichtigung von Einzugsgebieten. Er führt zu fünflinearen Gleichungssystemen und fünfdimensionalen Matrizen. Auch andere Autoren (z.B. in BOBINGER [13]: Nächstzieloption in einem Nested-Logit-Ansatz) verwenden Ansätze zur Beachtung von Standorten.

2.5.3 Simultanmodelle auf der Basis eines deterministischen Gleichgewichts

Auf der Basis eines deterministischen Gleichgewichts wurden auch Simultanmodelle („user equilibrium with variable demand“) entwickelt (SHEFFI [48]). ORTÚZAR et al. [36] geben eine Übersicht über die verschiedenen Ansätze. Der Ansatz eines Simultanmodells der Erzeugung, Verteilung, Aufteilung und Umlegung (die Zielfunktion nach Gl. 2.13 mit zusätzlichen Termen sowie zusätzlichen Nebenbedingungen) führt bei bestimmten Annahmen zu einem einseitig oder zweiseitig beschränkten Gravitationsmodell (singly constrained gravity model) mit einer Exponentialfunktion als Bewertungsfunktion. Da ein deterministischer Ansatz für diese Arbeit nicht zielführend ist, soll dieser Ansatz nicht weiter verfolgt werden.

2.5.4 Fazit

Für die simultane Modellierung im Sinne eines stochastischen Nutzergleichgewichts sind die Nested-Logit-Modelle und das EVA-Modell von wesentlicher Bedeutung. Die Modelle basieren auf unterschiedlichen Ableitungen, die zu unterschiedlichen Eigenschaften führen.

Das Nested-Logit-Modell bildet einen Nestnutzen (d.h. der zusammengefasste Nutzen von Alternativen einer Hierarchiestufe) mit Hilfe des Logsummen-

parameters, was de facto einer Summation der Bewertungen der im Nest enthaltenen Alternativen entspricht. Die Skalierungsparameter bieten die Möglichkeit, die Wirkungsintensität der Hierarchiestufen zu berücksichtigen. Im Falle der Integration einer Routenwahlebene ergibt sich eine Abhängigkeit von der Zahl der Routen. Eine Berücksichtigung der Randsummenbedingungen (Quellen, Ziele und Verkehrsarten) ist nicht Bestandteil der Ableitung, kann aber nachträglich integriert werden. Die Abbildung des Wahlverhaltens erfolgt mit einer Exponentialfunktion. BOBINGER [13] zeigt, dass in Nested-Logit-Modellen die Heimatstandorte von nichtheingebundenen Ortsveränderungen berücksichtigt werden können.

Im simultanen EVA-Modell für die Ziel- und Verkehrsmittelwahl sind die Randsummenbedingungen ein Bestandteil der Ableitung. Es gibt verschiedene Arten von Randsummenbedingungen, die je nach Anwendungsfall variiert werden können. Die Philosophie der Bewertung orientiert sich am Verhalten der Verkehrsteilnehmer. Im EVA-Modell werden die EVA-Bewertungsfunktionen empfohlen, wobei die Ableitung des Grundmodells im Prinzip eine beliebige Funktion zulässt. Zusätzlich gibt es Betrachtungen über ein Prognoseverfahren und zur Berücksichtigung von Heimatstandorten bei nichtheingebundenen Ortsveränderungen.

2.6 Bewertung von Alternativen

Ein Term zur Bewertung von Aufwänden (Reisezeit, Kosten, Zugangszeit, etc.) ist Bestandteil eines jeden Nachfragemodells. Bei der Analyse der Bewertung von Aufwänden sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen. Häufig müssen mehrere Aufwände zusammengefasst werden, denn eine Alternative ist in der Regel durch mehr als eine Kenngröße charakterisiert. Speziell bei den Logit-Modellen wird diese zusammengefasste Größe als Nutzen oder Generalisierte Kosten bezeichnet. Der Begriff Bewertungsfunktion bezeichnet eine Funktion (Beispiel: Exponentialfunktion, EVA-Funktion), die einen funktionalen Zusammenhang zwischen einer (zusammengefassten) Aufwandsgröße und der Akzeptanz der Alternative durch die Verkehrsteilnehmer herstellt. Beide Größen zusammen, die Bewertungsfunktion und die (zusammengefasste) Aufwandsgröße, bilden die Bewertung einer Alternative durch die Personen ab. Diese Größe wird als *Bewertungsgröße* BG bezeichnet.

Für die Modellierung ist eine *valide* Abbildung des Verhaltens der Verkehrsteilnehmer von außerordentlicher Bedeutung. Deshalb ist eine eingehende Analyse der verwendeten Bewertungsgrößen notwendig. Diese Analyse wird in

den folgenden zwei Abschnitten 2.6.1 und 2.6.2 dargestellt.

2.6.1 Bewertungsfunktionen

Um die Validität von Bewertungsfunktionen zu beurteilen, muss das menschliche Wahlverhalten mit den Abbildungseigenschaften der Funktionen verglichen werden. Da aber umfassende empirische Untersuchungen zu dieser Fragestellung fehlen, bleibt im Rahmen dieser Arbeit lediglich die Möglichkeit, ein wahrscheinliches Wahlverhalten zu definieren und dieses dann für einen Vergleich heranzuziehen. Aus diesem Anlass werden deshalb hier die folgenden Hypothesen über das Wahlverhalten formuliert:

1. Mit zunehmendem absoluten Aufwand sinkt die Wahlwahrscheinlichkeit, wobei die Aufwandsunterschiede unterhalb einer gewissen Aufwandsgrenze (Nahbereich) aus der Sicht des Verkehrsteilnehmers unerheblich sind.
2. Mit zunehmendem Umweg¹⁰ einer Route verringert sich deren Routenwahlwahrscheinlichkeit, wobei die Verkehrsteilnehmer nur über ungenaue Informationen verfügen und Routen, deren Umwege sich einer gewissen Geringfügigkeitsgrenze nähern, tendenziell als gleichwertig wahrgenommen werden.
3. Die zunehmende Abhängigkeit einer Route von alternativen Routen senkt deren Wahlwahrscheinlichkeit, wobei kurze und umwegige Absprünge dazu führen, dass eine Route von den Verkehrsteilnehmern nicht bzw. nur sehr geringfügig beachtet wird.

Weitere Erläuterungen für diese Annahmen sind im Anhang A.3 dargestellt.

Im folgenden Text erfolgt die Analyse der Bewertungsfunktionen nach einem einheitlichen Schema. Zu jeder Funktion wird der Funktionsverlauf, die Elastizität¹¹ $\epsilon(w)$ der Funktion und eine einfache, typische Auswahlwahrscheinlichkeit dargestellt. Die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative kann im Bezug zum universalen Logit-Modell durch das Verhältnis der Bewertung der betrachteten Alternative zu der Summe der Bewertungen aller Alternativen angegeben werden:

$$P_r = \frac{F(w_r)}{\sum_{r'} F(w_{r'})} \quad .$$

¹⁰Umweg bezeichnet das Verhältnis des Routenaufwandes zum Aufwand der aufwandsgeringsten Route.

¹¹Zur Definition von Elastizität siehe Anhang A.2.

Im folgenden Text wird aus Gründen der Anschaulichkeit die Auswahlwahrscheinlichkeit P_1 bei nur zwei Alternativen w_1 und w_2 ($w_2 = q \cdot w_1$) dargestellt:

$$P_1 = \frac{F(w_1)}{F(w_1) + F(w_2)} = \frac{F(w_1)}{F(w_1) + F(q \cdot w_1)}$$

mit q als Umweg ($q \geq 1$).

Potenzfunktion Die Funktion

$$F(w) = w^{-\alpha} \quad (2.31)$$

wird bei dem Routenwahlmodell in Analogie zu den Stromaufteilungsregeln der Elektrotechnik nach KIRCHHOFF verwendet. Für $\alpha = 0$ gilt, dass alle Alternativen den gleichen Anteil $P = 1/N$ erhalten. Ein höherer α -Wert führt zur Bevorzugung der aufwandsgeringeren Alternative, eine eindeutige Entscheidung zugunsten der aufwandsgeringsten Route ist gegeben, wenn $\alpha \rightarrow \infty$ strebt. Bei der Annäherung des Aufwandes an den Wert $w = 0$ strebt die Funktion asymptotisch gegen unendlich. Die Elastizität der Potenzfunktion ist konstant ($\epsilon(w) = -\alpha$) und in Abbildung 2.7 (Mitte) dargestellt.

Im Hinblick auf die Auswahlwahrscheinlichkeit weist die Potenzfunktion die Eigenschaft auf, nur das Verhältnis der Aufwände zu bewerten ($P_r/P_k = F(w_r)/F(w_k) = (w_r/w_k)^\alpha$). Die Abbildung 2.7 zeigt den Graphen, die Elastizität $\epsilon(w)$ und die sich ergebende Auswahlwahrscheinlichkeit, wenn die Aufwände mit der Potenzfunktion bewertet werden.

Exponentialfunktion In allen Logit-Modellen wird eine Exponentialfunktion zur Bewertung der Generalisierten Kosten verwendet

$$F(w) = \exp(V) \quad (2.32)$$

mit $V = \sum_{x'} \beta_{x'} \cdot w_{x'}$, $\beta < 0$ als deterministischer Nutzen (Generalisierte Kosten) der Alternative. Kleinere β -Werte führen zu einer stärkeren Bevorzugung der aufwandsgeringeren Route. Für den Fall, dass die Generalisierten Kosten V lediglich aus einem Aufwandswert bestehen (also $F(w) = \exp(\beta \cdot w)$) ist die Elastizitätsfunktion $\epsilon(w) = \beta \cdot w$ ($w > 0$) und damit linear fallend. Die Abbildung 2.8 (unten) zeigt die Auswahlwahrscheinlichkeit. Die Exponentialfunktion hat die Eigenschaft, dass für die sich ergebende Auswahlwahrscheinlichkeit nur die Differenz der Aufwandswerte maßgebend ist:

$$P_r/P_s = \exp(V_r)/\exp(V_s) = \exp(V_r - V_s) \quad .$$

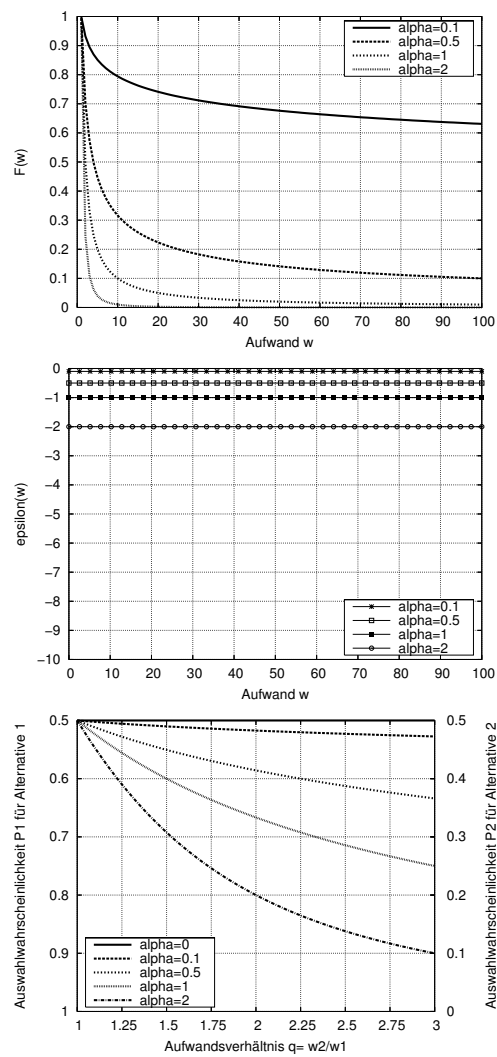


Abbildung 2.7: Potenzfunktion: Graph (oben), Elastizität (Mitte) und Auswahlwahrscheinlichkeit von Alternativen (unten), Quelle: LOHSE et al. [33].

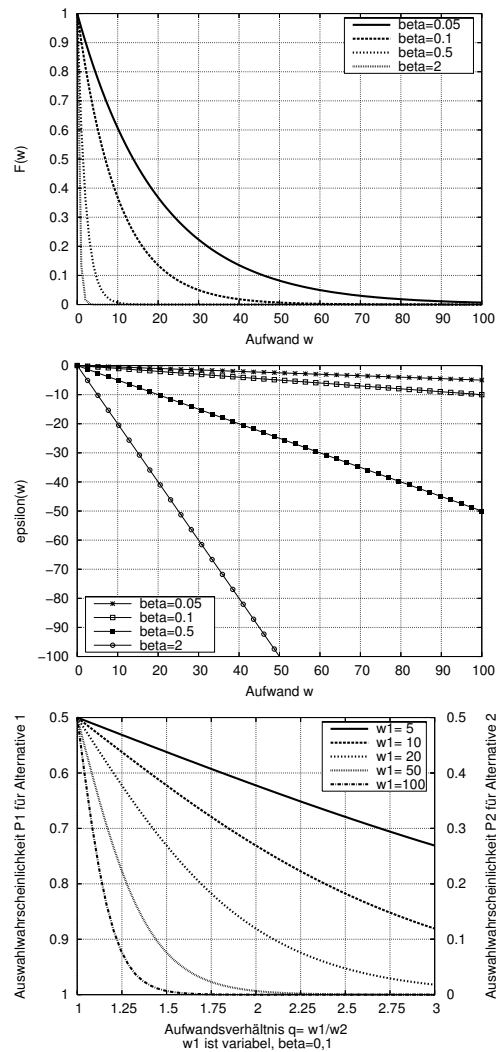


Abbildung 2.8: Exponentialfunktion: Graph (oben), Elastizität (Mitte) und Auswahlwahrscheinlichkeit von Alternativen (unten), Quelle: LOHSE et al. [33]. Für die Darstellung gilt: $F(w) = \exp(\beta \cdot w)$.

Modifikationen des Logit-Modells Von LOHSE [43] wird speziell für die Bewertung von Routen in einem Routenwahlmodell eine Bewertungsfunktion nach Gl. 2.33 vorgeschlagen. Der Parameter β ist entweder ein konstanter Wert (Modifikation 1) oder eine Funktion der minimalen Reisezeit (Modifikation 2) nach Gl. 2.11:

$$F(w) = \exp[-\beta^2(w^{\min}) \cdot (\frac{w_r}{w^{\min}} - 1)^2] \quad \text{mit} \quad w^{\min} = \min_{r'}(w_{r'}) \quad (2.33)$$

(falls $w < w^{\min}$ gilt, dann wird in der Abbildung $F(w) = 1$ gesetzt) mit

$$\beta = f(w^{\min}) = \frac{E}{1 + \exp(F - G \cdot w^{\min})} \quad .$$

mit den Parametern $E = 12, F = 0,7$ und $G = 0,015$ für eine minimale Reisezeit w^{\min} in der Einheit Minuten (siehe Abbildung 2.9).

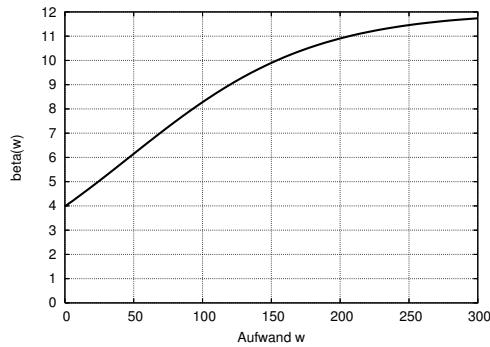


Abbildung 2.9: Graph der β -Funktion

Diese Bewertungsfunktion verfügt über eine Reihe von interessanten Eigenschaften. Zum einen wird nicht nur die Differenz zwischen den Verhältnissen bewertet (Verwendung der Exponentialfunktion), sondern auch das Verhältnis zur aufwandsgeringsten Route. Durch den Exponenten 2 wird eine zusätzliche nichtlineare Bewertung dieses Verhältnisses eingeführt. Für die Auswahlwahrscheinlichkeit folgt daraus, dass marginale Aufwandsunterschiede nur sehr geringe Auswirkungen haben und die aufwändigere Route keinesfalls stark abgewertet werden. Bedingt durch den aufwandsabhängigen Koeffizienten β ergeben sich – bei gleichem Aufwandsverhältnis – für unterschiedliche Aufwandsklassen (d.h. Nah- und Fernverkehr) unterschiedliche Auswahlwahrscheinlichkeiten.

Der Verlauf der Auswahlwahrscheinlichkeit ist in Abbildung 2.10 (unten) dargestellt.

Die Elastizität der Bewertungsfunktion mit der Funktion $\beta(w^{\min})$ ist

$$\epsilon(w) = -2 \cdot \beta^2 \cdot \left(\frac{w}{\min_{r'}(w_{r'})} - 1 \right) \cdot \frac{w}{\min_{r'}(w_{r'})} \quad \text{für} \quad \frac{w}{\min_{r'}(w_{r'})} \geq 1$$

und sie ist abhängig von der absoluten Größe der aufwandsgeringsten Route (siehe Abbildung 2.10 (Mitte)).

EVA1-Funktion Im EVA-Modell – sowohl im bilinearen Modell für die Verkehrsverteilung als auch im trilinearen Modell für die simultane Verteilung und Aufteilung – werden heuristisch gefundene Funktionen zur Bewertung von einzelnen Aufwänden verwendet. Die sogenannten EVA1-Funktion

$$F(w) = \frac{1}{(1+w)^{\phi(w)}} \quad \text{mit} \quad \phi(w) = \frac{E}{1 + \exp(F - G \cdot w)} \quad (2.34)$$

bzw. in einer anderen Schreibweise für $\phi(w)$ mit dem Wendepunkt $WP = F/G$ der Funktion $\phi(w)$ ist

$$\phi(w) = \frac{E}{1 + \exp(F \cdot (1 - w/WP))} \quad .$$

Dabei bedeuten

$$\begin{aligned} E, F, G & \text{ Parameter} \quad , \\ WP & \text{ Wendepunkt} \quad . \end{aligned}$$

Der Verlauf der Kurven ist in Abbildung 2.11 (oben) angegeben. Im Bereich geringer Aufwände (dem hier sogenannten Nahbereich) unterscheidet sich die EVA1-Funktion deutlich von anderen Funktionen. Im Nahbereich tendiert der negative Anstieg der Kurve gegen den Wert Null. Es entsteht eine Halbglockenform. Daraus folgt, dass sich im Nahbereich Aufwandsänderungen kaum auf die Nachfrage auswirken. Unabhängig von der empfohlenen Form des Graphen ist die EVA1-Funktion in ihrem Verlauf sehr variabel, denn sie kann – je nach verwendetem Parametersatz – die Form einer Halbglockenkurve oder die konkaven Formen ähnlich der Potenz- und Exponentialfunktion annehmen, einen

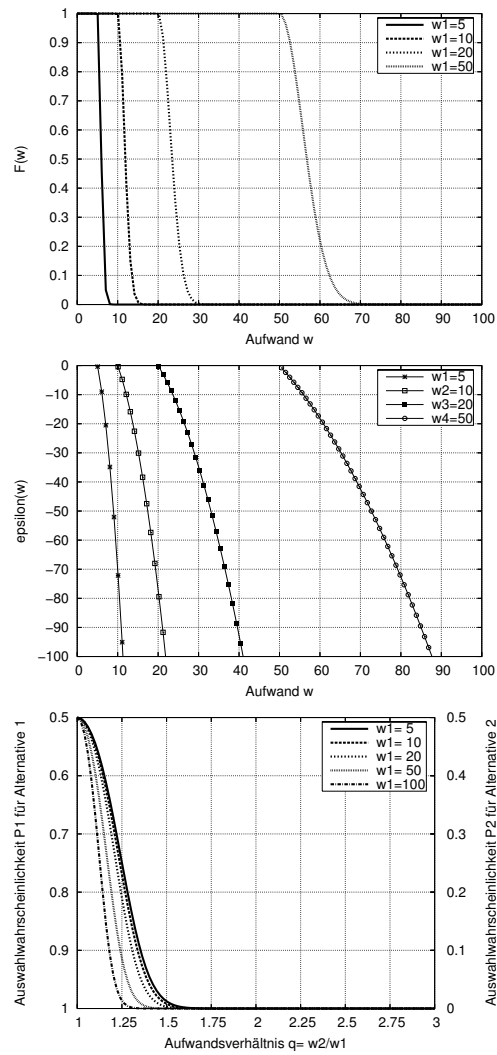


Abbildung 2.10: Logit-Modell, Modifikation 2: Graph der Bewertungsfunktion (oben), Elastizität bei verschiedenen Aufwandsminima (Mitte) und die Auswahlwahrscheinlichkeit (unten).

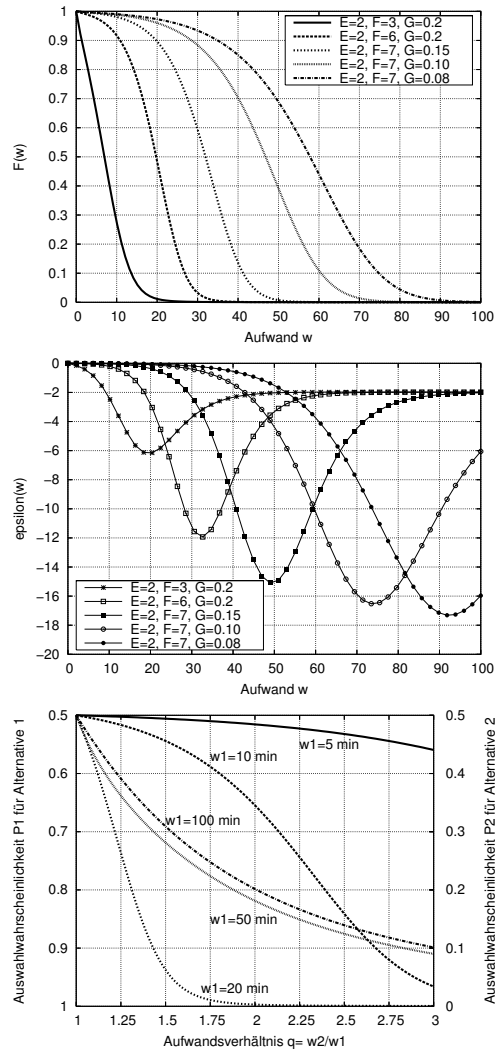


Abbildung 2.11: EVA1-Funktion: Graph (oben), Elastizität (Mitte) und die Auswahlwahrscheinlichkeit (unten), Quelle: LOHSE et al. [33]. Annahmen: Parameter beider Funktionen $E = 2$, $F = 6$, $G = 0,2$, das entspricht der 2. Funktion von links in der oberen Abbildung.

linear fallenden Verlauf aufweisen oder eine Konstante abbilden ($F(w) = 1$ für $E = 0$). Die Elastizität der EVA1-Funktion ist

$$\epsilon(w) = -\frac{E \cdot w}{1 + \exp(F - G \cdot w)} \cdot \left[\frac{1}{1 + w} + \ln(1 + w) \cdot \frac{G \cdot \exp(F - G \cdot w)}{1 + \exp(F - G \cdot w)} \right] \quad (2.35)$$

mit dem Grenzwert

$$\lim_{w \rightarrow \infty} \epsilon(w) = -E \quad \text{und} \quad \epsilon(0) = 0$$

und unterscheidet sich deutlich von den konstanten oder linearen Verläufen der Potenz- oder Exponentialfunktion (siehe Abb. 2.11 (Mitte)). Aus dem Kurvenverlauf ist ersichtlich, dass die Elastizität

- bei geringen Aufwandswerten nahe Null ist,
- in einem begrenzten Wertebereich (hierin sei die Empfindlichkeit am größten) wesentlich von Null verschiedene Werte annimmt und
- sich bei großen Aufwänden (d.h. im letzten Abschnitt) an den Grenzwert $\epsilon = -E$ annähert.

Damit wird auch deutlich, wie die EVA1-Funktion auf Aufwandsänderungen reagiert, beziehungsweise welches Bewertungsverhalten unterstellt wird:

- bei geringen Aufwandswerten keine Reaktion (hohe Akzeptanz, Unterschiede unwesentlich oder nicht wahrnehmbar),
- bei mittleren Aufwandswerten eine starke Reaktion (Bereich des sorgfältigen Abwägens) und
- bei großen Aufwänden nur geringe Reaktion (eventuell vorhandene Unterschiede sind nicht (mehr) bedeutend).

Im Abschnitt 2.2 wurde die wahrscheinlichkeitstheoretische Ableitung des bilinearen EVA-Modells vorgenommen. Im dort beschriebenen Sinne sind die EVA-Funktionen die bedingte Wahrscheinlichkeit für die Realisierung einer potenziellen Ortsveränderung zwischen der Quelle i und dem Ziel j mit dem Verkehrsmittel k .

In der Abbildung 2.11 (unten) ist dargestellt, welche Auswahlwahrscheinlichkeiten sich ergeben, wenn die EVA1-Funktion für die Bewertung von Alternativen verwendet wird. Bei dem gewählten Parametersatz haben Aufwände von 0 bis 15, aber auch wieder ab 50 Einheiten eine geringe Elastizität. Damit sind die Umwege q für die Routenpaare mit 5, 10 aber auch 50 und 100 min

(Minimum beider Routen) relativ unerheblich (flacher Abfall der Auswahlwahrscheinlichkeit). Speziell für das Routenpaar mit 100 Minuten minimaler Reisezeit bedeutet das eine Auswahlwahrscheinlichkeit für Route 2 bei $q = 2$ (das entspricht einer Reisezeit von 200 min.) von immerhin noch 20 % gegenüber der kürzeren Route von 100 min Reisezeit.

Die EVA2-Funktion ist eine neuere Variante der heuristischen Funktion (LOHSE [32]).

$$F(w) = \left[1 + \left(\frac{w}{F} \right)^G \right]^{-\frac{E}{G}} \quad (E > 0, F > 0, G > 0, E/G > 0)$$

mit dem Wendepunkt WP der Funktion $F(w)$

$$WP = F \cdot \left(\frac{G-1}{E+1} \right)^{1/G}$$

ergibt eine Schreibweise mit den Parametern E, G und WP

$$F(w) = \left[1 + \left(\frac{G-1}{E+1} \right) \cdot \left(\frac{w}{WP} \right)^G \right]^{-\frac{E}{G}}. \quad (2.36)$$

Die zugehörige Elastizitätsfunktion ist

$$\epsilon(w) = -E \cdot \frac{w^G}{F^G + w^G} = -E \cdot \frac{w^G}{\frac{(E+1)}{(G-1)} \cdot WP^G + w^G} \quad (2.37)$$

mit

$$\lim_{w \rightarrow \infty} \epsilon(w) = -E \quad \text{und} \quad \epsilon(w=0) = 0 \quad .$$

Die Abbildung 2.12 zeigt den Verlauf der Graphen der EVA2-Funktion, welcher dem Verlauf der EVA1-Funktion sehr ähnlich ist (Halbglockenkurve). Dementsprechend gelten die oben ausgeführten Aussagen zum Kurvenverlauf auch für die EVA2-Funktion. Die Graphen der Elastizitätsfunktion sind in Abb. 2.12 (Mitte) dargestellt. Die Elastizität ist monoton fallend. Bei einer Routenwahl führt diese Eigenschaft dazu, dass mit zunehmender Reisezeit die Akzeptanz von Umwegen immer geringer wird (siehe Abb. 2.12 (unten)). Gemessen an der Realität erscheint dieses Ergebnis plausibler als das der EVA1-Funktion.

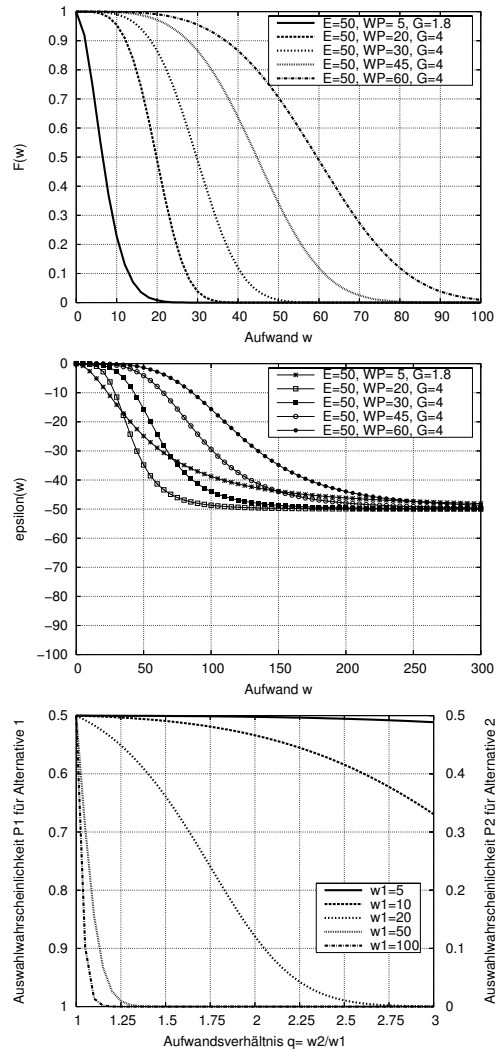


Abbildung 2.12: EVA2-Funktion: Graph (oben), Elastizität (Mitte) und Auswahlwahrscheinlichkeit von Alternativen (unten). Annahmen: Parameter beider Funktionen $E = 50, WP = 30, G = 4$, das entspricht der 3. Funktion von links in der oberen Abbildung.

Transformationsfunktionen

Die Transformationsfunktionen sind gewöhnliche Funktionen. Da sie spezielle Kurvenverläufe haben, werden sie gerne als Hilfsfunktionen genutzt, um die unabhängigen Variablen in den Bewertungsfunktionen zu transformieren (MAIER et al. [35]). Nachfolgend werden einige Transformationsfunktionen vorgestellt.

Box-Cox-Transformation Die Box-Cox-Transformationsfunktion ist eine Funktion der folgenden Form:

$$F^{(BC)}(w) = \begin{cases} (w^\lambda - 1)/\lambda & \text{für } \lambda \neq 0, \\ \ln w & \text{für } \lambda = 0 \end{cases} . \quad (2.38)$$

Der Parameter λ ist durch den Nutzer festzulegen. Die Abbildung 2.13 zeigt den Verlauf der Transformationsfunktion. Die Box-Cox-Transformation wird häufig

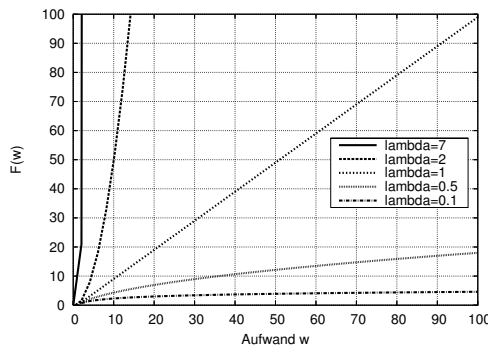


Abbildung 2.13: Box-Cox-Transformation

mit dem MNL-Modell verwendet. Es gibt die Varianten, dass entweder die zusammengefasste Aufwandsgröße oder jeder Aufwand transformiert wird (siehe Gl. 2.19 oder VISEM [1]). Dementsprechend lauten die Bewertungsfunktionen für eine Alternative entweder

$$F(w) = \exp(F^{(BC)}(V)) ,$$

oder jene Variante, bei der jeder Aufwand transformiert wird:

$$F(w) = \exp(V^*) \quad \text{mit dem Nutzen} \quad V^* = \sum_{x'} \beta_{x'} \cdot F^{(BC)}(w_{x'}) .$$

Nachteilig ist, dass der Graph nicht durch den Koordinatenursprung verläuft, sondern durch den Punkt $[1,0]$. Dadurch sind die Aufwandswerte zwischen Null und Eins negativ. Die Box-Tukey-Transformation überwindet diesen Nachteil.

Box-Tukey-Transformation Die Box-Tukey-Funktion ähnelt der Box-Cox-Transformation. Sie enthält einen zusätzlichen Parameter α , mit dessen Hilfe der Graph gegenüber der x-Achse verschoben werden kann (falls $\alpha = 1$, dann verläuft der Graph durch den Koordinatenursprung).

$$F^{(BT)}(w) = \begin{cases} ((w + \alpha)^\lambda - 1)/\lambda & \text{für } \lambda > 0 \\ \ln(w + \alpha) & \text{für } \lambda = 0 \end{cases} \quad (2.39)$$

Die Abbildung 2.14 (oben) zeigt die Graphen mit verschiedenen λ -Parametern. Wenn die Box-Tukey-Transformation auf die Nutzenfunktion in einem Logit-Modell angewendet wird, ergeben sich flexiblere Kurvenverläufe, die auch der Halbglockenform der EVA-Funktion ähneln können. Dazu sind sehr kleine β -Parameter ($10^{-4} \dots 10^{-2}$) und λ -Werte zwischen $2 \dots 10$ zu wählen. Die Elastizität einer Exponentialfunktion mit der Box-Tukey-Transformation ist

$$\epsilon(w) = \begin{cases} -\beta \cdot w \cdot (w + 1)^{(\lambda-1)} & \text{für } \lambda > 0 \\ -\frac{\beta \cdot w}{(w+1)} & \text{für } \lambda = 0 \end{cases} \quad (2.40)$$

und in Abbildung 2.14 (Mitte) dargestellt. Der Grenzwert dieser Funktion ist

$$\lim_{w \rightarrow \infty} = \begin{cases} \infty & \text{für } \lambda > 0 \\ -\beta & \text{für } \lambda = 0 \end{cases} \quad .$$

Die sich aus der Anwendung der Box-Tukey-Transformation auf den Nutzen eines Logit-Modells ergebende Auswahlwahrscheinlichkeit zeigt Abbildung 2.14 (unten).

EVA-Transformation Die EVA-Transformation ist

$$F^{(EVA)}(w) = \begin{cases} \alpha + \beta \cdot 1/F(w) & \text{direkter Zusammenhang} \\ \alpha + \beta \cdot F(w) & \text{indirekter Zusammenhang} \end{cases} \quad , \quad (2.41)$$

wobei die Größe $F(w)$ den EVA-Funktionen nach Gl. 2.34 oder Gl. 2.36 entspricht (α und β sind Parameter). Der Begriff „direkter Zusammenhang“ beschreibt die Situation, dass mit zunehmendem Aufwand auch die Kosten ansteigen. Die Funktionsverläufe sind in den Abbildungen 2.15 und 2.16 dargestellt (LOHSE [32], THEEG [49]).

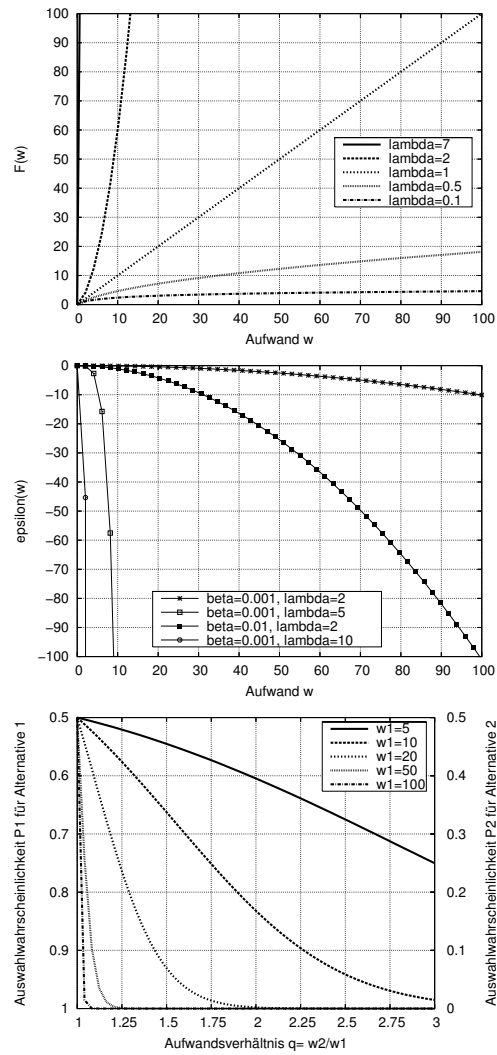


Abbildung 2.14: Box-Tukey-Transformation: Graph (oben), Elastizität einer Exponentialfunktion mit Box-Tukey-Transformation (Mitte) und Auswahlwahrscheinlichkeit von Alternativen in einem MNL-Modell mit BT-Transformation (unten). Annahmen: $\lambda = 2, \beta = 0,01$.

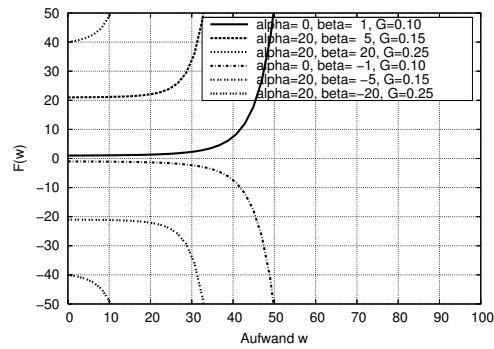


Abbildung 2.15: EVA-Transformation mit direktem Zusammenhang, Annahmen: $E = 2$, $F = 5$.

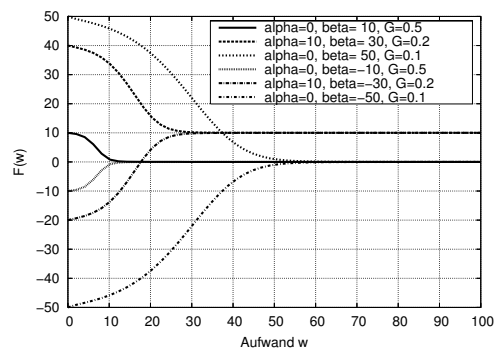


Abbildung 2.16: EVA-Transformation mit indirektem Zusammenhang, Annahmen: $E = 2$, $F = 5$.

2.6.2 Zusammenfassung von Aufwänden

Häufig wird eine Alternative durch mehrere Aufwände beschrieben. Ein typischer Fall für die Bildung einer Bewertungsgröße aus mehreren Aufwänden sind die Generalisierten Kosten der Logit-Modell-Familie. Die Generalisierten Kosten sind eine Summe von gewichteten Aufwänden in der Form:

$$GK = \beta_1 \cdot w_1 + \beta_2 \cdot w_2 + \dots + \beta_{N(x)} \cdot w_{N(x)} = \sum_{x'} \beta_{x'} \cdot w_{x'} \quad .$$

Beim Einsetzen dieser Gleichung in die Exponentialfunktion der Logit-Modelle entsteht eine Bewertungsgröße BG . Es zeigt sich, dass die bewerteten Aufwände multiplikativ verknüpft sind:

$$\begin{aligned} BG &= \exp(GK) = \exp\left(\sum_{x'} \beta_{x'} \cdot w_{x'}\right) \\ &= F_1(w_1) \cdot F_2(w_2) \cdot \dots \cdot F_{N(x)}(w_{N(x)}) \\ &= \prod_{x'} F_{x'}(w_{x'}) \quad . \end{aligned}$$

In Bezug auf die EVA-Bewertungsgröße und der darin enthaltenen multiplikative Verknüpfung von bewerteten Aufwänden wird somit deutlich, dass kein Widerspruch zu der in den Logit-Modellen enthaltenen Bewertungsphilosophie besteht. Die EVA-Bewertungsgröße lässt sich so umwandeln, dass sie äußerlich dem Bewertungsschema der Logit-Modelle (d.h. der Bewertung von Generalisierten Kosten mittels Exponentialfunktion) entspricht:

$$\begin{aligned} BG^{\text{EVA}} &= \prod_{x'} F_{x'}(w_{x'}) = \exp\left[\ln\left(\prod_{x'} F_{x'}(w_{x'})\right)\right] = \exp\left[\sum_{x'} \ln F_{x'}(w_{x'})\right] \\ BG^{\text{EVA}} &= \exp[GK^{\text{EVA}}] \quad . \end{aligned}$$

Allgemeine Auflistungen, welche Aufwände die Wahl beeinflussen, sind an vielen Stellen in der Literatur zu finden. Allen Erläuterungen ist gemein, dass die Reisezeit als die wesentliche oder eine der wesentlichen Einflussgrößen dargestellt wird. Darüber hinaus beeinflussen auch soziodemographische Merkmale wie z.B. das Einkommen, der Führerscheinbesitz oder die PKW-Verfügbarkeit die Wahl einer Alternative. Bei den meisten Ansätzen besteht die Möglichkeit, für die unterschiedlichen homogenen Klassen auch unterschiedliche Parameter und Einflussgrößen anzugeben. Im folgenden Text sind ausgewählte Bewertungsgrößen für die verschiedenen Wahlmodelle angegeben.

Beispiele für Bewertungsgrößen

Im Programm VISEM [1] wird beispielsweise für die Verkehrsaufteilung die Bewertungsgröße BG einer Verkehrsart k wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} BG &= \exp(V) \\ &= \exp(-\beta_1 \cdot FZ - \beta_2 \cdot Z + \beta_3 \cdot \ln(D/\beta_4) \\ &\quad - \beta_5 \cdot KOST + \beta_6 + \beta_7 \cdot A) \quad . \end{aligned}$$

Dabei bedeuten:

A	zusätzliche Angebotskenngröße der Verkehrsart k ,
β	Parameter,
FZ	Fahrzeit der Verkehrsart k ,
$KOST$	Kosten der Verkehrsart k ,
Z	Summe aus Zugangs- und Abgangszeit für die Verkehrsart k .

Alternativ dazu kann in VISEM auch die Box-Cox-Transformation (Gl. 2.38) auf einzelne Aufwandsgrößen in der Nutzenfunktion angewendet werden. Der Parameter λ der Transformation kann für jede Aufwandsgröße getrennt angegeben werden ($\lambda = \lambda_{x,k}$).

Von INTRAPLAN [25] wird ein Logit-Modell für die Aufteilung auf Verkehrsarten, einschließlich einer Verkehrsart P+R angewandt. Es wird folgende Bewertungsgröße verwendet:

$$\begin{aligned} BG = \exp(V) &= \exp(\beta_1 \cdot RZ + \beta_2 \cdot KOST + \beta_3 \cdot 1/BH \\ &\quad + \beta_4 \cdot UH + \beta_5 \cdot 1/P + \beta_6) \end{aligned}$$

mit

β	Parameter,
BH	Bedienungshäufigkeit der Verkehrsart k der Relation ij ,
$KOST$	Kosten der Verkehrsart k der Relation ij ,
P	Wahrscheinlichkeit für das Finden eines Parkplatzes,
RZ	Reisezeit der Verkehrsart k der Relation ij ,
UH	Umsteigehäufigkeit der Verkehrsart k der Relation ij .

Je nach Verkehrsart ist nur ein Teil der Einflussgrößen belegt. Speziell für die Verkehrsart P+R setzt sich die Reisezeit aus der Summe der Komplexen Reisezeiten beider Verkehrssysteme zusammen, gleiches gilt für die Kosten. Die Bedienungshäufigkeit und die Umsteighäufigkeit einer P+R-Route entsprechen der ÖV-Kenngröße.

Welche Aufwände in die Bewertung von Routen eingehen, ist maßgeblich von der betrachteten Verkehrsart abhängig. Das Programmsystem VISUM [3] bietet für die Routenwahl im ÖV eine komplexe Bewertungsgröße für die Route r an:

$$BG = F(\alpha_1 \cdot RZ + \alpha_2 \cdot KOST + \alpha_3 \cdot \Delta^{früh} + \alpha_4 \cdot \Delta^{spät})$$

mit

$$\begin{aligned} RZ &= \beta_1 \cdot FZ + \beta_2 \cdot ZU + \beta_3 \cdot AB + \beta_4 \cdot GEH \\ &\quad + \beta_5 \cdot SW + \beta_6 \cdot UW + \beta_7 \cdot UH \quad , \\ \Delta^{früh} &= \begin{cases} |T_{Ab}^{Soll} - T_{Ab}^{Ist}| & \text{wenn } T_{Ab}^{Soll} > T_{Ab}^{Ist} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad , \\ \Delta^{spät} &= \begin{cases} |T_{Ab}^{Soll} - T_{Ab}^{Ist}| & \text{wenn } T_{Ab}^{Soll} < T_{Ab}^{Ist} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad . \end{aligned}$$

Dabei bedeuten:

α, β	Parameter,
AB	Abgangszeit der Route r ,
$\Delta^{früh}$	Zeitzuschlag für Verfrühung,
$\Delta^{spät}$	Zeitzuschlag für Verspätung,
FZ	Fahrzeit der Route r ,
GEH	Summe der Gehzeiten der Route r ,
$KOST$	Kosten der Route r ,
RZ_r	Reisezeit der Route r ,
SW	Startwartezeit der Route r ,
T	Zeitpunkt der Abfahrt bzw. Ankunft
UH	Umsteighäufigkeit der Route r ,

UW	Umsteigewartezeit der Route r ,
ZU	Zugangszeit der Route r .

Die Bewertungsfunktion $F()$ kann angemessen gewählt werden, z.B. eine Potenzfunktion, eine Exponentialfunktion und optional zusätzlich mit einer Box-Cox-Transformation.

In LOHSE [43] S. 210 wird ein Beispiel für die multiplikative Verknüpfung von Aufwänden zu einer Bewertungsgröße für die simultane Verteilung und Aufteilung (EVA-Modell) einer Verkehrsbeziehung ijk angegeben (vgl. Abschnitt 2.5.2):

$$\begin{aligned}
 BG = & PVMV \cdot F(VMA) \cdot F(KOST) \cdot F(ZU) \\
 & \cdot F(WZ) \cdot F(UH) \cdot F(UZ) \cdot F^k(AB) \\
 & \cdot [F(RZ) - PKF \cdot F(KF)] \quad ,
 \end{aligned} \tag{2.42}$$

dabei bedeuten:

AB	Abgangszeit,
$F(w)$	EVA-Funktion nach Gl. 2.34 für den Aufwand w ,
KF	Reisezeit der konkurrierenden Verkehrsart Fußgänger,
$KOST$	Kosten,
PKF	Parameter; entspricht dem Fußweganteil für $KF = 0$,
$PVMV$	Verkehrsmittelverfügbarkeit der Verkehrsart k in Bezirk i ,
RZ	Komplexe Reisezeit,
UZ	Umsteigezeit,
VMA	Verkehrsmittelangebot (z.B. mittlere Zugfolgezeit),
WZ	Wartezeit,
ZU	Zugangszeit.

BOBINGER [13] verwendet für die Bewertung von Alternativen die Generalisierten Kosten mit konstanten Gewichten. In LOHSE [32] werden Generalisierte Kosten mit nichtlinearen Parametern für ein Simultanmodell vorgestellt:

$$\begin{aligned}
 GK = & \gamma_1 \cdot w_1 \cdot z_1 + \gamma_2 \cdot w_2 \cdot z_2 + \dots + \gamma_{N(x)} \cdot w_{N(x)} \cdot z_{N(x)} \\
 = & \sum_{x'} \gamma_{x'} \cdot w_{x'} \cdot z_{x'} \quad ,
 \end{aligned} \tag{2.43}$$

wobei γ die nichtlineare EVA-Transformationsfunktion mit direktem Zusammenhang $F^{(EVA)}$ nach Gl. 2.41 mit den zugehörigen Parametern α, β, E, WP und G darstellt. Die Zeitbewertungsfaktoren z geben den monetären Wert einer

Einheit des Aufwands an. Die Generalisierten Kosten allein stellen noch keine Bewertungsgröße dar, sie werden weiter transformiert:

$$BG = F(GK)$$

mit $F()$ als EVA2-Funktion (siehe Gl. 2.36).

2.6.3 Fazit

Verschiedene Bewertungsgrößen fassen verschiedene Aufwände zusammen und es gibt verschiedene Funktionen für die Bewertung von Aufwänden. Welche Aufwände tatsächlich in die Bewertungsgröße eingehen, hängt von der Modellierungsaufgabe ab.

Die EVA-Funktionen sind sehr variabel und deshalb als Bewertungsfunktion, beispielsweise für die Verkehrsverteilung oder die nichtlineare Gewichtung von Aufwänden innerhalb der Generalisierten Kosten, geeignet. Gleichzeitig genügen die EVA-Funktionen jedoch den speziellen Ansprüchen an ein Routenwahlmodell nicht, denn es mangelt an einer differenzierten und gesonderten Reaktion auf den Umweg von Routen. Von den eingangs formulierten Hypothesen erfüllen die EVA-Funktionen nur die erstgenannte Annahme.

Die Modifikation 2 des Logit-Modells (LOHSE [43]) ist eine speziell für die Routenwahl entwickelte Funktion. Längere Routen werden unter Berücksichtigung des absoluten Aufwandes abgewertet, wobei geringste Unterschiede (d.h. $q \approx 1, 0$) zu einer Gleichverteilung des Stromes über beide Alternativen führen (siehe Abb. 2.10). Diese Funktion eignet sich wiederum nicht für die Bewertung innerhalb einer Verteilung. Die 2. Modifikation des Logit-Modells erfüllt die Anforderungen der zweitgenannten Hypothese.

Die Ergebnisse der Analyse der Exponentialfunktion des Logit-Modells oder der Potenzfunktion lassen den Schluss zu, dass diese Funktionen weder für die Verteilung noch für ein Routenwahlmodell empfohlen werden können.

Es ergibt sich zwangsläufig die Frage, ob nicht *eine* Funktion existiert, die sich für die Abbildung der Ziel- und Routenwahl eignet. Bei genauer Betrachtung der beiden erstgenannten Hypothesen ist zu erkennen, dass diese eine Bewertungsfunktion tendenziell sowohl fallend (für Verteilung) als auch konstant (Routenwahl für Routen mit geringfügigen Unterschieden) sein soll, was jedoch mit einer einzigen Funktion nur schwer zu erreichen ist. Die Nutzung von zwei Bewertungsfunktionen im Simultanmodell ist folglich die einzige Möglichkeit, eine valide Bewertung zu erreichen.

Kapitel 3

Angebotsmodellierung – Ermittlung von Routen

Die Routen repräsentieren das Verkehrsangebot des Netzes. Die Kenngrößen der Routen gehen als Aufwände in das Nachfragemodell ein. In diesem Kapitel wird dargestellt, wie die Netze der verschiedenen Verkehrsarten modelliert und die darin realisierbaren Routen ermittelt werden.

Elementare Netzelemente Durch einen Blick auf Straßenkarten oder auf Liniennetzpläne des Öffentlichen Verkehrs werden die Analogien zu einem Graphen offensichtlich. Die Graphentheorie ist das mathematische Werkzeug, um Netze und die zugehörigen Routensuchalgorithmen zu beschreiben (BIES [12], JUNGnickel [26], RIBBECK [40]).

Die Verzweigungspunkte des Netzes (im MIV-Netz: Knotenpunkte, im ÖV-Netz: Haltestellen) werden graphentheoretisch durch *Knoten* dargestellt. Diese Verzweigungspunkte werden durch *Kanten* verbunden, welche die Verkehrsstrassen abbilden. Die Kanten verfügen über einen Richtungssinn, d.h. für die Abbildung einer Zweirichtungsfahrbahn werden zwei Kanten benötigt. Die *Verkehrsbezirke* sind die räumlichen Einheiten des Untersuchungsgebietes, auf deren Grundlage die Nachfrageberechnung durchgeführt wird. Der räumliche Schwerpunkt des Bezirkes wird ebenfalls durch einen Knoten dargestellt. Die Schwerpunkte sind die Quellen und Ziele der Verkehrsströme der Matrix. Sie sind die Start- oder Endknoten, jedoch nie Zwischenknoten einer Route. Die Verbindung zwischen einem Bezirksschwerpunkt und dem Verkehrsnetz wird durch eine

Anbindung hergestellt. Die Anbindungen haben zwei Funktionen. Sie verbinden den Bezirksschwerpunkt mit den räumlich nächsten Netzknoten. Zusätzlich sind die Anbindungen auch ein Ersatz für das untergeordnete, nicht modellierte Netz. Graphentheoretisch handelt es sich bei den Anbindungen ebenfalls um Kanten.

Routen und Routensuchalgorithmen Eine *Route* (synonym: Verbindung, Weg) ist eine Folge von Kanten. Diese Folge beginnt und endet an Bezirksschwerpunkten. Routen können in *Teilrouten* zerlegt werden.

Für die Ermittlung von Routen existieren unterschiedliche Algorithmen. Die Bestwegroutensuchalgorithmen ermitteln nur die beste¹ Route, hingegen finden die Mehrwegroutensuchalgorithmen die k-besten Routen. Die Bestwegroutensuchalgorithmen (z.B. von MOORE, DIJKSTRA, PAPE) sind zahlreich beschrieben worden (DOMSCHKE [18], JUNGnickel [26]).

Die Entwicklung von Mehrwegalgorithmen wurde für die Anwendung in der Verkehrsplanung lange Zeit nicht sehr intensiv verfolgt. Die wesentliche Ursache hierfür mag gewesen sein, dass diese Algorithmen aufwändiger sind. In jüngerer Zeit haben MACK [34], LENER [31] und FRIEDRICH et al. [23] die Anwendung von Mehrwegalgorithmen in ÖV-Netzen untersucht. Eine Übersicht über die Mehrwegverfahren in MIV-Netzen gaben in jüngster Zeit SCHÜLER [45] und RAMMING [38] an.

Mehrwegalgorithmen sind entweder Verallgemeinerungen oder wiederholte Anwendungen von Bestwegalgorithmen. Es gibt exakte Mehrwegverfahren, aber auch heuristische Ansätze. Bei der Eliminationsmethode („link elimination“) werden eine oder mehrere Kanten des Bestweges gelöscht, um im nächsten Versuch andere beste Routen zu finden. In einem anderen Verfahren werden denjenigen Kanten, die zu der vormals besten Route gehörten, Strafbzuschläge zu den Aufwänden („link penalty“) zugewiesen. Wiederum andere Verfahren nutzen eine vom Bestweg abzweigende Kante als Startkante für die Suche einer neuen Teilroute. Die Kombination von so ermittelten Teilrouten führt zu den k-besten Routen. Ebenso kann das untersuchte Kriterium (Grundreisezeit, verkehrsstärkenabhängige Reisezeit, Distanz, Zahl der Abbiegevorgänge etc.) des Bestwegverfahrens variiert werden, um bei jeder Ausführung des Algorithmus andere Routen zu finden. Eine mögliche Alternative ist die Monte-Carlo-Simulation. Eine Monte-Carlo-Simulation des Routenwahlverhaltens ist im Kapitel 4 beschrieben.

¹Zuvor muss definiert werden, welches Aufwandskriterium verwendet wird. In der Regel wird mit beste Route die zeitschnellste Route assoziiert. Andere Aufwandskriterien wie z.B. Distanz oder Generalisierte Kosten sind aber ebenso möglich.

3.1 Modellierung eines MIV-Netzes

Auflösung von Straßenknoten Die Straßenverkehrsknotenpunkte werden in der Regel nicht als Knoten betrachtet, sondern weiter aufgelöst. Dadurch können die Abbiegebeziehungen (einschließlich der Abbiegeverbote) modelliert werden. Die Abbiegebeziehungen werden als Kanten dargestellt. Die Abbildung 3.1 zeigt einen vierarmigen, aufgelösten Straßenknoten. Durch die Auflösung

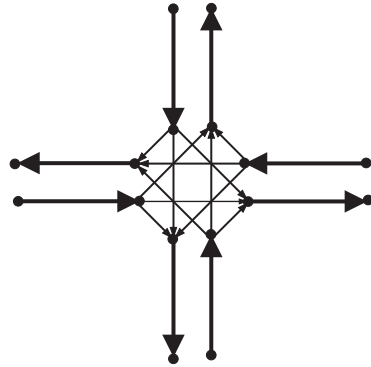


Abbildung 3.1: Aufgelöster Straßenknoten mit den Abbiegebeziehungen innerhalb des Knotens

vergrößert sich die Anzahl der Kanten und folglich auch die Rechenzeit für die Routensuche und Umlegung erheblich.

Kapazitätsbeschränkung freier Strecken Im MIV existiert ein Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke einer freien Strecke und deren Reisezeit. Es wurden eine Reihe von Kapazitätsbeschränkungsfunktionen entwickelt, die die verkehrsstärkenabhängige Reisezeit TM als Abhängige der Verkehrsstärke M in der Form $TM = f(M)$ darstellen. Zusammenstellungen verschiedener Kapazitätsbeschränkungsfunktionen finden sich z.B. in PATRIKSSON [37], ORTÚZAR et al. [36] und VISUM [3]. Die häufig verwendete BPR-Funktion² ist

$$TM(M) = T0 \cdot (1 + a \cdot (M/C)^b)$$

²BPR ist die Abkürzung für *Bureau of public road*, jene Einrichtung, die diese Funktion erstmal verwendete.

mit

a, b	Parameter,
C	Kapazität,
M	Verkehrsstärke,
T_0	Reisezeit bei freiem Verkehrsfluss,
TM	verkehrsstärkenabhängige Reisezeit.

Die Abbildung 3.2 zeigt den Einfluss der Parameter auf die Reisezeit. Der Wert

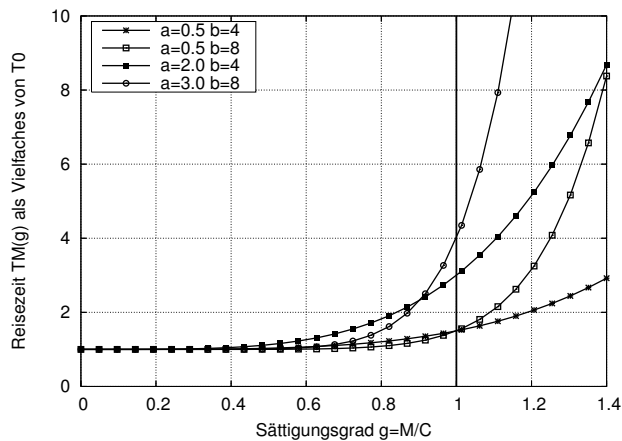


Abbildung 3.2: Kapazitätsbeschränkungsfunktion (Typ: BPR)

des Parameters a lässt sich bestimmen, wenn aus verkehrstechnischen Untersuchungen der Wert $TM(C)$ bekannt ist. Durch Einsetzen ergibt sich

$$TM(C) = T_0 \cdot (1 + a) \quad \rightarrow \quad a = \frac{TM(C)}{T_0} - 1 \quad .$$

Kapazitätsbeschränkungsfunktionen für die Knotenpunkte In städtischen Bereichen sind die Verlustzeiten an Knotenpunkten eine wesentliche Größe für die Routenwahl. Im Fachgebiet der Straßenverkehrstechnik gibt es für jede Steuerungsart (Vorfahrtsknoten, Lichtsignalanlage etc.) Berechnungsverfahren, mit deren Hilfe mittlere Wartezeiten an den Zufahrten bestimmt

werden können. Bei einer Übertragung der verkehrstechnischen Funktionen in die Netzmodellierung sind eine Reihe von Schwierigkeiten zu überwinden:

- Selten liegen die Steuerungsdaten *aller* im Netzmodell vorhandenen Knotenpunkte in rechentechnisch verarbeitbarer Form vor. Selbst wenn diese Daten für die Analyse bekannt wären, würden immer noch die Daten für die Prognosezustände des Netzes fehlen.
- Es gibt eine Reihe von verschiedenen Steuerungsarten. Die Werte, die die dazugehörigen Berechnungsverfahren liefern, müssen auch untereinander konsistent sein.
- Einige Steuerungsarten (z.B. Festzeitprogramme) senden tageszeitabhängige Grünanteile. Im Gegensatz dazu wird in einer MIV-Umlegung bisher häufig von einer mittleren Tagesstunde ausgegangen. Die Tendenz, auch im MIV die Tageszeitscheiben zu berücksichtigen, wird in der Zukunft dieses Problem mildern.
- Die Berechnungsverfahren müssen Werte im Überlastungsbereich (Sättigungsgrad $g > 1 = M/C > 1$) zulassen. Große Überlastungen mögen praktisch nicht vorkommen. In der Routenwahlmodellierung werden sie aber genutzt, um die Verdrängungseffekte der Routenströme abzubilden.
- Der Einfluss von ÖV-Bevorrechtigungen muss berücksichtigt werden.

Eine Zusammenstellung von Funktionen zur Berechnungen von Wartezeit für einige Knotenarten ist in FELDGES [21] zu finden. Ein übergreifender Algorithmus (übergreifend für alle Knotenpunktsarten) für die Abbildung der Verlustzeiten für die verkehrsplanerische Modellierung der Routenwahl fehlt bisher.

Tageszeitabhängigkeit Da die Verkehrsnachfrage im Verlaufe eines Tages schwankt, ergeben sich zu verschiedenen Tageszeiten unterschiedliche Verkehrsstärken und damit unterschiedliche Reisezeiten. Dadurch können sich für verschiedene Zeitscheiben auch unterschiedliche beste Routen oder eine unterschiedliche Anzahl von attraktiven Routen ergeben. Die Berechnung von verkehrstärkenabhängigen Routenreisezeiten ist möglich, wenn in jeder Zeitscheibe nur der zeitscheibenbezogene Anteil des Verkehrsaufkommens auf das Netz umgelegt wird.

Anpassungen für NMIV-Netzmodelle Netzmodelle für den nichtmotorisierten Individualverkehr sind im Grunde mit denen des MIV identisch. Auf die Verwendung einer Kapazitätsbeschränkungsfunktion kann i.d.R. verzichtet

werden, ebenso auf die Berücksichtigung von zeitscheibenfeinen Reisezeiten.

3.2 Modellierung fahrplangebundener Netze

Die wesentliche Charakteristik eines ÖV-Systems ist die Linien- und Fahrplangebundenheit. Eine *Linie* $L = \{L_1, L_2, \dots, L_n\}$ beschreibt eine konstante Folge von Haltestellen, die von einem öffentlichen Verkehrsmittel bedient wird. Einzelne, in dem Linienfahrplan verzeichnete Fahrten werden als *Linienfahrten* $F^{(L)} = \{F_1^{(L)}, F_2^{(L)}, \dots, F_n^{(L)}\}$ der Linie L bezeichnet. Die Fahrzeit auf den Kanten zwischen den Haltestellen bzw. die Haltestellenaufenthaltszeit ist durch den Fahrplan der Linienfahrt festgelegt.

Gelegentlich gehören zu einer Haltestelle mehrere *Haltepunkte*. Zwischen Haltestellen und Haltepunkten soll im Weiteren nicht weiter differenziert werden. Im folgenden Text wird der Begriff Haltestelle auch für die Haltepunkte benutzt.

Ein weiteres typisches Merkmal der Beförderung in liniengebundenen ÖV-Systemen ist das *Umsteigen*. Umsteigen bedeutet, dass der Fahrgast die Linie wechselt. Der Vorgang kann mit einem Fußweg verbunden sein, wenn die ankommende und die abfahrende Linie an verschiedenen Haltestellen halten. Die Fußwege zwischen Haltestellen sind grundsätzlich mit einem Zeitaufwand verbunden.

Routen und Fahrplangraph Die Verbindungen in einem ÖV-System werden im folgenden Text analog zum MIV ebenfalls als Routen bezeichnet. Eine Route in einem ÖV-Netz wird, wie für den MIV bereits ausgeführt, als Folge überfahrener Kanten beschrieben. Da auf einer (Trassen-)Kante mehrere Linien, und je Linie mehrere Linienfahrten verkehren können, wird eine Route durch diese Darstellungsform jedoch nicht eindeutig gekennzeichnet. Bei der Ermittlung von Routen bzw. der Routenkenngößen ist Folgendes zu berücksichtigen:

- Eine Route setzt sich aus Teilrouten zusammen. Unter dem Begriff Teilrouten werden hier sämtliche, in einem unmittelbaren Zusammenhang mit der Ortsveränderung stehenden Bewegungs- und Verweilvorgänge des Fahrgastes bezeichnet.
- Der Wechsel zwischen zwei Linienfahrten ist mit einem Umsteigevorgang verbunden. Das Umsteigen kann mit Fußwegen zwischen den Haltestellen verbunden sein. Die Fußwegezeiten sind zu berücksichtigen.

- Ein Fahrgast, der zu Fuß oder mit einer anderen Linienfahrt zum Zeitpunkt t eine Haltestelle erreicht, kann frühestens zum Zeitpunkt $t + 1$ in eine andere Linienfahrt einsteigen. Verkehrt zum Zeitpunkt $t + 1$ keine Linienfahrt, sondern erst zum Zeitpunkt $t + x$, dann entsteht eine Wartezeit der Länge x . Diese Wartezeiten sind zu berücksichtigen.
- Zu verschiedenen Abfahrtszeiten an einer Starthaltestelle können sich unterschiedliche kürzeste Routen ergeben.
- Die Wege zur und von der Haltestelle können nur zu Fuß und unter Aufwendung von Zeit erreicht werden (Zu- und Abgangszeit).
- Zwischen dem Erreichen der ersten Einstiegshaltestelle und der Abfahrt kann eine Wartezeit auftreten (Startwartezeit). Der Zeitwert ergibt sich aus der Differenz zwischen Linienabfahrts- und Fußwegankunftszeit.

Um alle angedeuteten Besonderheiten zu berücksichtigen, muss ein gegenüber dem MIV-Graphen erweiterter Graph erzeugt werden. In diesem Graph – im Folgenden *Fahrplangraph* genannt – repräsentieren die Kanten nicht die Trassen, sondern die Linienfahrten. Die Anwendung eines Routensuchalgorithmus auf diesen Fahrplangraphen ist möglich, ohne dass hierfür der Algorithmus verändert werden muss.

Ein Fahrplangraph ist ein Gebilde im dreidimensionalen Raum: die räumliche Ausdehnung des untersuchten Gebietes wird durch die xy-Ebene beschrieben und die z-Achse entspricht der Tageszeit (siehe Abbildung 3.3). Folglich wird jeder Knoten durch zwei räumliche plus eine zeitliche Koordinate beschrieben. Ebenso ist auch jede Kante nicht nur räumlich, sondern auch zeitlich definiert.

In JUNGnickel [26] sind anhand eines Beispiels Regeln beschrieben, nach denen ein Fahrplangraph erstellt werden kann. In BOBINGER [13] ist ein im Prinzip identisches Vorgehen angedeutet. Die dort vorgestellten Regeln bilden die Grundlage für die folgenden Ausführungen zum Fahrplangraphen. Sie wurden um Regeln zu einigen Teilproblemen, wie z.B. zur Behandlung von Umsteigefuß-, Zugangs- und Abgangswegen, ergänzt. Ein Fahrplangraph kann durch die Abarbeitung folgender *Entwurfsregeln* aufgebaut werden:

1. Für jede Linienfahrt F an einer Haltestelle h werden zwei neue Knoten eingeführt: $p_{h,F}^{an}$ und $p_{h,F}^{ab}$. Diese neuen Punkte repräsentieren den Ankunftszeitpunkt und den Abfahrtszeitpunkt der Linienfahrt der betrachteten Haltestelle.
2. Für jede Linienfahrt F zwischen zwei Haltestellen h und h' wird eine Kante $k_{hh',F}$ eingeführt. Start- und Endpunkt sind die Knoten $p_{h,F}^{ab}$ bzw.

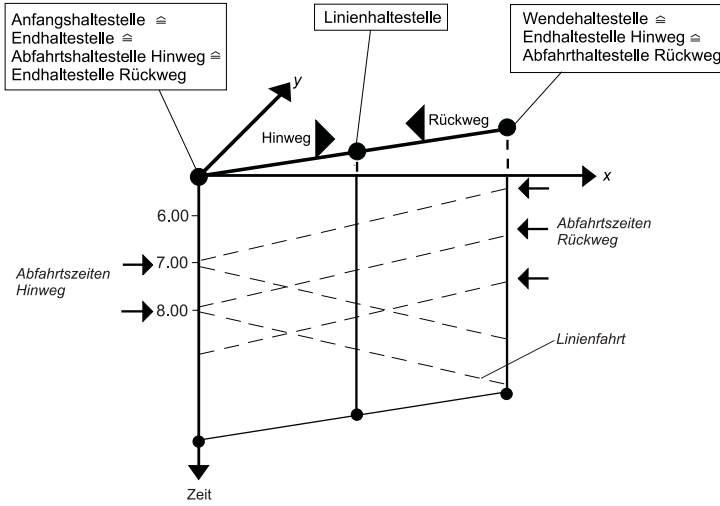


Abbildung 3.3: Abbildung von Linienfahrten in einem dreidimensionalen Graphen, Quelle: FRIEDRICH [22].

$p_{h',F}^{an}$. Diese Kante repräsentiert die Linienfahrt F zwischen einer Haltestelle h mit der durch den Fahrplan definierten Abfahrtszeit t_F^{ab} und der nächsten Haltestelle h' zur Ankunftszeit t_F^{an} .

3. Für jeden Umsteigefußweg zwischen zwei Haltestellen h und h' wird eine Kante $k_{hh',u}$ eingeführt. Die Kante beginnt im Punkt $p_{h,F}^{an}$ (Ankunft) und endet im Punkt $p_{h',u}^{an}$. Dieser letztgenannte Knoten ist neu einzufügen und repräsentiert die Fußwegankunft.
4. Für jede Quellenbindung q eines Verkehrsbezirkes i wird
 - an dem Quellbezirk ein Knoten $p_{i,q}^{ab}$ (repräsentiert den Startzeitpunkt des Zugangsfußweges),
 - an der Zugangshaltestelle h ein Knoten $p_{h,q}^{an}$ (repräsentiert den Ankunftszeitpunkt des Fußweges) und
 - zwischen jedem Knotenpaar eine Kante $k_{ih,q}$

hinzugefügt, und zwar für jede Minute des betrachteten Umlegungszeitraumes. Die drei Elemente repräsentieren gemeinsam die Zugänge zur Haltestelle im betrachteten Umlegungszeitraum.

5. Für jede Ziellanbindung a am Zielbezirk j wird ein Knoten $p_{j,z}^{an}$ erzeugt (er repräsentiert die Ankunft im Zielbezirk). Zwischen der Ankunft $p_{h,F}^{an}$ der Linienfahrt F an der Ankunftshaltestelle h und dem neu eingeführten Knoten wird die Kante $k_{hj,z}$ eingefügt. Diese Kante modelliert den Abgangsweg.
6. In jeder Haltestelle h werden zwischen den unter Punkt 1, 3, 4 und 5 eingeführten Knoten p^{an} und p^{ab} neue Kanten hinzugefügt. Diese Kanten repräsentieren
 - (falls die verbundenen Knoten dieselbe Linienfahrt betreffen) den Verweilvorgang einer Linienfahrt an einer Haltestelle,
 - (falls die verbundenen Knoten verschiedene Linien betreffen) die Wartezeit beim Umsteigen zwischen den Linienfahrten verschiedener Linien innerhalb einer Haltestelle oder
 - (falls der erste Knoten das Ende eines [Umsteige- oder Zugangs-] fußweges und der zweite Knoten eine Linienabfahrt darstellt) die Startwarte- bzw. Umsteigewartezeit

Die Abarbeitung der sechs Punkte bewirkt, dass ähnlich wie beim MIV ein Haltestellenknoten aufgelöst wird. Die Zu- und Abfahrten entsprechen den Ankünften und Abfahrten. Die Wartezeit- und Umsteigekanten innerhalb einer Haltestelle entsprechen den Abbiegebeziehungen des MIV.

Die Mehrwegroutensuche, insbesondere für fahrplanfeine ÖV-Netze, ist aufwändig und kann eine große Zahl von Routen generieren. In FRIEDRICH [22] wird die Arbeit mit *Teilverbindungen* vorgeschlagen. Zu einer Teilverbindung werden alle Kanten einer Linienfahrt zusammengefasst, an deren Haltestellen kein Umsteigen möglich ist. Ein solches Vorgehen vermindert die Kantenanzahl des Graphen und reduziert dadurch die Rechenzeit. Routen werden aus dem Routenset entfernt, wenn sie bestimmte nutzerdefinierte Kriterien nicht erfüllen, wie z.B. die maximale Anzahl von Umsteigevorgängen, maximales Vielfaches der Reisezeit des Bestweges etc. Auf diese Weise werden unsinnigen Routen im Routenset weitgehend verhindert.

Ansätze zur Beschreibung von Abhängigkeit (siehe Abschnitt 2.4.3) können auch auf Fahrplangraphen angewendet werden. In diesem Sinne sind ÖV-Routen voneinander unabhängig, wenn keine Linienfahrt gemeinsam genutzt wird.

Tageszeitabhängigkeit Welche unter den vielen alternativen Routen die kürzeste Route ist, hängt in einem ÖV-Netz nicht allein von der Komplexen

Reisezeit, sondern auch von der Wahl des Abfahrtszeitpunktes ab. Zu unterschiedlichen Abfahrtszeiten ergeben sich verschiedene Routen mit verschiedenen Gesamtreisezeiten und verschiedenen Routenwegen.

3.3 Modellierung intermodaler Routen

In einem Verkehrsnetz gibt es unterschiedliche elementare Verkehrsarten (synonym: Verkehrssysteme, Verkehrsmittel), wie z.B. Fuss, Rad, PKW, ÖV³. Eine Ortsveränderung kann auch mittels der Kombination elementarer Verkehrsarten durchgeführt werden. Im Folgenden wird der Begriff Verkehrsart allgemeiner verwendet und bezeichnet sowohl die elementaren als auch die Verkehrsartkombinationen. Eine Route wird als *intermodal* bezeichnet, wenn während der Ortsveränderung die Verkehrsart gewechselt wird. Typische Kombinationen zwischen einem Individual- und einem Öffentlichen Verkehrssystem ist Park and Ride (P+R) – hierbei handelt es sich um die kombinierte Nutzung des MIV und des ÖV.

Im Hinblick auf die Nachfragemodellierung kann bei der Bildung von intermodalen Routen eine große Zahl von Randbedingungen entstehen.

- *Systemwechselpunkte*: Ein Systemwechsel zwischen Individualverkehrssystemen und Öffentlichen Verkehrssystemen ist nur an Haltestellen möglich. Ein Wechsel setzt im Allgemeinen auch voraus, dass Anlagen zur Fahrzeugabstellung vorhanden sind.
- *PKW-Mitfahrer*: können an anderen Punkten das Fahrzeug verlassen als die PKW-Fahrer. Ihr Systemwechselpunkt ist von der Möglichkeit zur Fahrzeugabstellung unabhängig.
- *Fahrzeugmitnahme*: Es gibt Fälle, in denen das Fahrzeug mitsamt dem Fahrer und der Beifahrer in einem anderen System befördert werden. (Pkw oder Fahrräder auf Fähren, Fahrräder in Bus und Bahn). Die Beförderung von Fahrzeugen ist häufig kostenpflichtig.
- *Fahrzeugstandorte*: Die Fahrzeuge sind entweder an eine Person oder eine Firma gebunden. So wie allgemein angenommen wird, dass jede Person im Verlauf des Tages zu ihrer Wohnung zurückkehrt, so kann auch angenommen werden, dass jedes Fahrzeug auch zu seinem Standort zurückkehrt.

³Beim ÖV könnte noch zwischen den verschiedenen Fahrzeugarten Bus, Straßenbahn, Bahn, etc. unterschieden werden. Eine weitere Detaillierung ist an dieser Stelle nicht nützlich, deshalb wird allgemein nur vom ÖV gesprochen.

- *Zwangspunkte für Routenwahl*: Durch das Abstellen eines Fahrzeuges entsteht ein Zwangspunkt, an den die Person unabhängig von den zwischenzeitlich ausgeführten Ortsveränderungen und unabhängig von dem aktuell zur Verfügung stehenden Verkehrsangebot zurückkehrt.
- Bei einem Wechsel in ein ÖV-System sind dessen Fahrplan und die auftretenden *Warte- und Umsteigezeiten* sowie eventuell anfallende Parkkosten zu berücksichtigen.
- Die *Tageszeit* determiniert die Zahl und die Eigenschaften von alternativen Routen.

Im Kapitel 5 wird ein Verfahren für die Ermittlung zeitscheibenfeiner P+R-Routen vorgeschlagen und ein Nachfragemodell entwickelt, welches auch die Nachfrage nach P+R-Routen bestimmen kann.

3.4 Fazit

Der Aufbau von Netzmodellen und die Algorithmen für die Ermittlung von Routen für die verschiedenen Verkehrsarten sind gut dokumentiert. Die Generierung von Routensets und den zugehörigen Aufwandskenngrößen, die eine wichtige Eingangsgröße für ein simultanes Erzeugungs-, Verteilungs-, Aufteilungs- und Routenwahlmodell darstellen, ist möglich. Lediglich bei der Modellierung intermodaler Routen entstehen spezielle Randbedingungen, die derzeit nicht gelöst sind. In diesem speziellen Fall ermöglichen vereinfachende Annahmen trotzdem eine sachgerechte Modellierung.

Kapitel 4

Simulation der Routenwahl

4.1 Motivation und Vorgehensweise

Im vorangegangenen Kapitel wurde gezeigt, dass es für die Routenwahl verschiedene Ansätze gibt, die zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Nur wenige Arbeiten widmen sich der empirischen Erfassung des Routenwahlverhaltens der Verkehrsteilnehmer (RIBBECK [40], RAMMING [38]). Systematische Erhebungen über die Routenwahl, d.h. mit Berücksichtigung von unterschiedlichen Verkehrsarten, unterschiedlichen Reisedistanzen (Nah- und Fernverkehr) und in verschiedenen Netztopologien, sind ausgesprochen aufwändig und werden selten durchgeführt. Um für diese Arbeit eine Datengrundlage zur Entwicklung eines Routenwahlmodells zu schaffen, wurde der Weg der Monte-Carlo-Simulation (kurz: MC-Simulation) gewählt. Im Einzelnen interessieren folgende Fragestellungen:

- Wie gut bilden die bekannten Routenwahlmodelle die Netzbelastung ab?
- Welchen Einfluss hat die Distanz auf die Anzahl der Routen und deren Auswahlwahrscheinlichkeit? Haben der Fernverkehr und der Nahverkehr unterschiedliche Aufteilungsregeln?
- Wie groß sind die Umwegfaktoren in Abhängigkeit vom Routenaufwand?
- Welchen Einfluss hat die Netztopologie?
- Bilden kapazitätsbeschränkte Umlegungsverfahren die Abhängigkeit von Routen richtig ab?
- Wie viele Routen pro Quelle-Ziel-Relation werden in realen Netzen ge-

finden?

- Nach wie vielen Durchläufen ist die Schätzung stabil? Ist die Schrittzahl so gering, dass die MC-Methode für praktische Anwendungen geeignet ist?

Die Aufteilung wurde anhand von zwei unterschiedlichen Fällen untersucht:

1. *Reale Netzmodelle* haben eine gewisse räumliche Ausdehnung und sind entsprechend rechenintensiv. Es gibt Überlagerungseffekte zwischen verschiedenen Quelle-Ziel-Relationen. Mit Hilfe dieser Simulation können Kennzahlen, wie z.B. die Zahl der Routen, Anzahl der Simulationsschritte bis zum Gleichgewicht oder die Umwegfaktoren ermittelt werden. Diese Simulationen dienen der Kontrolle des Schätzparameters κ (siehe unten).
2. *Netzmaschen* mit nur *einer* Quelle-Ziel-Relation. Der Vorteil dieser Maschen liegt in deren Übersichtlichkeit und der Wechselwirkungsfreiheit mit anderen Quelle-Ziel-Relationen. Die Netzmaschen ermöglichen es, den Wert für den Schätzparameter κ abzuschätzen und Zusammenhänge hinsichtlich der Netzwerktopologie darzustellen. Die Maschen sind nicht rechenintensiv, aber auch wenig praxisnah.

Eine ähnliche Analyse des Verkehrsverhaltens und des Routensets wurde von RAMMING [38] etwa zeitgleich mit dieser Arbeit vorgenommen (siehe Fazit am Ende dieses Kapitels).

4.2 Simulation in Netzen

4.2.1 Simulationsprogramm

Für die Simulation realer Netze wurde mit der Programmiersprache Visual Basic ein eigenes Programm erstellt, welches Umlegungen in MIV-Verkehrsnetzen durchführt. Bestandteile des Programms sind verschiedene Prozeduren, die

- ein Verkehrsnetz (gespeichert als VISUM-Version) mit Hilfe der VISUM-COM-Schnittstelle aus VISUM übernehmen,
- die Verkehrsstrommatrizen aus Textdateien einlesen,
- eine Bestwegroutensuche nach DIJKSTRA durchführen,
- die Ströme der Matrix auf die gefundenen Routen umlegen,
- die gefundenen Routen aller Umlegungsschritte vergleichen und ggf. neue Routen speichern und

- die Ergebnisse der Umlegung, d.h. die Routenströme und Verkehrsstärken der Strecken, aufbereiten und ausgeben.

Das Simulationsprogramm (ca. 3700 Programmzeilen) enthält zwei Umlegungsalgorithmen (MC-Simulation und das Lernverfahren nach LOHSE), zwischen denen beim Programmstart gewählt werden kann. Das Bild B.1 im Anhang zeigt einen Screenshot der Eingabemaske (Hauptformular), gefolgt von Auszügen aus Simulationsprotokollen. Das Lernverfahren nach LOHSE ist identisch mit dem in VISUM umgesetzten gleichnamigen Verfahren. Die umfangreichen Auswertungen wurden mit dem Datenbankprogramm MS Access durchgeführt. Die Abbildung 4.1 verdeutlicht die wesentlichen Programmschritte. Der Aufwand einer Route oder Strecke ergibt sich allein aus der Reisezeit. Folgende Zusammenhänge wurden angewendet (die römischen Ziffern entsprechen den Programmschritten in der Abbildung 4.1):

(I): Routensuche auf Basis der Größe T^* . Die Größe T^* ist abhängig von dem gewählten Umlegungsverfahren. Siehe (IV).

(II): Verkehrsstärkenabhängige Streckenreisezeit (BPR-Funktion):

$$TM^{(n)} = T0 \cdot \left(1 + a \cdot \left(\frac{M^{(n)}}{C} \right)^b \right) . \quad (4.1)$$

Dabei sind

a, b	Parameter,
C	Kapazität
M	Verkehrsstärke,
(n)	Iterationsschrittzähler,
$T0$	Reisezeit bei freiem Verkehrsfluss,
TM	verkehrsstärkeabhängige Reisezeit der Strecke.

(III): Geglättete Streckenreisezeit (Schätzzeit):

$$TS^{(n)} = TS^{(n-1)} + \Delta^{(n)} \cdot (TS^{(n-1)} - TM^{(n)}) . \quad (4.2)$$

Die Schätzzeit TS (die sogenannten Lernformel des Lernverfahrens) basiert auf der exponentiellen Glättung 1. Ordnung, verwendet jedoch einen differenzierten

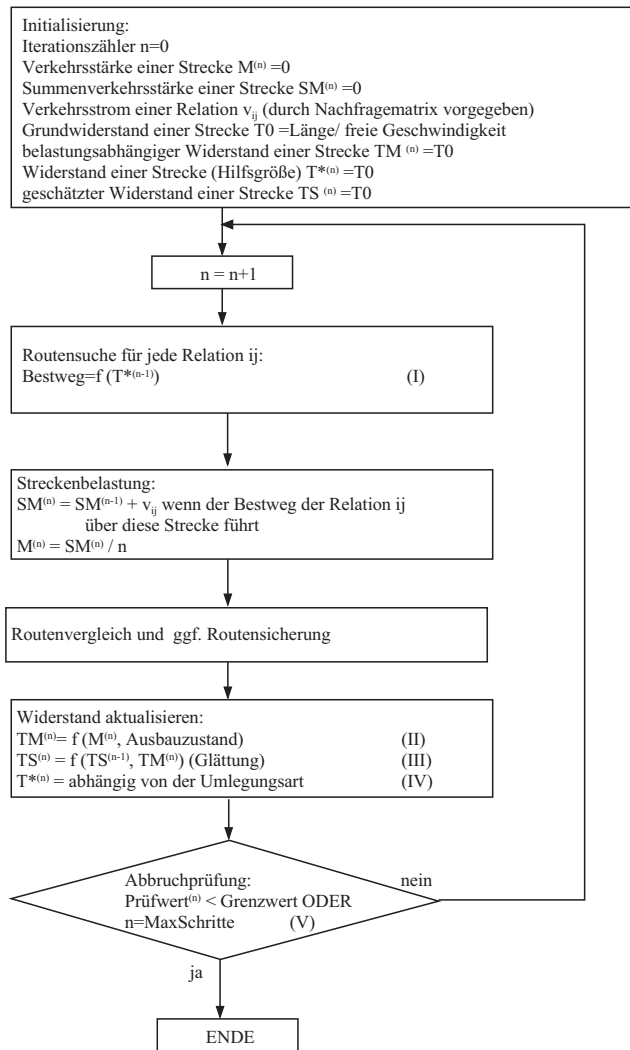


Abbildung 4.1: Ablaufdiagramm für die Simulation in Netzen. Die römischen Zahlen verweisen auf die zugehörigen Gleichungen im Text.

Ansatz zur Bestimmung von Δ (Optimierung der (Lern-)Schrittweite):

$$\begin{aligned}\Delta^{(n)} &= UDelta + \frac{ODelta - UDelta}{(1 + TT^{(n)})^{\phi(TT^{(n)})}} \quad \text{mit} \\ TT^{(n)} &= \left\lfloor \frac{TM^{(n)} - TS^{(n-1)}}{TS^{(n-1)}} \right\rfloor \quad \text{und} \\ \phi(TT^{(n)}) &= \frac{E}{1 + \exp(F - G \cdot TT^{(n)})} \quad ,\end{aligned}$$

dabei sind

TS	Schätzzeit der Strecke,
TM	verkehrsstärkeabhängige Reisezeit der Strecke nach Gl. 4.1,
TT	Hilfsgröße,
$UDelta, ODelta$	Parameter,
E, F, G	Parameter.

Der verwendete Verfahren ist dem MSA-Algorithmus äquivalent¹.

(IV): Festlegung der für die Routensuche maßgebenden Streckenreisezeiten T^* :

- für das Lernverfahren: $T^* = TS$,
- für die MC-Simulation: $T^* = TM + D(TM) \cdot ZZ$,

mit

$D(TM)$	Standardabweichung: $D(TM) = \kappa \cdot \sqrt{TM}$,
TM	verkehrsstärkeabhängige Streckenreisezeit nach Gl. 4.1,
TS	geglättete Streckenreisezeit nach Gl. 4.2,
ZZ	Zufallszahl einer abgeschnittenen Normalverteilung $N(TM, D(TM))$.

(V): Das Verfahren wird gestoppt, wenn die Bedingung $Prüfwert < Grenzwert$ für *alle* Strecken in *drei* aufeinanderfolgenden Schritten erfüllt oder die

¹Eine Umlegung mit verkehrsstärkenabhängigen Aufwänden ist mathematisch als Fixpunktproblem aufzufassen. Der MSA-Algorithmus (Method of Successive Average) ist ein Verfahren zur Bestimmung von Nullstellen für Funktionen mit bestimmten Eigenschaften. Diese Methode wird auch genutzt, um lokale Optima oder Fixpunkte zu ermitteln.

maximale Schrittzahl erreicht wird:

$$\text{Grenzwert: } \left[\frac{TS^{(n-1)} + P_1 \cdot (TS^{(n-1)})^{P_2}}{TS^{(n-1)}} \right] - 1 \quad , \quad (4.3)$$

$$\text{Prüfwert: } \left| \frac{TM^{(n)} - TS^{(n-1)}}{TS^{(n-1)}} \right| \quad . \quad (4.4)$$

Die Werte P_1 und P_2 sind Parameter.

Der Anteil des Verkehrsstromes einer Relation ijk für eine Route r bestimmt sich aus der Häufigkeit des Auffindens dieser Route r als Bestweg im Verhältnis zur Anzahl der Iterationsschritte (Bestweghäufigkeit). Durch die Überlagerung der Routenströme aller Relationen ergeben sich die Verkehrsstärken der Strecken. Mit der Simulation wurde gezielt ein Zustand gesucht, bei dem sich eine stabile Stromaufteilung zwischen den Routenalternativen einstellt. Deshalb wurde keine fixe Schrittzahl, sondern eine variable relative Abbruchbedingung vorgegeben, wie sie auch im Lernverfahren verwendet wird. Als Parameter für den Grenzwert von Strecken und die Glättung wurden $P_1=0,50$, $P_2=1/3$, $UDelta=0,15$, $ODelta=0,5$ verwendet.

Besonderheiten der Monte-Carlo-Methode In jedem Iterationsschritt werden neue zufallsabhängige Streckenreisezeiten generiert. Die Zeiten seien normalverteilt, der Mittelwert entspricht der verkehrsstärkenabhängigen Reisezeit dieser Strecke. Die Standardabweichung der Streckenreisezeit ergibt sich aus dem Produkt des Aufwands und eines relativen Schätzfehlers k (siehe Gl. 4.8). Der Schätzfehler ist vorzugeben und gilt für alle Strecken.

Für die numerische Umsetzung wurden standardnormalverteilte Zufallszahlen erzeugt (der Algorithmus zur Erzeugung von normalverteilten Zufallszahlen ist im Anhang B dargestellt) und auf eine Verteilung mit dem gewünschten Mittelwert und der gewünschten Varianz umgerechnet (siehe Anhang B).

Der zufallsabhängige Routenaufwand TM_r ergibt sich durch die Summation der einzelnen zufallsabhängigen Streckenreisezeiten

$$TM_r = \sum_{a' \in S_r} TM_{a'}$$

(S_r – Menge aller Strecken, die zur Route r gehören). Die Verteilung einer Summe von Zufallszahlen kann durch Faltung ermittelt werden. Für die Parameter der Routenreisezeitverteilung gilt demnach:

Mittelwert der Route:

$$E(TM_r) = \sum_{a'} E(TM_{a'}) \quad , \quad (4.5)$$

Varianz bzw. Standardabweichung einer Route:

$$D^2(TM_r) = \sum_{a'} D^2(TM_{a'}) \quad \text{bzw.} \quad D(TM_r) = \sqrt{\sum_{a'} D^2(TM_{a'})} \quad , \quad (4.6)$$

Variationskoeffizient:

$$V(TM_r) = \frac{D(TM_r)}{E(TM_r)} = \frac{\sqrt{\sum_{a'} D^2(TM_{a'})}}{\sum_{a'} E(TM_{a'})} \quad , \quad (4.7)$$

Standardabweichung einer Strecke:

$$D(TM_a) = E(TM_a) \cdot k \quad k - \text{relativer Fehler aller Strecken} \quad . \quad (4.8)$$

Aus Gleichung 4.6 leitet sich ab, dass die Standardabweichung und damit auch der Variationskoeffizient einer Route bei gleichen Routenreisezeiten umso größer sind, je weniger Strecken zur Route gehören. Die Route mit der größten Varianz wird am häufigsten als Bestweg ermittelt². Anschaulich könnte man dieses Phänomen dadurch erklären, dass mit zunehmender Varianz die Breite der Dichtefunktion zunimmt und somit die Ereignisse mit niedrigem Zahlenwert (das ist der günstige Fall für das Minimum) häufiger auftreten als bei Zufallszahlen mit geringerer Varianz. Bei der praktischen Anwendung zufallsabhängiger Aufwände für Strecken ergibt sich folglich das Problem, dass eine Route – bei identischem Mittelwert aller Routen zwischen Quelle und Ziel – allein deshalb häufiger ausgewählt wird, weil sie aus weniger Strecken besteht als die Konkurrenzrouten. FALKENHAUSEN [20] bezeichnet dies als Seiteneffekt.

Der Seiteneffekt entspricht wohl kaum dem menschlichen Verhalten und soll in der Simulation unterdrückt werden. Dafür definiert man statt des konstanten relativen Fehlers k für die Streckenreisezeit einen variablen relativen Fehler in der folgenden Form

$$k = \frac{\kappa}{\sqrt{E(TM)}} \quad (4.9)$$

²Diese Aussage gilt für mindestens drei zufallsabhängige Alternativen. Bei nur zwei Alternativen beträgt die Auswahlwahrscheinlichkeit je 50%.

mit κ als Schätzparameter (LOHSE [32]). Es ergibt sich ein Ausdruck für die Standardabweichung einer Route, der unabhängig von der Zahl der Summanden (Strecken) ist.

Der Parameter κ ist durch den Nutzer vorzugeben und er ist dimensionsbehaftet (innerhalb dieser Simulation wurde in der Einheit Sekunden gearbeitet). Je kleiner der Wert κ ist, desto stärker orientieren sich die Verkehrsteilnehmer auf die aufwandsgeringste Route. Das entspricht der Situation, dass die Fahrer die aufwandsgeringste Route auch als diese erkennen (Information) und es für sie bedeutsam ist, diese aufwandsgeringste Route auch zu nutzen (Präferenz). Die Größe des Schätzparameters κ ist a priori nicht bekannt und musste abgeschätzt werden. Um die tatsächliche Größe einzugrenzen, wurden Simulationen in Netzen und in Netzmaschen durchgeführt und ausgewertet (siehe dazu Abschnitt 4.3.1).

Bei der Ermittlung von Zufallszahlen $ZZ \in N(TM, D(TM))$ kann der Fall eintreten, dass die Zufallszahl negativ wird. Negative Streckenreisezeiten treten in der Realität nicht auf. Deshalb wurden alle Ziehungen mit negativem Ergebnis verworfen. Wie häufig gezogene Zufallszahlen abgelehnt werden, hängt sowohl vom Mittelwert der Verteilung als auch von der Standardabweichung (je größer der Standardabweichung, desto höher die Wahrscheinlichkeit für eine negative Zahl) ab. Um die Symmetrie der Verteilung und damit auch deren Mittelwert zu wahren, wurden dann auch diejenigen Zufallszahlen oberhalb der korrespondierenden positiven Grenze $T^* > 2 \cdot TM$ verworfen. Durch das Abschneiden der Verteilung links und rechts wurde die vorher festgelegte Varianz verändert. Durch Vorversuche (ebenfalls Simulationen) wurde geprüft, ob diese Festlegungen die Auswahlwahrscheinlichkeit der Routen spürbar verändern. Die Simulationen zeigten, dass der Einfluss auf die Routenauswahlwahrscheinlichkeit nur minimal war und das Ergebnis nicht wesentlich vom Ideal $1/N^{(r)}$ (mit $N^{(r)}$ – Anzahl der Routen) für gleichlange Routen abweicht. Dieses Verfahren wurde damit in der Simulation verwendet.

Anpassungen des Netzmodells Einige der Bezirke waren mehrfach angebunden. Mit jeder zusätzlichen Anbindung erhöht sich aber die Zahl der Startstrecken des Routensuchalgorithmus und damit der Rechenzeitbedarf. Um dem entgegenzuwirken, wurden alle Mehrfachanbindungen zu Einfachanbindungen umgewandelt. Dazu wurde ein zusätzlicher Knoten (Hilfsknoten) eingefügt. Zusätzliche Strecken verbinden die ursprünglichen Anbindeknoten und den Hilfsknoten. Zwischen dem Bezirksschwerpunkt und dem Hilfsknoten wurde eine neue Anbindung eingefügt. Die ursprünglichen Anbindungen wurden gelöscht. Die Abbildung 4.2 veranschaulicht die Vorgehensweise. Durch dieses Vorgehen

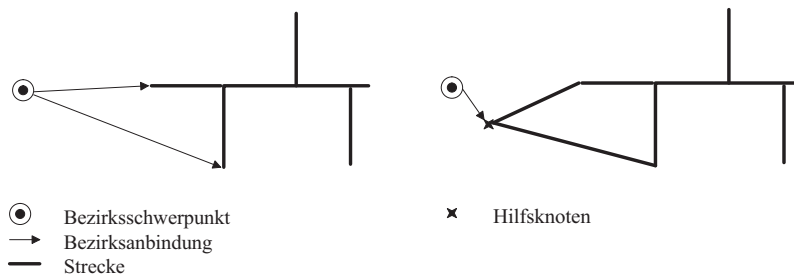


Abbildung 4.2: Doppelanbindung und deren Auflösung

wird die Zahl der gefundenen Routen nicht eingeschränkt, da die Zahl der Zugangsvarianten ins Netz unverändert bleibt.

4.2.2 Netzmodelle

Für die Untersuchung standen das Modell der Stadt Dresden einschließlich des Umlandes und des Landkreises Riesa-Großenhain zur Verfügung. Im Netzmodell waren die Elemente freie Strecken, Abbiegestrecken, Anbindungen und deren verkehrstechnische Parameter wie Länge, freie Geschwindigkeit und die Reisezeit T_0 enthalten sowie die zugehörigen, mit dem Nachfragemodell EVA (Programmsystem VISEVA [2]) ermittelten Verkehrsstrommatrizen.

Netzmodell Großenhain Für den Landkreis Riesa-Großenhain wurden im Rahmen des Projektes AMABILE [53] das Netzmodell und die Personenverkehrsmatrix erarbeitet. Um den Einfluss der übrigen Verkehrsklassen, also Güterfern-, Güternah- und Wirtschaftsverkehr sowie die Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehre des Personenverkehrs zu berücksichtigen, erfolgte die Multiplikation der Matrix mit dem Faktor 1,2. Die Tabelle 4.1 zeigt ausgewählte Netz- und Matrixkenngrößen. Die Umlegung wurde für die mittlere Spitzenstunde vorgenommen. Dazu wurden 10% der DTV-Matrix geladen und auf ein mit Streckenkapazitäten der Einheit [Kfz/h] versehenes Netzmodell umgelegt.

Damit in der Auswertung ein systematischer Vergleich zwischen den Aufwandsklassen möglich ist, erfolgte eine Klassifizierung der Routen. Das Kriterium für die Zuordnung einer Route zu einer Klasse ist die Grundreisezeit der aufwandsgeringsten Route der Relation, die Klassenbreite ist eine Minute. Die

Abbildungen 4.3, 4.4 und 4.5 zeigen die mittlere Routenzahl je Relation³, die Standardabweichung pro Klasse und den Variationskoeffizienten pro Klasse. Im Anhang B stellen die Abbildungen die verkehrsstärkenabhängige Reisezeit und den zeit- sowie den entfernungsbezogenen Umweg dar. Zusätzlich sind im Anhang B für ausgewählte Relationen ij die ermittelten Routen und deren relative Routenhäufigkeit abgebildet (Abb. B.4 bis B.6).

Netzmodell Dresden Für das Netzmodell Dresden und Umland lagen neben der Personennahverkehrsmatrix auch die Wirtschafts- und Güterverkehrsmatrix sowie die Matrix des Personendurchgangsverkehrs vor. Das Netzmodell war erheblich größer als das Modell Großenhain und beanspruchte dementsprechend mehr Rechenzeit. Die Ströme wurden für die mittlere Spitzenstunde umgelegt. Dazu wurden nur 10% der DTV-Matrix eingelesen. Die Berechnung erfolgte mit dem Lernverfahren und mit der MC-Simulation (Schätzparameter $\kappa = 3$). Das Netzmodell und die Matrizen wurden im Rahmen des Projektes INTERMOBIL [52] erarbeitet. Die Auswertungen erfolgte nach der für das Modell Großenhain beschriebenen Vorgehensweise. Die Abbildungen 4.6 bis 4.8 zeigen die mittlere Routenanzahl pro Relation, die Standardabweichung und den Variationskoeffizienten für die Aufwandsklassen. Im Anhang B sind die Umwegfaktoren dargestellt (Abb. B.7 und B.8). In den Abbildungen B.9 bis B.14 sind die Routenverläufe und die relativen Routenhäufigkeiten für drei ausgewählte Quelle-Ziel-Beziehungen abgebildet.

4.2.3 Ergebnisse

Die Tabelle 4.1 zeigt ausgewählte Kennwerte für die unterschiedlichen Umlegungsverfahren der beiden Netzmodelle.

Bei der Monte-Carlo-Simulation sind deutlich weniger als 100 Iterationsschritte bis zum Erreichen des Gleichgewichts notwendig. Erfahrungsgemäß benötigt das Lernverfahren in stark ausgelasteten Netzen etwa 20 bis 50 Schritte. Damit sind die Unterschiede zwischen MC-Simulation und Lernverfahren hinsichtlich der Schrittzahl eher gering. Die Zahl der Routen nimmt natürlich mit größer werdendem Schätzparameter κ zu.

Der vorhandene Zuwachs der Routenanzahl (Abbildung 4.3 bzw. 4.6) in den letzten Iterationsschritten der MC-Simulationen deutet darauf hin, dass

³Mittlere Routenzahl je Relation: Anzahl aller gefundenen Routen dividiert durch die Zahl der Relationen (siehe 2. Zeile in Tab. 4.1). Umgekehrt lässt sich die absolute Routenzahl ermitteln, wenn man den Wert des Diagramms mit der Relationszahl multipliziert.

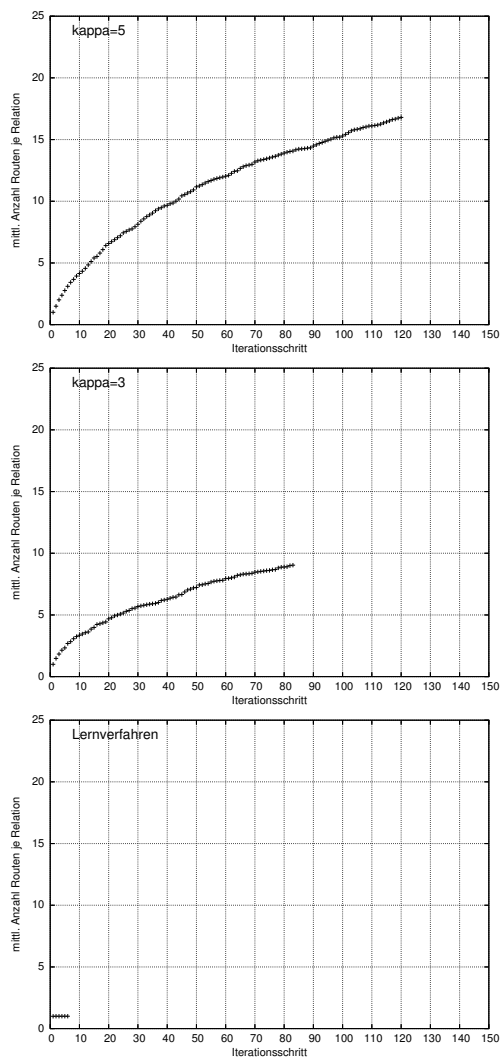


Abbildung 4.3: Netzmodell Großenhain: Mittlere Routenanzahl

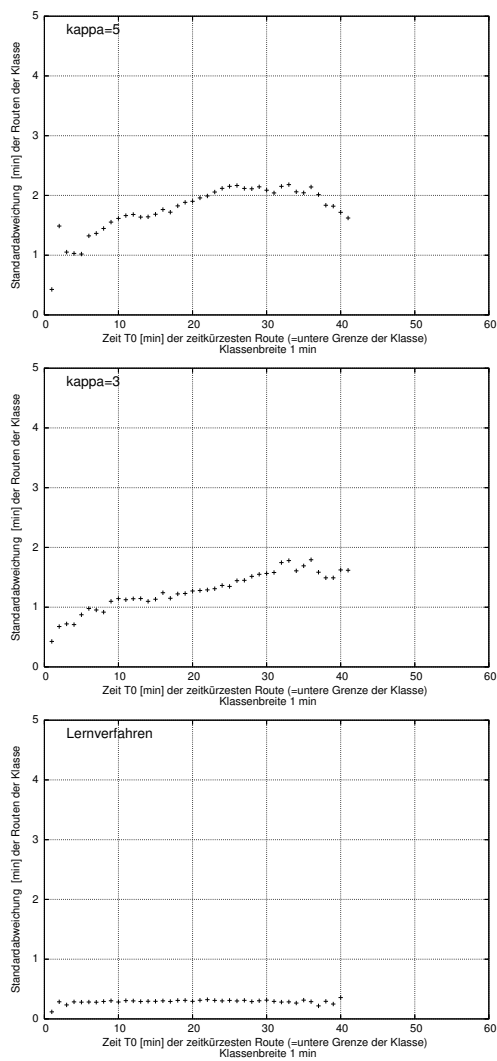


Abbildung 4.4: Netzmodell Großenhain: Standardabweichung der Routen

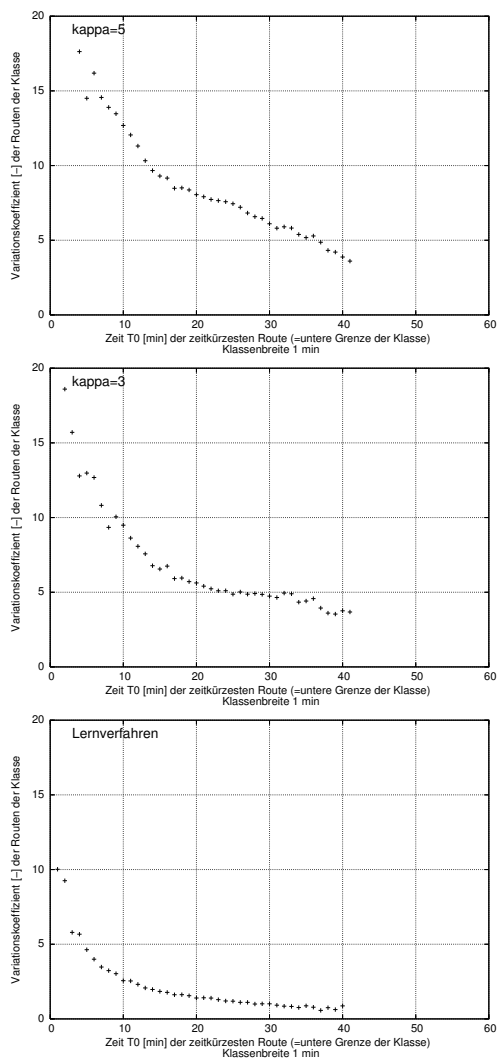


Abbildung 4.5: Netzmodell Großenhain: Variationskoeffizient der Routen

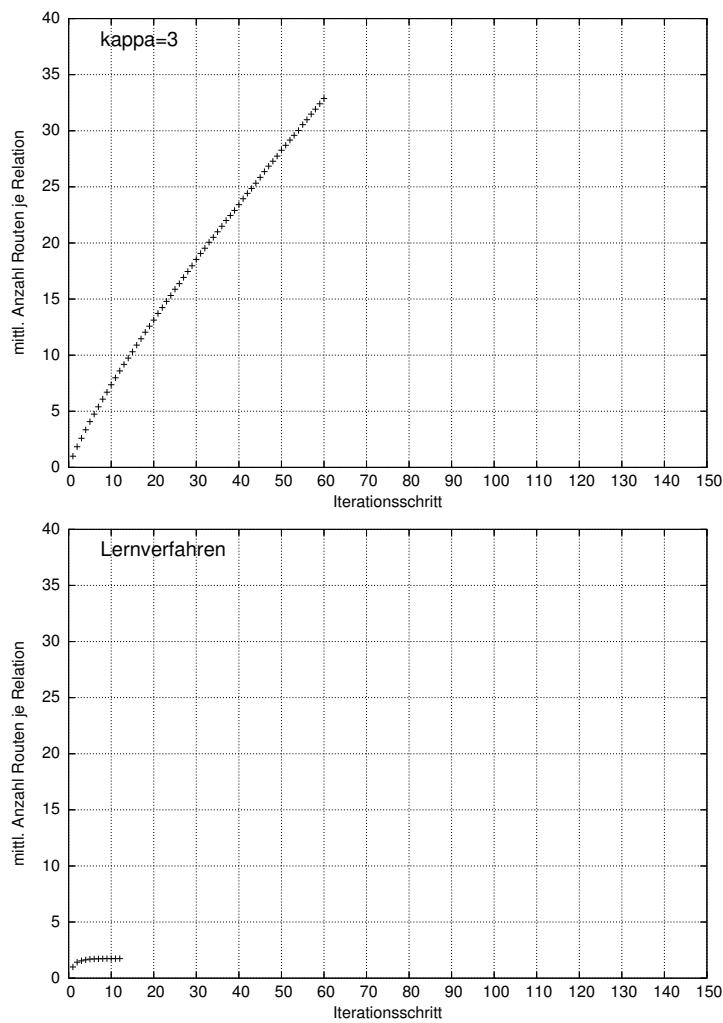


Abbildung 4.6: Netzmodell Dresden: Mittlere Routenanzahl

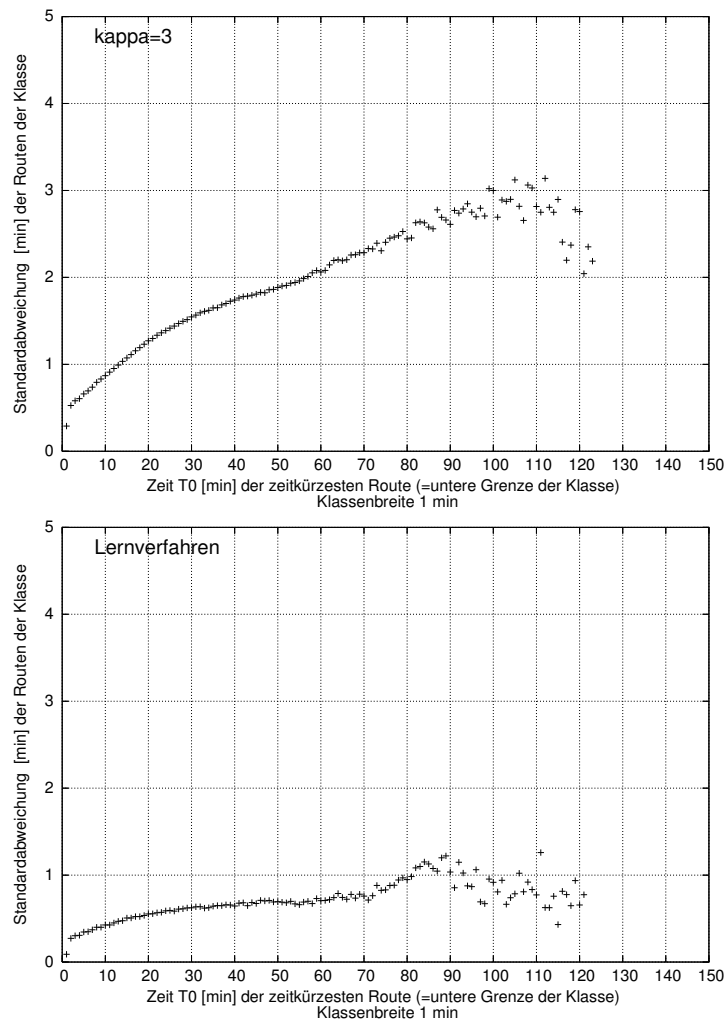


Abbildung 4.7: Netzmodell Dresden: Standardabweichung der Routen

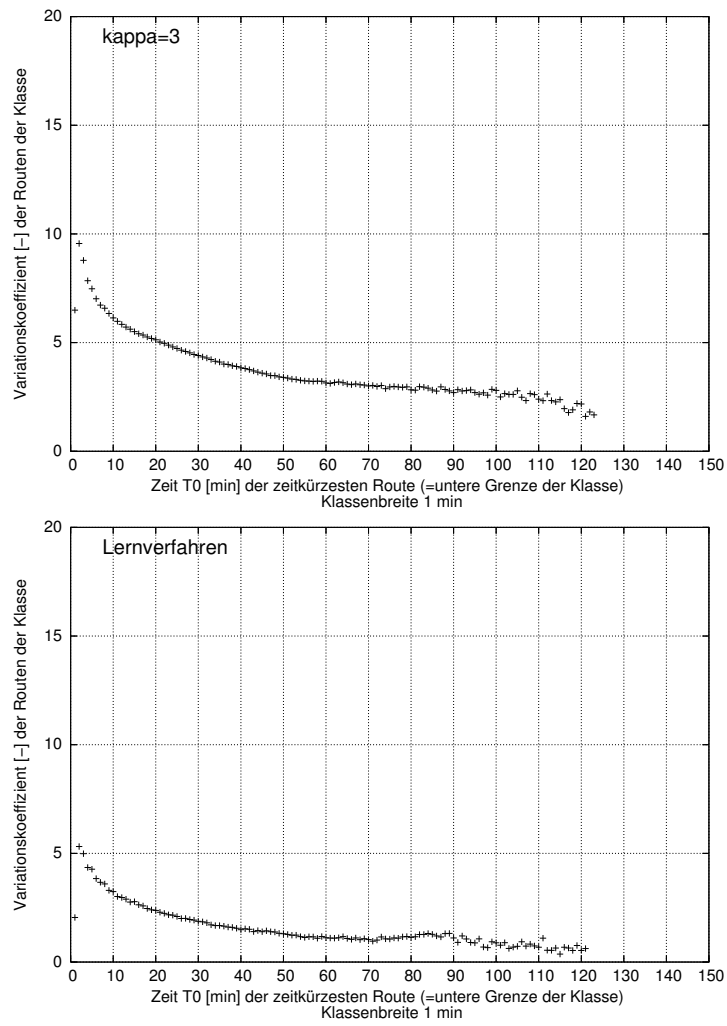


Abbildung 4.8: Netzmodell Dresden: Variationskoeffizient der Routen

Netz und Matrix	Netzmodell Großenhain		Netzmodell Dresden	
	MCS ¹	LV ²	MCS ¹	LV ²
Anzahl angebundener Bezirke		98		692
Anzahl Relationen		9506		478172
...davon mit Nachfrage		5343		202162
Ortsveränderungen lt. Strommatrix [PKW-E/24h]		46740,0		1868475
Netzlänge [km]		759,3		10031,7
Länge der längsten Relation [km]		34,7		121,7
Umlegung				
Anzahl Routen auf allen Relationen	85901	9536	15719698	8353339
...davon auf nachgefragten Relationen	50109	5363	5809839	370876
größte Anzahl von Routen für eine Relation	41	2	60 ³	10
Anzahl Iterationsschritte	83	6	60	12
...davon für 75% aller Routen	46	2	43	2
...davon für 90% aller Routen	64	2	53	4
mittl. Anzahl der Routen pro nachgefragte Relation	9,4	1,01	28,8	1,68
mittl. Häufigkeit ⁴ einer Route aller Relationen	11,6	99,6	3,7	57,2
mittl. zeitbezogener Umwegfaktor der nachgefr. Routen	1,07	1,00	1,07	1,00
mittl. entfernungsbez. Umwegfaktor der nachgefr. Routen	1,09	1,00	1,09	1,02

¹ Monte-Carlo-Simulation mit $\kappa = 3$
² Lernverfahren nach LOHSE
³ Entspricht der Schrittzahl, d.h. in jedem Schritt wurde ein neuer Weg gefunden.
⁴ Auswahlhäufigkeit für eine Route dividiert durch die Anzahl der Simulationsschritte in Prozent. Beispiel: Wenn eine Route einmal in 83 Umlegungsschritten gefunden wurde, dann ist $x=1/83=1,02\%$

Tabelle 4.1: Ergebnisse der Simulation in realen Netzmodellen

das Finden weiterer Routen sehr wahrscheinlich ist. Eine Veränderung des Abbruchkriteriums (zur Konstanz der geschätzten Streckenreisezeiten zusätzlich die Konstanz der Routenanzahl) könnte die Zahl der gefundenen Routen weiter erhöhen.

Die größte Anzahl gefundener Routen für eine Relation beträgt 41 bzw. 60 Routen. Dieser Wert erscheint sehr hoch, jedoch ist zu beachten, dass für einige Bezirke mehrere Zugänge ins Netz existieren und sich somit die Zahl der Routen der Relation ij vervielfacht.

Es ist unwahrscheinlich, dass sich die Verkehrsteilnehmer einer so großen Zahl von Alternativen tatsächlich bewusst sind. Vielmehr ist es so, dass die Monte-Carlo-Simulation – im Gegensatz zu den Verkehrsteilnehmern – zwischen den Routen im Nebennetz und den Routen im Hauptnetz nicht unterscheidet. In diesem Sinne kommt der verkehrstechnischen Attributierung (d.h. Attributierung gemäß der Netzhierarchie und besonders der Abbiegewiderstände) eine besondere Bedeutung zu. Wenn ein Fahren im Nebennetz drastisch mit Aufwandszuschlägen „bestraft“ werden würde, dann würde sich auch die Routenzahl beschränken.

Beim Betrachten der Diagramme sticht auch hervor, dass das Lernverfahren in diesen schwach belasteten Netzen deutlich weniger Routen findet als die MC-Simulation. In diesem Fall lässt die vorhandene geringe Nachfrage die Reisezeit nur wenig ansteigen, so dass das Bestwegroutensuchverfahren nicht auf andere Routen überspringt. Dementsprechend variiert die Verkehrsstärke der Routen nicht und es stellt sich sehr schnell ein Gleichgewicht ein.

Der Variationskoeffizient sinkt mit zunehmenden Aufwand ab. Die Größe der akzeptierten Umwegfaktoren hängt von der absoluten Größe des Aufwands ab. Für kurze Routen werden größere Umwege akzeptiert. Das Ergebnis stimmt mit der praktischen Erfahrung überein, die besagt, dass die Verkehrsteilnehmer den Aufwand bzw. die Aufwandsdifferenz um so genauer bewerten, je aufwändiger die Route ist.

4.3 Simulation in Netzmaschen

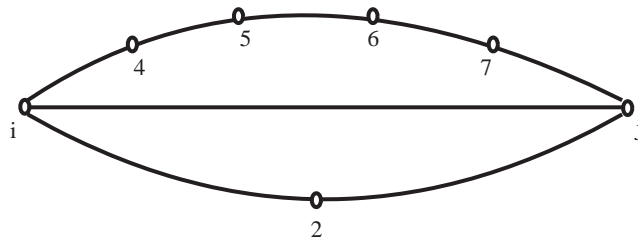
Die Simulation in kleinen Netzmaschen bietet den Vorteil der Wechselwirkungsfreiheit zwischen Relationen ij . So können leichter Rückschlüsse auf die Gesetzmäßigkeiten der Routenwahl gezogen werden.

Für die Simulation wurden die Netzmaschen in MS Excel abgebildet und in der gleichen Datei ein VBA-Makro erstellt. Ein solches Simulationsprogramm ist wesentlich kleiner als jenes für die realen Netze, da auf das Einlesen und

Verwalten von Netzen und Algorithmen für die Routensuche, den Routenvergleich und die Speicherung⁴ verzichtet werden konnte. An der Simulation waren wiederum zwei Umlegungsverfahren beteiligt, und zwar das Lernverfahren nach LOHSE und die MC-Simulation. Die normalverteilten Streckenreisezeiten werden mit VBA-Funktionen ermittelt. Der Mittelwert der Normalverteilung bildet die verkehrsstärkenabhängige Reisezeit (BPR-Funktion nach Gl. 4.1 mit $a = 1$ und $b = 5$). Das Lernverfahren bricht ab, wenn die Bedingung, dass der Prüf-wert kleiner ist als der Grenzwert, für alle Strecken erfüllt ist (siehe Gl. 4.3 und 4.4). Bei der MC-Simulation werden $N=2000$ Versuche (Realisierungen) vorgenommen. Die Routenauswahlwahrscheinlichkeit P_r für eine Route r ergibt sich aus

$$P_r = \frac{\text{Häufigkeit von Route } r \text{ als Bestweg}}{\text{Gesamtzahl der Versuche bzw. Iterationen}} = \frac{h_r}{N^{(n)}} \quad .$$

Die Untersuchung erfolgt in zwei unterschiedlichen *Topologien* (Abb. 4.9 und 4.10). Die erste Netzmasche verfügt ausschließlich über unabhängige Routen, in der zweiten Netzmasche sind die Routen voneinander abhängig. So bietet sich die Möglichkeit, den Einfluss des Umweges und den Einfluss der Abhängigkeit von Routen getrennt zu untersuchen.



Route	Knotenfolge
R1	i-j
R2	i-2-j
R3	i-4-5-6-7-j

Strecke	ij	i2	2j	i4	45	56	67	7j
C [10^3 Kfz/h]	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
T0 (Aufw.-kl. B)	240	135	135	66	66	66	66	66

Abbildung 4.9: Netzmasche mit parallelen Routen (Netzmasche 1)

⁴Die Zahl der Routen bzw. deren Verlauf ist fest definiert.

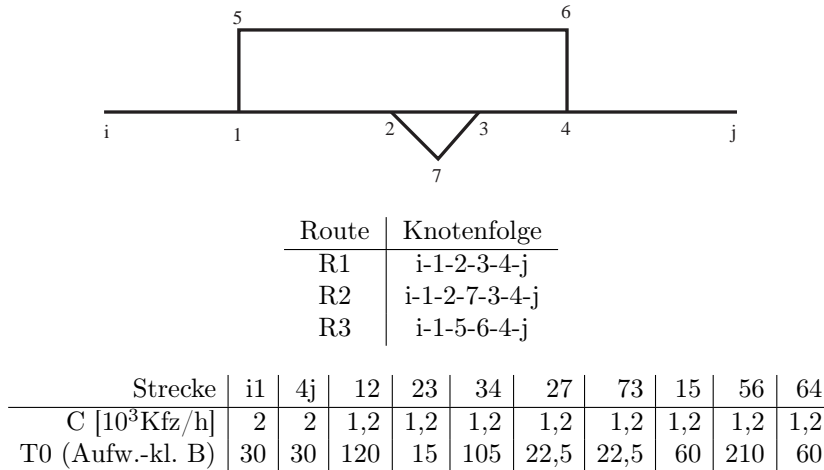


Abbildung 4.10: Netzmasche mit abhängigen Routen (Netzmasche 2)

Die dargestellten Topologien wurden hinsichtlich des absoluten Aufwandes der Routen variiert. Dazu erfolgte die Definition von *Aufwandsklassen*, die die unterschiedlichen Bedingungen von Nahverkehr bzw. Fernverkehr widerspiegeln (siehe Tabelle 4.2). Der Netzfall B bildet sehr kurze Routen, die Netzfälle C, D und E zunehmend längere und Netzfall F lange Fahrten ab. Die Streckenreisezeiten für die Aufwandsklasse B sind in den Abbildungen 4.9 und 4.10 angegeben. Die Streckenreisezeiten für die Klassen C, D, E und F lassen sich bilden, wenn der angegebene Wert jeweils mit dem Wert 2, 4, 8 bzw. 16 multipliziert wird. Die drei Routen unterscheiden sich jeweils durch ihren relativen Umweg. Die Routen R2 und R3 sind 10% bzw. 30% länger als die Route R1. Der fixe relative Anteil verursacht bei kurzen Routen einen geringen absoluten Unterschied (5 min zu 5,5 min zu 6,5 min), bei den langen Routen einen entsprechend größeren absoluten Unterschied (80 min zu 88 min zu 104 min). Der Netzfall A hat keine praktische Bedeutung, er dient lediglich einer logischen Kontrolle. In den Simulationsläufen wurden unterschiedliche *Belastungszustände* geprüft. Dazu wurde der Quelle-Ziel-Verkehrstrom im Wertebereich von $v_{ij} = 100$ (100) 2500 variiert. Der Fall $v_{ij} = 100$ entspricht dem Fall ohne Kapazitätsbeschränkung, denn in diesem Fall wirkt die Kapazitätsbeschränkungsfunktion noch nicht. Die verkehrsstärkenabhängigen Streckenreisezeiten wurden mit der BPR-Funktion ermittelt (Parameter $a=1$, $b=5$, Kapazität lt.

Aufwandsklasse	A	B	C	D	E	F
Route	T0 [s]					
R1	600	300	600	1200	2400	4800
R2	600	330	660	1320	2640	5280
R3	600	390	780	1560	3120	6240
	T0 [min]					
R1	10	5	10	20	40	80
R2	10	5,5	11	22	44	88
R3	10	6,5	13	26	52	104
	Umwegfaktor UF [-]					
R1	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
R2	1,00	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
R3	1,00	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30

Tabelle 4.2: Grundreisezeiten verschiedener Aufwandsklassen für die Routen in den Netzmaschen 1 bzw. 2

Abbildung 4.9 und 4.10).

Zusammen mit der Variation des Schätzparameters κ ergaben sich demnach insgesamt 7200 Simulationsfälle (2 Netztopologien x 6 Aufwandsklassen x 25 Belastungszustände x 24 Schätzparameter).

4.3.1 Bestimmung des Schätzparameters

Die Größe des Parameters κ aus Gl. 4.9 ist zunächst unbekannt. Um die Größenordnung abzuschätzen, wurden deshalb für die Netzmaschen Simulationen mit verschiedenen κ -Werte im Bereich von 0,5 (0,5) 12 durchgeführt.

Durch eine Vorbetrachtung erfolgt eine Eingrenzung des Wertebereichs. Dazu mussten die Verläufe der Routenauswahlwahrscheinlichkeiten in den unterschiedlichen Belastungszuständen und zwischen den unterschiedlichen Aufwandsklassen verglichen werden. Für jeden Simulationsfall wurde vermerkt, welcher κ -Wert zu plausiblen, unplausiblen oder zu indifferenten⁵ Ergebnissen führt. Unplausible Ergebnisse sind gegeben, wenn

- sich trotz geringer Aufwandsdifferenzen deutlich unterschiedliche Auswahlwahrscheinlichkeiten ergeben bzw.

⁵Indifferent bedeutet hier der Grenzfall zwischen plausiblen oder unplausiblen Ergebnissen.

- deutlich längere Routen einen nicht zu vernachlässigenden Routenstrom aufweisen.

Plausible Ergebnisse zeigten sich bei kurzen Aufwandsklassen tendenziell eher mit großen und bei großen Aufwänden eher mit kleinen κ -Werten. Werte im Bereich von $\kappa = 3 \dots 6,5$ ergaben für *alle* Aufwandsklassen plausible Simulationsergebnisse. In den Abbildungen 4.11, 4.12 sowie 4.13 sind die Simulationsergebnisse für Netzmasche 1 mit dem Parameter $\kappa = 1$, $\kappa = 3$ bzw. $\kappa = 6$ dargestellt. Die Einschätzung, ob die Routen plausibel sind oder nicht, beruh-

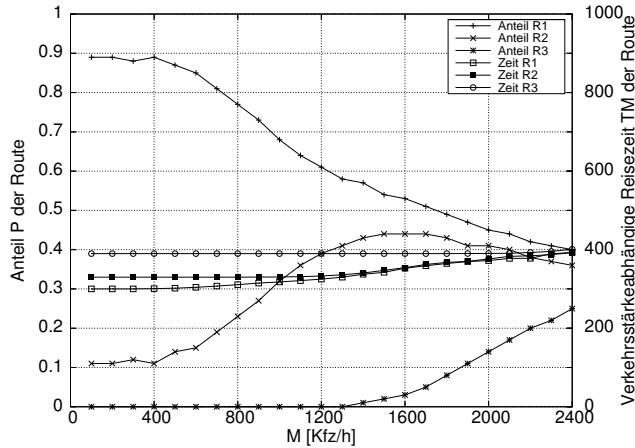


Abbildung 4.11: Routenauswahlwahrscheinlichkeiten und Reisezeiten in der Netzmasche 1, Aufwandsklasse B, $\kappa = 1$, Monte-Carlo-Simulation.

te jedoch auf einer subjektiven Wahrnehmung und Entscheidung der Autorin. Deshalb wurde der mögliche Wertebereich auch am Netzmodell Großenhain nochmals geprüft. In der ersten Simulation wurde der Wert $\kappa = 5$ gesetzt. Die Einschätzung der Routenverläufe und der Routenhäufigkeiten ergab, dass zu häufig zu große Umwege in Kauf genommen wurden. Folglich wurde sowohl für die Netzmodelle Großenhain und Dresden sowie für die Netzmaschen mit dem Wert $\kappa = 3$ gearbeitet.

Letztendlich existiert jedoch weiterhin eine gewisse Unsicherheit bezüglich des günstigen κ -Wertes. Für nachfolgende experimentelle Untersuchungen wird deshalb empfohlen, noch niedrigere Werte (Bereich von $2 \dots 3$) ebenfalls zu prüfen.

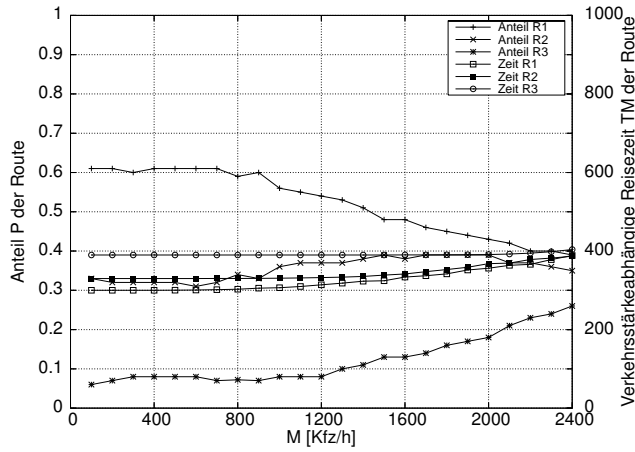


Abbildung 4.12: Routenauswahlwahrscheinlichkeiten und Reisezeiten in der Netzmasche 1, Aufwandsklasse B, $\kappa = 3$, Monte-Carlo-Simulation.

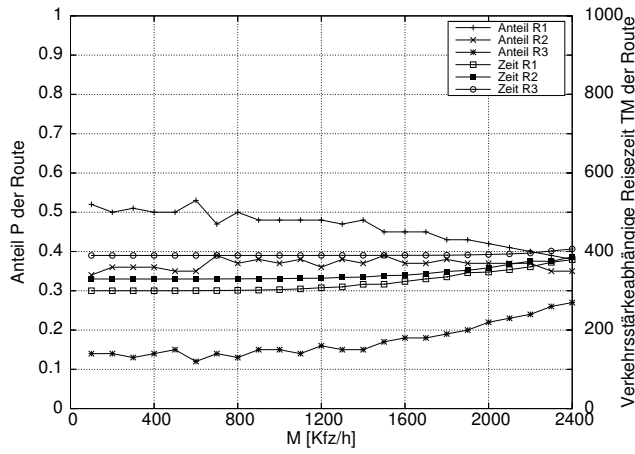


Abbildung 4.13: Routenauswahlwahrscheinlichkeiten und Reisezeiten in der Netzmasche 1, Aufwandsklasse B, $\kappa = 6$, Monte-Carlo-Simulation.

4.3.2 Ergebnisse

Netzmasche mit parallelen Routen Die Auswahlwahrscheinlichkeit und die verkehrsstärkenabhängigen Reisezeiten sind für die Aufwandsklassen B und F in den Abbildungen 4.12 und 4.14 dargestellt. Die Ergebnisse der übrigen Aufwandsklassen sind ähnlich und die bestehenden Unterschiede systematisch. Um das Spektrum der Ergebnisse zu zeigen, sind nur ausgewählte Klassen (d.h. die kleinste und größte Aufwandsklasse) dargestellt. Die Ergebnisse des Lern-

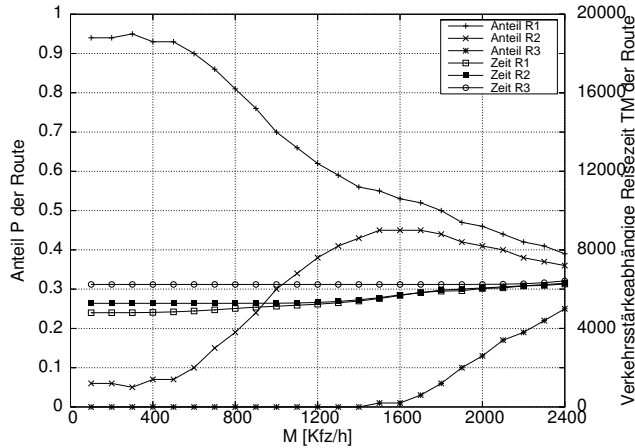


Abbildung 4.14: Routenauswahlwahrscheinlichkeiten und Reisezeiten in der Netzmasche 1, Aufwandsklasse F, $\kappa = 3$, Monte-Carlo-Simulation.

verfahrens sind zum Vergleich in den Abbildungen 4.15 und 4.16 angegeben.

Die Auswahlwahrscheinlichkeit ist natürlicherweise um so größer, je geringer der Aufwand der Route ist. Mit zunehmender Streckenauslastung bewegen sich die Häufigkeiten aufeinander zu, d.h. der große Routenstrom des Bestweges nimmt ab und die Häufigkeit der aufwändigeren Routen nehmen zu. Bedingt durch die begrenzte Kapazität des Bestweges treten zunehmend Verdrängungseffekte auf. Die Verdrängungseffekte vollziehen sich in der MC-Simulation langsam und stetig. Im Lernverfahren treten abrupte Änderungen der Routenströme auf, was aber mit der Festlegung der Abbruchgrenze beeinflusst werden kann. Insgesamt wachsen die Reisezeiten aller Strecken an.

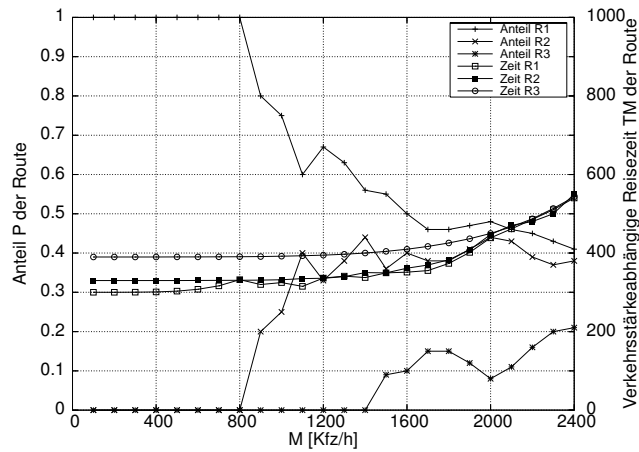


Abbildung 4.15: Routenauswahlwahrscheinlichkeiten und Reisezeiten in der Netzmaschine 1, Aufwandsklasse B, Berechnung mit Lernverfahren.

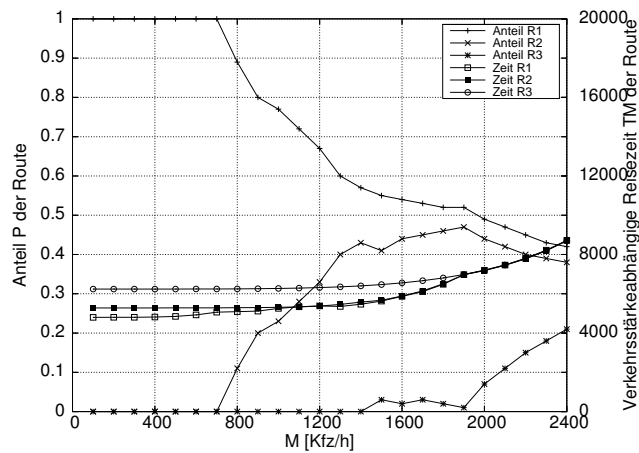


Abbildung 4.16: Routenauswahlwahrscheinlichkeiten und Reisezeiten in der Netzmaschine 1, Aufwandsklasse F, Berechnung mit Lernverfahren.

Netzmasche mit abhängigen Routen Gegenüber den Simulationen in Netzmasche 1 zeigt sich in den Simulationen mit Netzmasche 2, welchen Einfluss die Abhängigkeit von Routen auf die Routenauswahlwahrscheinlichkeit hat. In den Ergebnissen vermischen sich jetzt die Einflüsse unterschiedlicher Aufwände *und* der Abhängigkeit von Routen. Die Abbildung 4.17 zeigt den

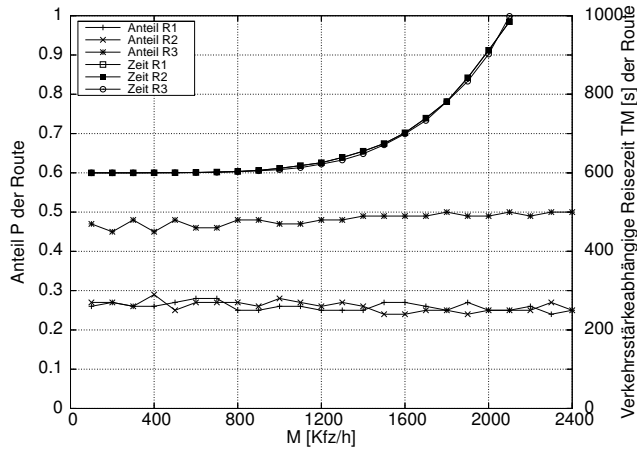


Abbildung 4.17: Routenauswahlwahrscheinlichkeiten und Reisezeiten in der Netzmasche 2, Testfall A mit identischen Routenreisezeiten, Monte-Carlo-Simulation.

Fall von abhängigen Routen mit *identischen* Aufwänden. Die am stärksten unabhängige Route⁶ (hier Route 3) erhält einen Anteil von nahezu 50%, die beiden übrigen Routen jeweils rd. 25%.

Die Abweichung von der Gleichverteilung der Routenströme – die bei identischen Aufwänden naheliegend wäre – lässt sich durch die Abhängigkeit erklären. Bestimmte Strecken (z. B. Strecke 12) beeinflussen den Routenaufwand von *zwei* Routen. Wenn für diese Strecken eine ungünstige Zufallszahl gezogen wird, dann führt dies mit hoher Wahrscheinlichkeit zur Ablehnung beider Routen. Es zeigt sich auch, dass das Lernverfahren prinzipiell auf die Abhängigkeit von Routen richtig reagiert (siehe Abbildung 4.18).

Die Abbildungen 4.19 und 4.20 zeigen die Ergebnisse der MC-Simulation in den Aufwandsklassen B und F. Die Route R2 erhält den geringsten Rou-

⁶Maßzahlen für die Unabhängigkeit wurden im Abschnitt 2.4.3 vorgestellt.

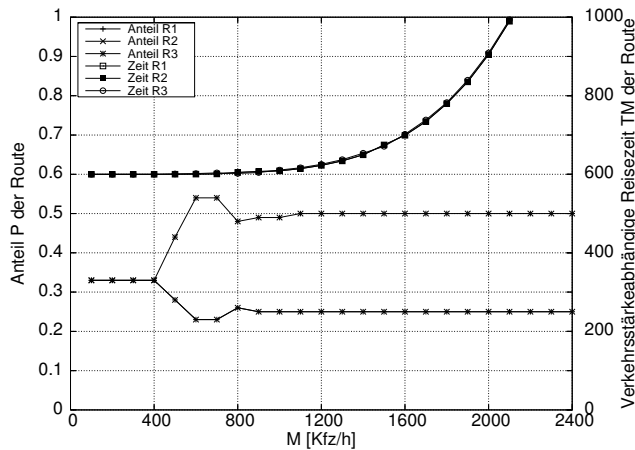


Abbildung 4.18: Routenauswahlwahrscheinlichkeiten und Reisezeiten in der Netzmasche 2, Testfall A, Berechnung mit Lernverfahren.

tenstrom (zwischen 0% und 5%; im Vergleich dazu in Netzmasche 1 je nach Aufwandsklasse zwischen 5% und 50 %), obwohl sie *nicht* die aufwändigste Route ist. Das ist nur dadurch zu erklären, dass Route R2 einen kurzen, aber sehr umwegigen Absprung⁷ von Route 1 darstellt. Dieser Absprung wird so negativ bewertet, dass der Routenaufwand für die Wahlentscheidung zweit-rangig wird. Der Routenstrom von Route R2 wird vornehmlich von Route R1 übernommen.

Kurze und umwegige Absprünge werden auch durch das Lernverfahren abgewiesen (siehe Abbildungen 4.21 und 4.22).

4.4 Fazit

Die Schrittzahl der Monte-Carlo-Simulation bewegt sich in akzeptablen Größenordnungen und ist somit als Verfahren für die Generierung von MIV-Routen geeignet. Die Zahl der Routen pro Relation kann im Extremfall 50 und mehr

⁷Kurzer, aber umwegiger Absprung bedeutet, dass die Verzweigungspunkte der beiden Routen nahe beieinander liegen und der Umweg auf der aufwändigeren Route erheblich ist. Diese Art von abspringenden Routen ist generell kritisch, denn diese Routen können – gemessen an ihrem Routenaufwand – trotzdem scheinbar attraktive Alternativen darstellen.

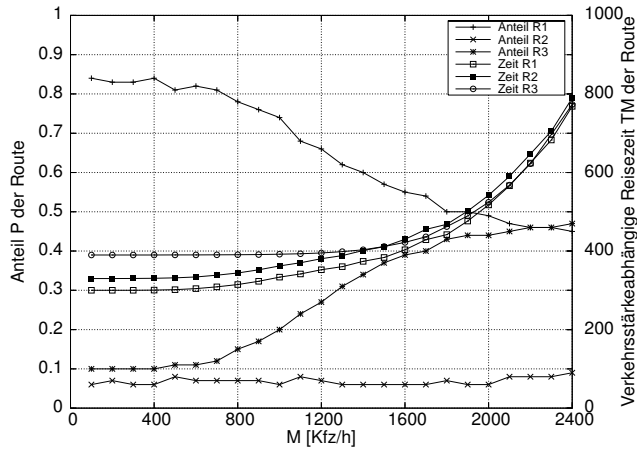


Abbildung 4.19: Routenauswahlwahrscheinlichkeiten und Reisezeiten in der Netzmasche 2, Aufwandsklasse B, Monte-Carlo-Simulation.

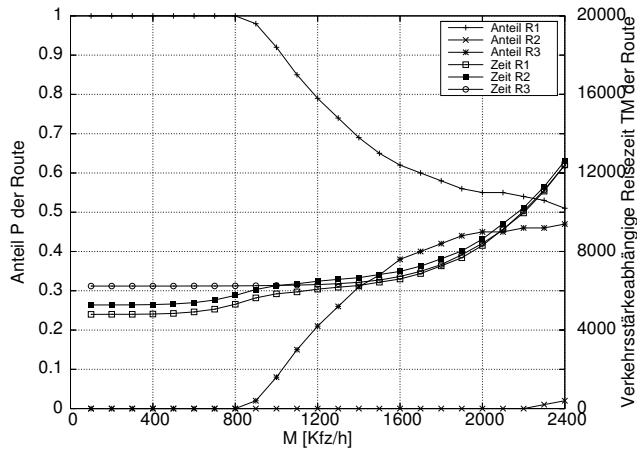


Abbildung 4.20: Routenauswahlwahrscheinlichkeiten und Reisezeiten in der Netzmasche 2, Aufwandsklasse F, Monte-Carlo-Simulation.

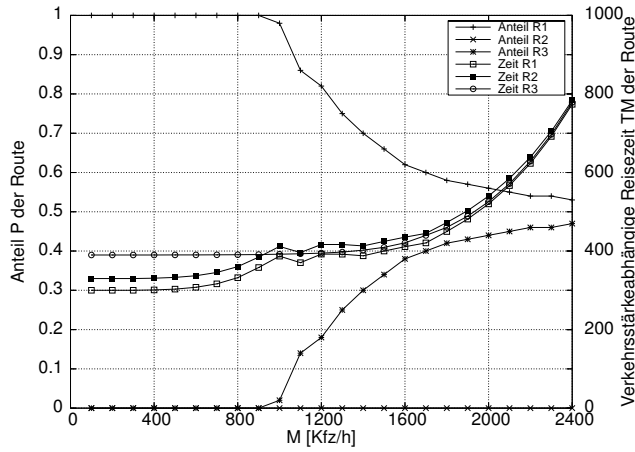


Abbildung 4.21: Routenauswahlwahrscheinlichkeiten und Reisezeiten in der Netzmasche 2, Aufwandsklasse B, Berechnung mit Lernverfahren.

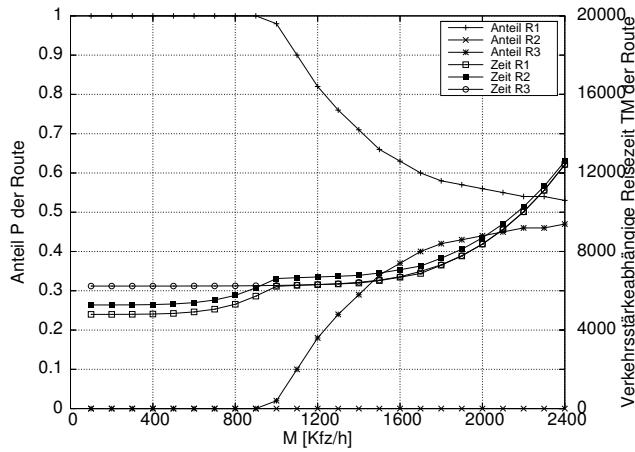


Abbildung 4.22: Routenauswahlwahrscheinlichkeiten und Reisezeiten in der Netzmasche 2, Aufwandsklasse F, Berechnung mit Lernverfahren.

betragen. Die Größe des Schätzparameters und die Strenge der Abbruchbedingung beeinflussen die Routenzahl. Die Routenzahl ist jedoch auch in hohem Maße von der Netzdichte, der Topologie und der Attributierung abhängig. In diesem Sinne ist in Zukunft der Knotenpunktsattributierung besondere Beachtung zu schenken. Der Variationskoeffizient von Routen und damit die akzeptierten Umwege sinken mit zunehmendem Aufwand. Überträgt man dieses Simulationsergebnis auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmer, dann würde das bedeuten, dass Menschen große Aufwände genauer betrachten und bewerten.

Eine geeignete Definition des Schätzfehlers k hebt den Seiteneffekt auf. Für den Schätzparameter κ kann ein Wertebereich von $2 \leq \kappa \leq 3$ empfohlen werden. Das Lernverfahren als populäres Verfahren für die MIV-Umlegung findet in schwach ausgelasteten Netzen deutlich weniger Routen als das Monte-Carlo-Verfahren.

Die Abhängigkeit von Routen hat – neben dem absoluten und relativen Aufwand – einen wesentlichen Einfluss auf die Auswahlwahrscheinlichkeit von Routen. Routen, die kurze und umwegige Absprünge anderer Routen darstellen, werden nicht oder nur in sehr geringem Maße nachgefragt. Die verkehrsstärkenabhängigen Umlegungsverfahren (z.B. das Lernverfahren) beachten prinzipiell die Abhängigkeit von Routen. Im Hinblick auf die verkehrsstärkenunabhängige Modellierung der Routenwahl können valide Ergebnisse nur erreicht werden, wenn die Abhängigkeit im Berechnungsansatz explizit berücksichtigt wird.

Etwa zeitgleich zu den Simulationen dieser Arbeit hat RAMMING [38] seine Arbeit präsentiert. Er widmet sich der Frage, welcher der vielen Routensuchalgorithmen sich für die Generierung eines Routensets für den MIV eignet. Dazu werden aus einer Befragung (Routenwahl der Mitarbeiter der Hochschule für ihren Arbeitsweg) empirische Routen ($N=188$) generiert und ein Trefferkriterium (Treffer bedeutet, dass der Routensuchalgorithmus vollständig oder nahezu vollständig eine empirische Route abbildet) definiert. Für die verschiedenen Routensuchalgorithmen (Bestwegalgorithmus mit insgesamt 16 verschiedenen Kriterien [engl: labels] wie z.B. Reisezeit, Entfernung, Länge der Route auf Autobahn etc. und verschiedene Mehrwegalgorithmen einschließlich Monte-Carlo-Simulationen) werden die Trefferquoten dargestellt.

Es zeigt sich, dass mit dem „besten“ Bestwegalgorithmus (Kriterium: T0-Reisezeit) je nach Strenge der Trefferdefinition eine Trefferquote von 34% bis 46% erreicht wird. Die Monte-Carlo-Simulation mit 48 Iterationsschritten erzielt eine Trefferquote von 50% bis 79%. Die höchstmögliche Trefferquote (72% bis 85%) ergibt sich, wenn die Routen des Bestwegalgorithmus mit den 16 unterschiedlichen Kriterien kombiniert werden. Im Hinblick auf die Laufzeit, die Trefferquote und der Simplität der Implementation empfiehlt RAMMING

das Verfahren der Monte-Carlo-Simulation (48 Iterationen) kombiniert mit der Bestwagsuche für 3 bestimmte Kriterien.

Kapitel 5

Modellentwicklung

5.1 Basis

In diesem Kapitel wird ein Nachfragemodell (im Folgenden als Modell EVA-U bezeichnet) vorgestellt, welches die Nachfrage nach Routen r der Relation ijk bestimmt. Es werden demnach die Module Erzeugung, Verteilung, Aufteilung und Routenwahl zusammengefasst. Die Routen können zu den verschiedenen Verkehrsmitteln (MIV, ÖV, P+R, Rad, Fuß) gehören, die Routenanzahl kann für jede Relation ijk unterschiedlich sein. Das Modell EVA-U erreicht ein stochastisches Nutzergleichgewicht. Die entstehende Matrixstruktur ist in Abbildung 5.1 schematisch dargestellt. Durch die Aggregation der Routenströme ergeben sich die Ergebnisse der übrigen Modellstufen:

- Quellverkehrsaufkommen: $Q_i = \sum_{j'k'r'} v_{ij'k'r'}$,
- Zielverkehrsaufkommen: $Z_j = \sum_{i'k'r'} v_{i'jk'r'}$,
- Verkehrsartaufkommen: $A_k = \sum_{i'j'r'} v_{i'j'kr'}$,
- Verkehrsmittelstrom (Aufteilung): $v_{ijk} = \sum_{r'} v_{ijk'r'}$,
- Relationsstrom (Verteilung): $v_{ij} = \sum_{k'} v_{ijk'} = \sum_{k'r'} v_{ijk'r'}$ sowie
- die Verkehrsstärke der Strecken: $M_{ak} = \sum_{i'j'r'} v_{i'j'kr'} \cdot \delta_{ar'} \cdot \pi$.

Das Modell EVA-U hat mehrere Vorteile.

Erstens ist es im Hinblick auf die Konsistenz vorteilhaft, dass für die Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahl ein identischer Satz von Kenngrößen herangezogen wird. Die Bewertung der Aufwände der Verkehrsmittel erfolgt nach

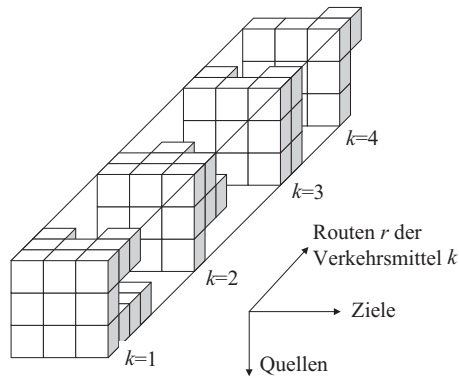


Abbildung 5.1: Struktur einer Matrix im Modell EVA-U mit einer beliebigen Anzahl von Routen

einem einheitlichen Konzept, ebenso die Berücksichtigung der Abhängigkeit von Routen der verschiedenen Verkehrsarten.

Zweitens muss der Algorithmus zur Routensuche weniger häufig ausgeführt werden. Zunächst werden vor Beginn der Berechnung die Routen ermittelt (z.B. Monte-Carlo-Routensuche im MIV, fahrplangenaues Verfahren im ÖV). Die ermittelten Routen werden gesichert und in den folgenden Iterationsschritten wieder verwendet¹. Lediglich die verkehrsstärkenabhängigen Kenngrößen der Routen bzw. der Strecken sind zu aktualisieren.

Drittens wird die Effektivität der Gleichgewichtssuche verbessert. In einem zweistufigen Berechnungsverfahren mit dem EVA-Modell plus Umlegungsmodellen wird in jeder Rückkopplung erneut mit einem unbelasteten Netz beginnend ein Gleichgewicht gesucht (siehe Abbildung 5.2). Im Modell EVA-U wird ein Schritt der Routenbelastung auf einen vorhergehenden Schritt aufgesetzt. Einen Rücksprung zu einem unbelasteten Netz gibt es nicht.

Viertens ist es im Verfahren mit EVA-Modell plus Umlegungen notwendig, ein Gleichgewicht zwischen mehreren Teilmodellen herzustellen. Im Simultanmodell EVA-U muss nur noch an einer Stelle ein (äußeres) Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage erreicht werden (siehe Abbildung 5.2). Dieses

¹Im Fall verkehrsstärkenunabhängiger Aufwände (z.B. ÖV) ist die einmalige Suche ausreichend. Für den MIV (verkehrsstärkenabhängige Aufwände) sollte nach den ersten Iterationsschritten geprüft werden, ob sich neue Routen ergeben (Details zum Ablauf des Verfahrens siehe Abschnitt 5.4).

Vorgehen zusammen mit der Verminderung von wiederholten Routensuchen sollte zu einer deutlichen Verringerung von Rechenzeit führen.

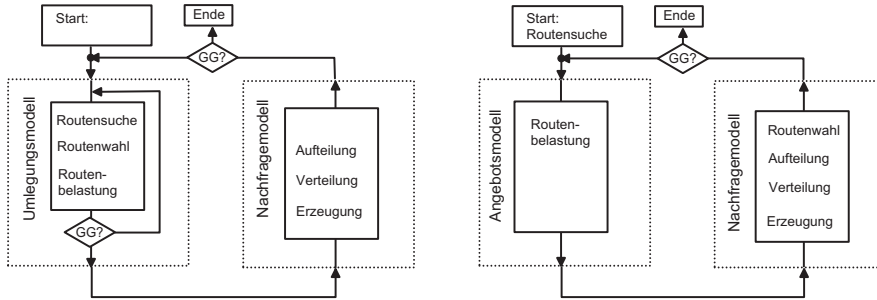


Abbildung 5.2: Ablauf, Rückkopplungen und Gleichgewichte (GG) im Modell EVA plus Umlegungen (links) und EVA-U (rechts)

Die Basis des EVA-U-Modells bildet das trilineare EVA-Modell (s. Gl. 2.28). Dieses Modell wurde gewählt, weil (1.) das EVA-Modell relativ einfach und solide wahrscheinlichkeitstheoretisch abgeleitet werden kann, (2.) ein geeignetes Prognoseverfahren (Stichwort: Verkehrsmittelgunstfaktor) existiert und (3.) zahlreiche Modellvarianten eine adäquate Modellierung unterschiedlicher Anwendungsfälle ermöglichen.

Die Bewertungsgröße BG im Modell EVA-U wird gegenüber dem EVA-Modell um eine Dimension erweitert – sie bezieht sich nun auf eine Route r eines Verkehrsmittels k der Relation ij . In diese Bewertungsgröße wird die Auswahlwahrscheinlichkeit für Routen $P(R_{ijk})$ integriert. Damit ergibt sich in Anlehnung an das trilineare EVA-Modell nach Gleichung 2.28 und 2.29 für den Strom einer Route r der Relation ijk mit der Routenauswahlwahrscheinlichkeit $P(R_{ijk})$

$$v_{ijk} = v_{ijk} \cdot P(R_{ijk}) = BG_{ijk} \cdot P(R_{ijk}) \cdot fq_i \cdot fz_j \cdot fa_k$$

$$\boxed{v_{ijk} = BG_{ijk} \cdot fq_i \cdot fz_j \cdot fa_k} \quad (5.1)$$

mit (beispielsweise) harten Randsummenbedingungen

$$\begin{aligned} QP_i &= \sum_{j'k'} v_{ij'k'} \quad , \\ ZP_j &= \sum_{j'k'} v_{i'jk'} \quad , \\ AP_k &= \sum_{j'k'} v_{i'j'k} \quad . \end{aligned}$$

Dabei sind

BG_{ijk}	EVA-U-Bewertungsgröße nach Gl. 5.5,
$f q_i, f z_j, f a_k$	Bilanzfaktoren des Gleichungssystems mit Nebenbedingungen,
$P(R_{ijk})$	Routenauswahlwahrscheinlichkeit,
QP_i, ZP_j	Quell- und Zielpotenzial der Verkehrsbezirke,
AP_k	Verkehrsartenpotenzial,
Q_i, Z_j, A_k	Quell-, Ziel- und Verkehrsartaufkommen (Randsummen der Matrix).

Die Bedingung $\sum_{r'} P(R_{ijk r'}) = 1$ führt dazu, dass der Verkehrsstrom v_{ijk} nicht von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Routen abhängt. Für den Strom v_{ijk} der Relation ijk führt die Aggregation zu einem Ansatz, der mit dem EVA-Modell identisch ist.

$$\begin{aligned} v_{ijk} &= \sum_{r'} v_{ijk r'} = \sum_{r'} BG_{ijk} \cdot P(R_{ijk r'}) \cdot f q_i \cdot f z_j \cdot f a_k \\ &= BG_{ijk} \cdot f q_i \cdot f z_j \cdot f a_k \quad . \end{aligned}$$

Das Verhältnis y_{ijk} zwischen zwei beliebigen Routen einer Verkehrsbeziehung ijk entspricht dem Verhältnis der beiden Routenauswahlwahrscheinlichkeiten:

$$y_{ijk} = \frac{v_{ijk1}}{v_{ijk2}} = \frac{BG_{ijk} \cdot P(R_{ijk1}) \cdot f q_i \cdot f z_j \cdot f a_k}{BG_{ijk} \cdot P(R_{ijk2}) \cdot f q_i \cdot f z_j \cdot f a_k} = \frac{P(R_{ijk1})}{P(R_{ijk2})} \quad .$$

Die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route r der Relation ijk ist

$$\begin{aligned} \frac{v_{ijk r}}{\sum_{r'} v_{ijk r'}} &= \frac{BG_{ijk} \cdot P(R_{ijk r}) \cdot f q_i \cdot f z_j \cdot f a_k}{\sum_{r'} BG_{ijk} \cdot P(R_{ijk r'}) \cdot f q_i \cdot f z_j \cdot f a_k} \\ &= \frac{P(R_{ijk r})}{\sum_{r'} P(R_{ijk r'})} \end{aligned}$$

und da $\sum_{r'} P(R_{ijk'r'}) = 1$ gilt, entspricht der Anteil einer Route am Verkehrsmittelstrom ihrer Routenauswahlwahrscheinlichkeit

$$\frac{v_{ijk'r}}{\sum_{r'} v_{ijk'r'}} = P(R_{ijk'r}) \quad .$$

Für die Modellierung wird vorausgesetzt, dass

- das Verkehrsgeschehen in homogene Schichten (QZG) geteilt wird,
- die Potenziale der Verkehrsbezirke bekannt sind und
- die Routen der Verkehrsarten einschließlich der dazugehörigen Aufwände ermittelt wurden.

Die Lösung des Gleichungssystems ist mit bekannten Algorithmen (trilinear-er FURNESS- oder MULTI-Algorithmus, siehe Anhang C) möglich. Weitergehende Anforderungen an Eingangsdaten entstehen nicht, d.h. die notwendigen Eingangsdaten für das Modell EVA-U (Raumstruktur, Netzmodelle, Mobilitätsdaten etc.) unterscheiden sich nicht von denen des zweistufigen Verfahrens (EVA-Modell plus Umlegungen).

Für das **Prognoseverfahren** im Modell EVA wird auf die Verkehrsart-Randsummenbedingung verzichtet und stattdessen die Bewertung um den Verkehrsmittelgunstfaktor $Ca_k^{(P)} = fa_k^{(A)} / \sum_{k'} fa_{k'}^{(A)}$ ((P)–Prognose, (A)–Analyse) erweitert. Das Verkehrsaufkommen der Verkehrsart ist allein abhängig von dessen Bewertung. Dieses Vorgehen findet auch im Modell EVA-U Anwendung.

$$v_{ijk'r}^{(P)} = \left(Ca_k^{(P)} \cdot BG_{ijk}^{(P)} \cdot P^{(P)}(R_{ijk'r}) \right) \cdot fq_i^{(P)} \cdot fz_j^{(P)} \quad (5.2)$$

mit (beispielsweise) harten Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} QP_i^{(P)} &= \sum_{j'k'r'} v_{ij'k'r'}^{(P)} \quad , \\ ZP_j^{(P)} &= \sum_{i'k'r'} v_{i'jk'r'}^{(P)} \quad . \end{aligned}$$

5.2 Ableitung des Nachfragemodells

Die Ableitung des Modells ist mit Hilfe von wahrscheinlichkeitstheoretischen Betrachtungen möglich. Dazu werden alle potenziellen Verkehrsteilnehmer betrachtet, die eine Route r wählen und sich damit für eine Quelle i , ein Ziel j und ein Verkehrsmittel k entscheiden. Es werden folgende Ereignisse eingeführt:

A_i	eine Ortsveränderung beginnt im Verkehrsbezirk i ,
E_j	eine Ortsveränderung endet im Verkehrsbezirk j ,
M_k	eine Ortsveränderung wird mit Verkehrsmittel k durchgeführt,
$V_{ijk r}$	für die Ortsveränderung wird Route r genutzt, die im Verkehrsbezirk i beginnt, in j endet und zu Verkehrsmittel k gehört,
W	eine Ortsveränderung wird durchgeführt (Akzeptanz des Aufwandes),
\overline{W}	eine Ortsveränderung wird aufgrund des Aufwandes abgelehnt.

Durch die Anwendung der Mengenoperationen Vereinigung und Durchschnitt auf die Ereignisse entsteht ein Ereignisfeld F , welches $V_{ijk r}$ als kleinstes Ereignis besitzt. Die anderen Ereignisse sind

$$A_i = \bigcup_{j'k'r'} V_{ij'k'r'} \quad , E_j = \bigcup_{i'k'r'} V_{i'jk'r'} \quad , M_k = \bigcup_{i'j'r'} V_{i'j'kr'} \quad .$$

Auf dem Ereignisfeld F sei ein Wahrscheinlichkeitsmaß P definiert. Dabei gelten folgende Annahmen:

- Die Ereignisse A_i, E_j und M_k sind voneinander unabhängig. Es gilt:

$$P(A_i \cap E_j \cap M_k) = P(A_i) \cdot P(E_j) \cdot P(M_k) \quad .$$

- Das Ereignis $V_{ijk r}$ ist nicht unabhängig von den Ereignissen A_i, E_j und M_k . Die Ereignisse $V_{ijk1}, V_{ijk2}, \dots, V_{ijkN(r)}$ sind paarweise unvereinbar (disjunkt)², es gilt:

$$(A_i \cap E_j \cap M_k) = \bigcup_{r'} V_{ijk r'} \quad ,$$

$$P\left(\bigcup_{r'} V_{ijk r'}\right) = \sum_{r'} P(V_{ijk r'}) = P(A_i \cap E_j \cap M_k) \quad \text{sowie}$$

$$P\left(\bigcup_{r'} V_{ijk r'} | W\right) = \sum_{r'} P(V_{ijk r'} | W) \quad .$$

- Für alle Relationen ijk ist die Wahrscheinlichkeit $P(W|V_{ijk r})$ unabhängig von der Route r .

Die Wahrscheinlichkeit $P(V_{ijk r})$ ist

$$\begin{aligned} P(V_{ijk r}) &= P(V_{ijk r} \cap (A_i \cap E_j \cap M_k)) \\ &= P(V_{ijk r} | (A_i \cap E_j \cap M_k)) \cdot P(A_i \cap E_j \cap M_k) \quad . \end{aligned}$$

²Abhängige Routen werden durch einen Korrekturterm berücksichtigt, der später eingeführt wird.

Die Ableitung des Modells erfolgt mit dem Axiom von BAYES (siehe BOSCH [15]).

$$P(X_i/Y) = \frac{P(X_i) \cdot P(Y|X_i)}{\sum_{i'} P(X_{i'}) \cdot P(Y|X_{i'})} \quad (5.3)$$

Somit entsteht

$$\begin{aligned} P(V_{ijkr}|W) &= \frac{P(V_{ijkr} \cap W)}{P(W)} = \frac{P(W|V_{ijkr}) \cdot P(V_{ijkr})}{\sum_{i'j'k'r'} P(W|V_{i'j'k'r'}) \cdot P(V_{i'j'k'r'})} \\ &= \frac{P(W|V_{ijkr}) \cdot P(V_{ijkr}|A_i \cap E_j \cap M_k) \cdot P(A_i \cap E_j \cap M_k)}{\sum_{i'j'k'r'} P(W|V_{i'j'k'r'}) \cdot P(V_{i'j'k'r'}|A_{i'} \cap E_{j'} \cap M_{k'}) \cdot P(A_{i'} \cap E_{j'} \cap M_{k'})} \end{aligned}$$

und mit Benennung der Elemente der Bewertungswahrscheinlichkeit

$$= \frac{BW_{ijk} \cdot P(R_{ijkr}) \cdot P(A_i) \cdot P(E_j) \cdot P(M_k)}{\sum_{i'j'k'r'} BW_{i'j'k'r'} \cdot P(R_{i'j'k'r'}) \cdot P(A_{i'}) \cdot P(E_{j'}) \cdot P(M_{k'})} \quad (5.4)$$

bzw. mit der Zusammenfassung der Bewertungswahrscheinlichkeit

$$= \frac{BW_{ijk} \cdot P(A_i) \cdot P(E_j) \cdot P(M_k)}{\sum_{i'j'k'r'} BW_{i'j'k'r'} \cdot P(A_{i'}) \cdot P(E_{j'}) \cdot P(M_{k'})} \quad .$$

Die beiden Wahrscheinlichkeiten $P(W|V_{ijkr})$ und $P(V_{ijkr}|A_i \cap E_j \cap M_k)$ bilden die komplexe Bewertungsgröße BW_{ijk} . Die Wahrscheinlichkeit $P(W|V_{ijkr})$ ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Ortsveränderung tatsächlich ausgeführt wird unter der Bedingung, dass die Route $ijkr$ gewählt wurde – d.h. der Aufwand für diese Ortsveränderung wird akzeptiert. Die Größe $P(V_{ijkr}|A_i \cap E_j \cap M_k)$ bestimmt, welche Route unter der Bedingung, dass die Entscheidung bereits zugunsten der Relation ijk getroffen wurde, gewählt wird. Dieser Term kennzeichnet die Wahl einer Route aus dem Routenset dieser Relation.

Wenn angenommen wird, dass die a-priori-Wahrscheinlichkeiten $P(A_i)$, $P(E_j)$ und $P(M_k)$ den bekannten Quell-, Ziel- und Verkehrsmittelpotenzialen QP_i/V , ZP_j/V und AP_k/V entsprechen, ergibt sich der **Ansatz des EVA-Modells ohne Randsummenbedingung**:

$$\begin{aligned} v_{ijkr} &= \frac{BW_{ijk} \cdot QP_i/V \cdot ZP_j/V \cdot AP_k/V}{\sum_{i'j'k'r'} BW_{i'j'k'r'} \cdot QP_{i'}/V \cdot ZP_{j'}/V \cdot AP_{k'}/V} \cdot V \quad \text{bzw.} \\ &= BW_{ijk} \cdot \frac{QP_i}{V} \cdot \frac{ZP_j}{V} \cdot \frac{AP_k}{V} \cdot f \quad \text{mit} \\ f &= \frac{1}{\sum_{i'j'k'r'} BW_{i'j'k'r'} \cdot \frac{QP_{i'}}{V} \cdot \frac{ZP_{j'}}{V} \cdot \frac{AP_{k'}}{V}} \quad . \end{aligned}$$

Im Gegensatz zum Modell ohne Randsummenbedingung werden beim Modell mit Randsummenbedingung nicht die a-priori-, sondern die bedingten a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten der Verkehrsaufteilung als bekannt vorausgesetzt. Das sind die Wahrscheinlichkeiten, die sich aufgrund von Erfahrungen bzw. nach erfolgter Bewertung durch die Verkehrsteilnehmer dafür ergeben, dass eine tatsächlich durchgeführte Fahrt im Verkehrsbezirk i beginnt, im Verkehrsbezirk j endet und mit dem Verkehrsmittel k durchgeführt wird (LOHSE [33]). Demnach sind

$$P(A_i|W) = \frac{QP_i}{V} \quad , \quad P(E_j|W) = \frac{ZP_j}{V} \quad , \quad P(M_k|W) = \frac{AP_k}{V} \quad ,$$

wobei die Größen QP_i , ZP_j , AP_k und V durch die Verkehrserzeugung (Bezirkspotenziale) bzw. aus Erhebungen (Verkehrsartenpotenziale) bekannt sind. Die Verhältnisse der bedingten und unbedingten Wahrscheinlichkeit werden als Lagefaktoren bezeichnet:

$$\begin{aligned} q_i &= \frac{P(A_i)}{P(A_i|W)} \rightarrow P(A_i) = q_i \cdot P(A_i|W) \quad , \\ z_j &= \frac{P(E_j)}{P(E_j|W)} \rightarrow P(E_j) = z_j \cdot P(E_j|W) \quad , \\ a_k &= \frac{P(M_k)}{P(M_k|W)} \rightarrow P(M_k) = a_k \cdot P(M_k|W) \end{aligned}$$

und zusammen mit Gl. 5.4 entsteht für die Verteilung, Aufteilung und Routenwahl das trilineare **EVA-Modell mit harten Randsummenbedingungen**:

$$\begin{aligned} v_{ijkr} &= \frac{BW_{ijkr} \cdot q_i \cdot P(A_i|W) \cdot z_j \cdot P(E_j|W) \cdot a_k \cdot P(M_k|W)}{\sum_{i'j'k'r'} BW_{i'j'k'r'} \cdot q_{i'} \cdot P(A_{i'}|W) \cdot z_{j'} \cdot P(E_{j'}|W) \cdot a_{k'} \cdot P(M_{k'}|W)} \cdot V \\ &= BW_{ijkr} \cdot \frac{QP_i}{V} \cdot q_i \cdot \frac{ZP_j}{V} \cdot z_j \cdot \frac{AP_k}{V} \cdot a_k \cdot f \end{aligned}$$

mit

$$f = \frac{V}{\sum_{i'j'k'r'} BW_{i'j'k'r'} \cdot q_{i'} \cdot \frac{QP_{i'}}{V} \cdot z_{j'} \cdot \frac{ZP_{j'}}{V} \cdot a_{k'} \cdot \frac{AP_{k'}}{V}} \quad .$$

Daraus kann die Kurzschreibweise des EVA-U-Modells mit Randsummenbedingung abgeleitet werden

$$v_{ijkr} = BW_{ijkr} \cdot f q_i \cdot f z_j \cdot f a_k$$

und mit den bekannten harten Randsummenbedingungen

$$\begin{aligned} QP_i &= \sum_{j'k'r'} v_{ij'k'r'} \quad , \\ ZP_j &= \sum_{i'k'r'} v_{i'jk'r'} \quad , \\ AP_k &= \sum_{i'j'r'} v_{i'j'kr'} \quad , \\ V &= \sum_{i'j'k'r'} v_{i'j'k'r'} \end{aligned}$$

ergibt sich eine Version dieses Modells.

Im Abschnitt 2.2.2 ist die Ableitung des EVA-Modells durch Minimierung des Informationsgewinns dargestellt. Diese Form der Ableitung ist für das Modell EVA-U ebenso möglich.

SCHILLER [41] zeigt, dass das EVA-Modell ohne und mit Randsummenbedingungen ein universales Logit-Modell ist. Da die Differenzierung der Bewertungsgröße diese Feststellung nicht außer Kraft setzt, gilt also auch für das Modell EVA-U, dass es den universalen Logit-Modellen zuzuordnen ist.

5.3 Bewertung von Alternativen

Die wahrscheinlichkeitstheoretische Ableitung zeigt, dass sich die Bewertungsgröße BG_{ijk_r} aus zwei Termen zusammensetzt:

$$BG_{ijk_r} = BG_{ijk} \cdot P(R_{ijk_r}) \quad . \quad (5.5)$$

Die Größe BG_{ijk_r} wird im folgenden Text allgemein als EVA-U-Bewertungswahrscheinlichkeit bezeichnet. Die beide Faktoren der EVA-U-Bewertungsgröße spiegeln unterschiedliche Entscheidungen wider. Der erste Term $BG_{ijk} = P(W|V_{ijk_r})$ beschreibt die Entscheidung, diese Ortsveränderung unter der Bedingung des konkreten Aufwandes tatsächlich durchzuführen. In diesem Sinne muss der Term die „absolute Attraktivität“ der Relation abbilden. Der zweite Teil der Bewertungsgröße, $P(R_{ijk_r}) = P(V_{ijk_r}|A_i \cap E_j \cap M_k)$, ist die Auswahlwahrscheinlichkeit der Route r aus der Alternativenmenge der Relation ijk . Hierin müssen die Unterschiede zwischen den Routen abgebildet werden.

Über das Wahlverhalten der Verkehrsteilnehmer wurden bereits im Abschnitt 2.6.1 Hypothesen formuliert. Diese Hypothesen sind maßgebend für die

Auswahl der Bewertungsfunktionen. Entsprechend der komplexen Wahlsituation und unter Berücksichtigung der genannten Hypothesen wurde eine komplexe Bewertungsgröße erarbeitet. Die Abbildung 5.3 verdeutlicht die Struktur der Bewertungsgröße. Die einzelnen aufgeführten Größen werden im folgenden Text

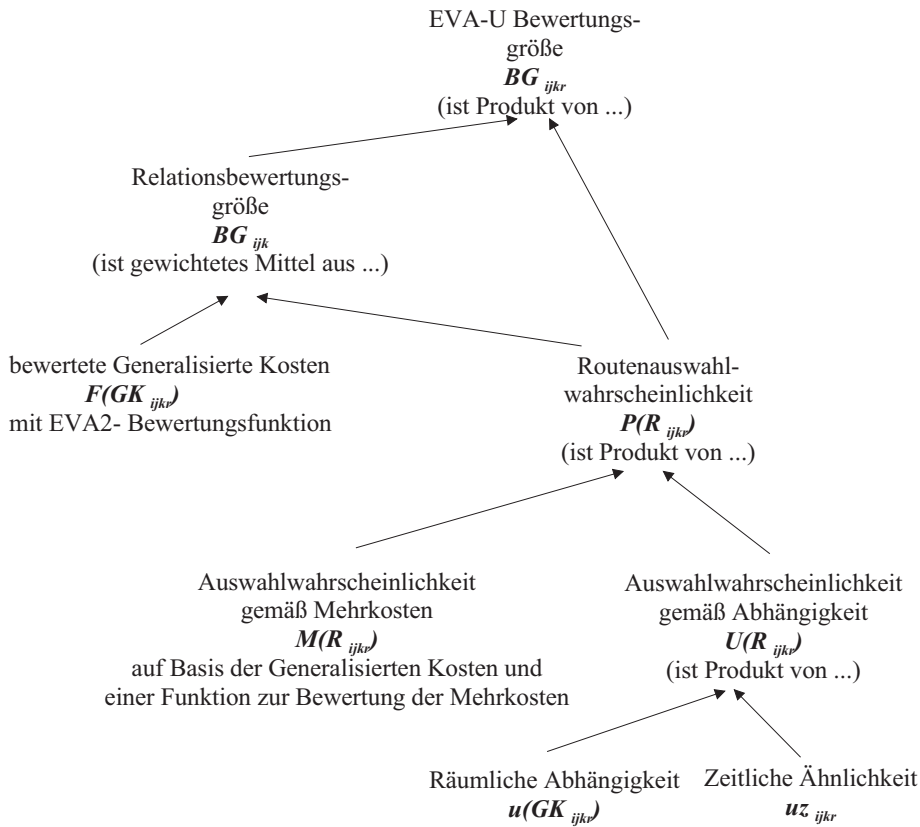


Abbildung 5.3: Struktur der EVA-U-Bewertungsgröße

weiter erläutert. Für die folgenden Ausführungen gilt, dass die Parameter der Funktionen immer auch von der homogenen Klasse (QZG) g abhängig sein können. Lediglich aus Gründen der Lesbarkeit wurde auf die Angabe des Index g verzichtet.

5.3.1 Bewertung der Relation

Die Bewertung der Relation erfolgt auf der Basis des (routenstrom-)gewichteten Mittels der Generalisierten Kosten der Routen, d.h.

$$BG_{ijk} = f\left(\sum_{r'} P(R_{ijk r'}) \cdot F(GK_{ijk r'})\right) ,$$

wobei dieser Ansatz um wichtige verkehrsbezirks- und relationsbezogene Kenngrößen der Relation ijk bzw. des Heimatstandortes e ergänzt wird

$$BG_{ijk} = PVMV_{ek} \cdot F_k(VMA_{ijk}) \cdot \sum_{r'} P(R_{ijk r'}) \cdot F_k(GK_{ijk r'}) \quad . \quad (5.6)$$

Dabei bedeuten:

$F()$	nichtlinear fallende Bewertungsfunktion, z.B. die EVA2-Funktion nach Gl. 5.11,
GK	Generalisierte Kosten einer Route r ,
$P(R_{ijk r})$	Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route r der Relation ijk ,
$PVMV_{ek}$	Verkehrsmittelverfügbarkeit des Heimatstandortes e für Verkehrsmittel k ,
VMA	Verkehrsmittelangebot (für ÖV: mittlere ÖV-Zugfolgezeit).

Das hier vorgestellte Simultanmodell verwendet für die Bewertung der Routenalternativen die Generalisierten Kosten mit nichtlinearen Gewichtsfunktionen, wie sie im Abschnitt 2.6.2 Gl. 2.43 vorgestellt wurden. Die Auswahlwahrscheinlichkeit und die Generalisierten Kosten einer Route werden im folgenden Abschnitt genauer beschrieben.

Einfluss der Routenanzahl Die Frage, ob allein die Zahl der verfügbaren Routen ein Ziel attraktiver erscheinen lässt, hängt von dem konkreten Fall ab und kann nicht eindeutig entschieden werden. Es gibt sowohl Argumente für als auch gegen diese These. So ist beispielsweise im ÖV die Zahl der zur Verfügung stehenden Routen (Bedienungshäufigkeit) eine wesentliche Angebotskenngröße. In einem anderen Fall, wenn beispielsweise in einem dichten, aber schwach ausgelasteten Netz eine Route zu den bereits zahlreich existierenden Alternativrouten hinzukommt, ist der Einfluss dieser neuen Route auf die Nachfrage zu vernachlässigen.

Die Struktur des Nachfragemodells EVA-U ist grundsätzlich so angelegt, dass die Routenzahl ohne Einfluss auf die Relationswahrscheinlichkeit ist. Trotzdem kann in besonderen Fällen eine Reaktion des Modells auf zusätzliche Routen nicht verhindert werden. So wird beispielsweise eine zusätzliche Route im MIV-Netz, wenn es in der Analyse einen echten Kapazitätsengpass gibt, zum Absinken der Reisezeiten auf den alternativen Routen führen. Über die Rückkopplung reagiert das Modell auf die durch die Kapazitätserweiterung hervorgerufene Routenreisezeitänderung.

Wenn jedoch aus planerischen Sicht die Berücksichtigung der Routenzahl z.B. für den ÖV erwünscht ist, dann ist das mit Hilfe der bewerteten Aufwandsgröße $F(VMA)$ möglich. Die Parameter der Bewertungsfunktion ermöglichen die Kalibrierung. Durch einen Vergleich der Ergebnisse der Planfälle können die Effekte zusätzlicher Routen dargestellt werden.

5.3.2 Auswahlwahrscheinlichkeit von Routen

Die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route r der Relation ijk ist

$$P(R_{ijk}) = \frac{BG(R_{ijk})}{\sum_{r'} BG(R_{ijk r'})} , \quad \sum_{r'} P(R_{ijk r'}) = 1 \quad (5.7)$$

mit einer Routenbewertungsgröße, die wie folgt definiert wird:

$$BG(R_{ijk}) = M(R_{ijk}) \cdot U(R_{ijk}) \quad (5.8)$$

Dabei bedeuten:

$M(R)$	Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route gemäß den Mehrkosten der Route (Gl. 5.15),
$U(R)$	Auswahlwahrscheinlichkeit einer Route gemäß der Abhängigkeit der Route (Gl. 5.16).

Die Simulationen in Netzmaschen (siehe 4.3.2, speziell den Abschnitt abhängige Routen) haben gezeigt, dass für Routen, die nur kurze Absprünge von anderen Routen darstellen, keine nennenswerten Auswahlwahrscheinlichkeiten zu erwarten sind. Sie werden aus dem Routenset entfernt, denn sie erhöhen unnötig die Rechenzeit. Prüfgrößen für sinnvolle/unsinnige Routen werden im Abschnitt 5.7 dargestellt.

Die Generalisierten Kosten einer Route

Für die Routen der verschiedenen Verkehrsarten gibt es zahlreiche Aufwandskenngrößen. Diese Größen wurden im Verfahren EVA-Simultanmodell plus Umlegungen in verschiedenen Teilmodellen und in unterschiedlichen Kombinationen berücksichtigt, so z.B. als EVA-Bewertungsgröße im EVA-Simultanmodell oder als Generalisierte Kosten im Umlegungsmodell. Im Modell EVA-U werden die Aufwände zu Generalisierten Kosten zusammengefasst und sind für alle Modellstufen gleichermaßen gültig.

Die *Zeitkomponenten des Aufwandes* (Fahr-, Parksuch-³, Zugangs-, Warte-, Geh- und Abgangszeit) sind aus der Routensuche bekannt. Für die Startwartezeit SWZ kann bei geringem zeitlichen Abstand zur vorherigen Route die halbe Zugfolgezeit ZFZ als Wartezeit angenommen werden. Wenn sich die Zugfolgezeiten stark unterscheiden, bietet sich die in VISUM verwendete Funktion zur Bestimmung der Startwartezeit

$$SWZ = \alpha \cdot ZFZ^\beta$$

an (α , β sind Parameter, z.B. $\alpha = 1,5$ und $\beta = 0,5$). Die MIV-Reisezeiten werden mit einer geeigneten Kapazitätsbeschränkungsfunktion beschrieben.

Für die Modellierung der ÖV-Reisezeit gibt es verschiedene Möglichkeiten. Im klassischen Anwendungsfall sind die Reisezeiten im ÖV unabhängig von den Verkehrsstärken. Falls die Wechselwirkung zwischen dem ÖV und dem MIV auf einer Strecke bzw. an einem Knoten modelliert werden soll, ist eine Funktion zu nutzen, um die tatsächliche ÖV-Fahrzeit zwischen Haltestellen verkehrsstärkenabhängig anzupassen. Die *Kosten* einer Route entstehen typischerweise entweder (1.) auf einer Teilroute bzw. Gesamtroute (z.B. Streckenmaut bzw. Fahrpreis) oder/und (2.) auf einem Parkstand oder/und (3.) bei Einfahrt in ein Gebiet (z.B. Gebühren für die Einfahrt in ein Stadtzentrum). Die *Häufigkeiten* (Umsteigehäufigkeit, Routenhäufigkeit) einer Relation ijk sind ebenfalls aus der Routensuche bekannt.

Der *Besetzungsgrad* ist ein Term, mit dessen Hilfe Überlastungserscheinungen im ÖV abgebildet werden können. Der Besetzungsgrad einer Linienfahrt zwischen zwei Haltestellen ergibt sich aus

$$BSL = \frac{\text{Anzahl beförderter Personen}}{\text{Anzahl vorhandener Plätze}} \quad .$$

³Die Parksuchzeit kann mit Hilfe eines Modells des ruhenden Verkehrs abgebildet werden (siehe Abschnitt 5.6).

Der Wert $BSL = 1$ soll dabei jenen extremen Zustand ausdrücken, bei dem ein Zustieg weiterer Fahrgäste unangenehm ist. Der Besetzungsgrad einer Linienfahrt variiert auf den Kanten zwischen den Haltestellen und muss zu einer Gesamtbewertung zusammengefasst werden. Dazu werden die Besetzungsgrade der einzelnen Strecken bewertet⁴ und die Funktionswerte der Besetzungsgrade der einzelnen Streckenabschnitte multipliziert. Damit führt die Überlastung einer Strecke a zur Abwertung der gesamten Route. Es gilt

$$BS_{ijk_r} = \prod_{a' \in S_r} F(BSL_{a'}) \quad ,$$

wobei S_r die Menge der zur Route r gehörenden Kanten repräsentiert. Falls die Möglichkeit der Platzreservierung besteht, ist die Zahl der vorhandenen Plätze und die Zahl der beförderten Personen um den entsprechenden Betrag zu verringern.

Die Basis der Routenbewertung im Modell EVA-U bilden die Generalisierten Kosten GK , sie werden nach folgendem Ansatz gebildet:

$$\begin{aligned} GK_{ijk_r} = & \gamma_k(KOST_{ijk_r}) \cdot KOST_{ijk_r} \\ & + \gamma_k(UGZ_{ijk_r}) \cdot UGZ_{ijk_r} \cdot z_{UGZ} + \gamma_k(UH_{ijk_r}) \cdot UH_{ijk_r} \cdot z_{UH} \\ & + \gamma_k(SWZ_{ijk_r}) \cdot SWZ_{ijk_r} \cdot z_{SWZ} \\ & + \gamma_k(UWZ_{ijk_r}) \cdot UWZ_{ijk_r} \cdot z_{UWZ} \\ & + \gamma_k(ZU_{ijk_r}) \cdot ZU_{ijk_r} \cdot z_{ZU} + \gamma_k(AB_{ijk_r}) \cdot AB_{ijk_r} \cdot z_{AB} \\ & + \gamma_k(BS_{ijk_r}) \cdot BS_{ijk_r} \cdot z_{BS} + \gamma_k(FZ_{ijk_r}) \cdot FZ_{ijk_r} \cdot z_{FZ} \\ & + \gamma_k(PZ_{ijk_r}) \cdot PZ_{ijk_r} \cdot z_{PZ} + \gamma_k(PK_{ijk_r}) \cdot PK_{ijk_r} \quad . \end{aligned} \quad (5.9)$$

Dabei bedeuten:

AB	Abgangszeit,
BS	Besetzungsgrad,
$\gamma_k(w)$	nichtlinear wachsende Funktion des Aufwandes w für das Verkehrsmittel k ,
FZ	Fahrzeit,
$KOST$	Kosten der Ortsveränderung,
PZ	Parksuchzeit,
PK	Parkkosten am Ziel j der Ortsveränderung,

⁴Die Bewertung des Besetzungsgrades einer Linienfahrt ist beispielsweise mit einer EVA-Funktion möglich, so z.B. Gl. 2.34 mit den Parametern $E = 10$, $F = 32$, $G = 0,309$. Für $BSL \leq 0,75$ ist $F(BGL) = 1$, danach fällt die Kurve steil ab.

<i>SWZ</i>	Startwartezeit,
<i>UGZ</i>	Summe der Umsteigegehzeiten,
<i>UH</i>	Umsteigehäufigkeit,
<i>UWZ</i>	Summe der Umsteigewartezeiten,
<i>z</i>	Zeitbewertungsfaktor für die Umrechnung von (zeitlichen) Aufwänden in monetäre Größen,
<i>ZU</i>	Zugangszeit.

Unerhebliche bzw. nicht zutreffende Kenngrößen für eine Verkehrsart werden eliminiert. Für die nichtlinear wachsende Funktion eignet sich die EVA2-Transformationsfunktion mit direktem Zusammenhang (identisch mit Gleichung 2.41)

$$\gamma(w) = \alpha + \beta \cdot 1/F^{\text{EVA2}}(w) \quad (5.10)$$

(α , β Parameter), wobei die Funktion $F^{\text{EVA2}}(w)$ die EVA2-Funktion (siehe Abschnitt 2.6.1) mit dem Aufwand w und den Parametern E , WP und G darstellt:

$$F^{\text{EVA2}}(w) = \left[1 + \left(\frac{G-1}{E+1} \right) \cdot \left(\frac{w}{WP} \right)^G \right]^{-\frac{E}{G}}. \quad (5.11)$$

Die Parameter der Funktion $\gamma_k(w)$ können sich zwischen den Quelle-Ziel-Gruppen g und den Verkehrsmitteln k unterscheiden. Die Unterscheidung kann dann wichtig sein, wenn Unterschiede in den Präferenzen der homogenen Klassen abgebildet werden sollen.

Bewertung der Mehrkosten

Im Abschnitt 2.4 wurden verschiedene Routenwahlmodelle beschrieben. Aus den oben aufgeführten Hypothesen über das Wahlverhalten lässt sich ein Anforderungsprofil für die Bewertungsgröße eines Routenwahlmodells ableiten. Die Bewertungsfunktion führt zu einer Auswahlwahrscheinlichkeit, die

- von der absoluten Größe des Aufwandes (hier: Generalisierte Kosten) und
- vom Aufwandsunterschied zwischen Routen abhängt und
- berücksichtigt, dass geringe Aufwandsunterschiede durch den Nutzer nicht wahrgenommen werden.

Ein mögliches Routenwahlmodell, welches diese Anforderungen erfüllt, wurde bereits im Abschnitt 2.4.1 vorgestellt (Logit-Modell mit Modifikation 2, Gl. 2.33) und in Abschnitt 2.6.1 analysiert. Hier wird eine neue Funktion mit

identischen Eigenschaften, aber geringerer Parameterzahl vorgeschlagen. Die Basis dieser neuen Bewertungsfunktion bildet die Potenzfunktion.

$$F(w_{ijkr}) = w_{ijkr}^{-\alpha}$$

Für den Parameter α wird jedoch keine Konstante, sondern eine Funktion angenommen. Die Funktion ist nichtlinear wachsend, abhängig von den Mehrkosten q und es soll $\alpha(1) = 0$ und $d\alpha/dq(1) = 0$ gelten. Die folgende Funktion

$$\alpha_{ijkr} = \alpha(q_{ijkr}) = a \cdot q_{ijkr}^b - a \cdot b \cdot q_{ijkr} + a \cdot b - a \quad (5.12)$$

mit den Parametern a und b ($a > 0$, $b > 1$) erfüllt diese Anforderungen. Für die praktische Anwendung müssen die Parameter der Funktion auf die Skalenwerte der Generalisierten Kosten abgestimmt sein. Der Faktor Mehrkosten q ($q \geq 1$) einer Route ist das Verhältnis zwischen den Generalisierten Kosten der betrachteten Route und dem Minimum der Generalisierten Kosten.

$$q_{ijkr} = \frac{GK_{ijkr}}{GK_{ijk}^{\min}} \quad \text{mit} \quad GK_{ijk}^{\min} = \min_{r'}(GK_{ijkr'}) \quad (5.13)$$

mit den Generalisierten Kosten GK nach Gl. 5.9. Die Bewertung für eine Route r in Abhängigkeit des Faktors Mehrkosten ist

$$m(GK_{ijkr}) = (GK_{ijk}^{\min})^{-\alpha_{ijkr}} \quad (5.14)$$

Die Auswahlwahrscheinlichkeit auf Basis der Generalisierten Kosten einer Route ist

$$M(R_{ijkr}) = \frac{m(GK_{ijkr})}{\sum_{r'} m(GK_{ijkr'})} \quad (5.15)$$

Die Auswahlwahrscheinlichkeiten, die sich für zwei unabhängige Routen in unterschiedlichen Aufwandsklassen ergeben, sind in Abbildung 5.4 dargestellt.

5.3.3 Bestimmung und Bewertung von Abhängigkeit

Routen mit gemeinsamen Teilrouten (d.h. abhängige Routen) werden von den Verkehrsteilnehmern nicht als vollwertige Alternativen wahrgenommen. Die Auswahlwahrscheinlichkeit abhängiger Routen ist geringer als die, die sich bei ausschließlicher Berücksichtigung des Aufwandes ergäbe. Das zeigen sowohl grundsätzliche Überlegungen zum Wertebereich der Auswahlwahrscheinlichkeit (siehe Abschnitt 2.4.3) als auch die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation.

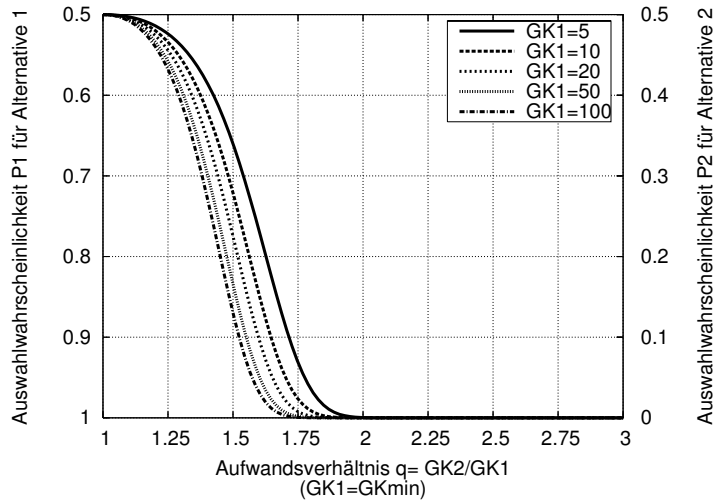


Abbildung 5.4: Auswahlwahrscheinlichkeiten für zwei parallele Routen in Abhängigkeit von den Mehrkosten (Gl. 5.15), Annahmen: $a = 0,02$, $b = 8$.

In der Literatur werden verschiedene Kenngrößen beschrieben, um die Abhängigkeit von Routen zu quantifizieren. RAMMING [38] S. 90 gibt an, welche Anforderungen aus theoretischer Sicht an eine Größe zur Bewertung von Abhängigkeit gestellt werden müssen: (1.) die Art der Netzkodierung (z.B. der Split einer Strecke in zwei Strecken) darf das Ergebniss nicht beeinflussen, (2.) unabhängige Routen sollen den Wert Eins erhalten, (3.) abhängige Routen sollen einen Wert kleiner als Eins annehmen und (4.) die Bewertung ist unabhängig von der Zahl der Alternativen. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Abhängigkeitskenngröße Teil eines komplexen Nachfragemodells ist, wird ergänzend hinzugefügt: (5.) die Abhängigkeitskenngröße muss auf die Netze aller Verkehrsarten anwendbar sein, (6.) die Routenanzahl darf die Bewertung der Relation ijk nicht beeinflussen und (7.) die Abhängigkeitskenngröße bewertet ausschließlich die Abhängigkeit und nicht gleichzeitig den absoluten Aufwand von Routen (Bewertung der Mehrkosten erfolgt im Modell EVA-U gesondert; siehe oben).

Die Kenngröße zur Beschreibung von Abhängigkeit $U(R_{ijk_r})$ setzt sich aus einem Term zur Beschreibung von räumlicher Abhängigkeit $u(GK_{ijk_r})$ und

einem Term für die zeitliche Ähnlichkeit uz_{ijk_r} zusammen:

$$U(R_{ijk_r}) = \frac{u(GK_{ijk_r}) \cdot uz_{ijk_r}}{\sum_{r'} u(GK_{ijk_{r'}}) \cdot uz_{ijk_{r'}}} . \quad (5.16)$$

Räumliche Abhängigkeit

Eine Abhängigkeit von Routen liegt vor, wenn mindestens eine Strecke zu mehreren Routen gehört. Diese Definition lässt sich auch auf fahrplanfeine ÖV-Netze anwenden, indem die Routen auf gemeinsam genutzte Linienfahrten geprüft werden. In diesem Sinne sind auch P+R-Routen immer dann abhängig, wenn mindestens eine MIV-Strecke oder eine ÖV-Linienfahrt gemeinsam genutzt wird.

Im Abschnitt 2.4.3 wurden Ansätze vorgestellt, die Kennzahlen für die Abhängigkeit einer Route liefern. RAMMING [38] entwickelte ein allgemeines Path-Size-Logit-Modell auf der Basis eines multinomialen Logit-Modells. Die Path-Size-Größe ist die Basis für die im Nachfragemodell EVA-U verwendete Abhängigkeitskenngröße. Nach RAMMING ist die Path-Size-Größe PS einer Route r (vgl. Gl. 2.16)

$$PS_r = \sum_{a' \in S_r} \left(\frac{l_{a'}}{L_r} \cdot \frac{1}{N_{a'}^*} \right) = \sum_{a' \in S_r} \left(\frac{l_{a'}}{L_r} \cdot \frac{1}{\sum_{r'} \delta_{a'r'} \frac{G(L_r; \gamma)}{G(L_{r'}; \gamma)}} \right) .$$

Für das Modell EVA-U wird für $G()$ die Funktion

$$G() = M(R_{ijk_r})$$

mit der Größe $M(R_{ijk_r})$ nach Gl. 5.15 angenommen. Somit ist die Bewertung der Route innerhalb des Teilmodells Abhängigkeit identisch mit der kostenbezogenen Bewertung von Routen. Die Funktion u ist eine Bewertungsgröße für die Abhängigkeit von Routen mit

$$u(GK_{ijk_r}) = \sum_{a' \in S_r} \left(\frac{GK_{a'}}{GK_{ijk_r}} \cdot \frac{M(R_{ijk_r})}{\sum_{r'} \delta_{a'r'} \cdot M(R_{ijk_{r'}})} \right) , \quad (5.17)$$

wobei S_r die Menge der zur Route r gehörenden Strecken repräsentiert. Der Wert δ_{ar} ist der Wert der Strecke-Route-Inzidenzmatrix ($\delta_{ar} = 1$: Strecke a ist Teil der Route r , $\delta = 0$: sonst).

Die Verschiebung des Ausdrucks $1/(\sum \delta \cdot \frac{G()}{G()})$ vom Nenner in der oben genannten allgemeinen Gleichung von RAMMING in den Zähler von Gl. 5.17 beruht auf einer Betrachtung der Skalen. Der Wert $1/N_a$ in der klassischen Variante des PS-Faktors (Gl. 2.15) nimmt Werte ≤ 1 an. Der Ausdruck

$$1/(\sum_{r'} \frac{M(R_{ijkr})}{\delta_{ar'} \cdot M(R_{ijkrr'})})$$

hingegen erreicht Werte ≥ 1 , was zu einer Aufwertung der Strecken führt und der ursprünglichen Idee widerspricht. Deshalb werden Zähler und Nenner vertauscht.

Die Generalisierten Kosten der Route müssen auf die zur Route gehörenden Strecken nachträglich aufgeteilt werden, denn im Allgemeinen ist aufgrund der nichtlinearen Gewichtsfunktion

$$\sum_{a' \in S_r} GK_{a'} \neq GK_r \quad .$$

Deshalb werden die Routenkosten GK_r nach Gl. 5.9 entsprechend des streckenbezogenen Anteils der betrachteten Kenngröße umgelegt, beispielsweise

$$\begin{aligned} GK_{a(r)} &= \frac{FZ_a}{FZ_r} \cdot F(FZ_r) \cdot FZ_r + \frac{ZU_a}{ZU_r} \cdot F(ZU_r) \cdot ZU_r + \dots \quad (5.18) \\ &= FZ_a \cdot F(FZ_r) + ZU_a \cdot F(ZU_r) + \dots \quad . \end{aligned}$$

Falls die Generalisierten Kosten der Strecke nur anhand einer Kenngröße (z.B. der Fahrzeit) umgelegt werden sollen, gilt

$$GK_{a(r)} = \frac{FZ_a}{FZ_r} \cdot GK_r \quad .$$

Die Generalisierten Kosten von Kenngrößen, die sich keiner Strecke zuordnen lassen (z.B. die Umsteigehäufigkeit), werden über Ersatzgrößen umgelegt (z.B. Umsteigewartezeit).

Die Entscheidung zu Gunsten eines Path-Size-Terms beruht auf folgenden Überlegungen:

- *Eignung*: sowohl VRTIC [55] als auch RAMMING [38] nehmen Vergleiche der bekannten Überlappungsfaktoren anhand praktischer Beispiele vor. VRTIC identifiziert für den ÖV das C-Logit, RAMMING für den MIV das Path-Size-Logit-Modell als die jeweils bessere Variante.

- *Modellstruktur und Rechenzeit:* RAMMING beschreibt die Laufzeiten der verschiedenen Modelle und kommt zu dem Schluss, dass das C-Logit- und das Path-Size-Logit-Modell im Gegensatz z.B. zum Cross-Nested-Logit-Modell die geringeren Rechenzeiten aufweisen.
- *Grundsätzliche Überlegungen (1):* Im PS-Faktor können die Auswahlwahrscheinlichkeiten von Routen berücksichtigt werden.
- *Grundsätzliche Überlegungen (2):* Im Nenner des CF-Terms des C-Logit-Modells werden immer die Kosten *zweier* Routen gegenübergestellt, so dass die Mehrkosten einer Route bereits in diesem Teilmodell wirken. In dem Modell EVA-U wird der Unterschied zwischen Routen innerhalb eines Routensets einer Relation jedoch ausschließlich durch den Term $M(R_{ijkr})$ (siehe Gl. 5.17) abgebildet.

Die letzten beiden Punkte sind entscheidend dafür, dass einer Path-Size-Größe der Vorzug gegeben wird. Das Modell ist jedoch prinzipiell auch mit dem CF-Term des C-Logit-Modells denkbar.

Im klassischen Fall von vier Verkehrsarten gibt es in jeder Relation ij vier Routensets, deren Routen sich nicht überdecken. Falls eine fünfte Verkehrsart P+R hinzukommt, gibt es Überdeckungen zum MIV und ÖV. In diesem Fall besteht das zu betrachtende Routenset aus den Routen von MIV, ÖV und P+R.

Im Abschnitt 2.4 wurde dargelegt, dass innerhalb von verkehrsstärkenabhängigen Umlegungen überlappende Routen berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung der Abhängigkeit auch in der EVA-U-Bewertungsgröße ist in diesem Sinne eine Dopplung. Den Term $U(GK)$ in der MIV-Umlegung zu benutzen, ist jedoch trotzdem sinnvoll. Erstens führt sein Einsatz zu einer zusätzlichen Dämpfung, da gemeinsame Teilrouten weniger stark belastet werden. Zweitens besteht immer die Möglichkeit, dass auch eine verkehrsstärkenabhängige MIV-Umlegung im Falle einer geringen Nachfrage zu einer Umlegung ohne Verkehrsstärkenabhängigkeit tendiert, weil die Routenströme und damit die Verkehrsstärke so gering sind, dass die Reisezeit nicht ansteigt. In diesem Falle ist der Term $U(GK)$ die einzige Möglichkeit, überlappende Routen zu berücksichtigen.

Zeitliche Ähnlichkeit im ÖV

FRIEDRICH et al. [23] stellen ein Maß für die Eigenständigkeit von ÖV-Routen vor (siehe Gl. 2.20), worin auch eine Bewertung der Ähnlichkeit von Abfahrts- und Ankunftszeiten enthalten ist. Hintergrund der Betrachtung ist der Ge-

danke, dass – trotz räumlicher Unabhängigkeit von Routen – die Nachfrage zweier zeitlich nahe aufeinander folgender Abfahrten geringer ist. Die zeitliche Ähnlichkeit von ÖV-Routen soll ebenfalls abgebildet werden, dazu wird der genannte Ansatz genutzt.

Nach Gl. 2.21 ist die mittlere Differenz $x_r(r')$ der Ankünfte und Abfahrten von zwei Routen

$$x_r(r') = \frac{(|DEP_r - DEP_{r'}| + |ARR_r - ARR_{r'}|)}{2} ,$$

wobei die Differenz mit der linear fallenden Funktion

$$F(x_r(r')) = 1 - \frac{x_r(r')}{s_x}$$

bewertet wird mit s_x als maximaler zeitlicher Abstand, bei dem eine Wirkung von einer Route auf eine andere Route möglich ist. Die Bewertungsgröße „zeitliche Ähnlichkeit“ uz_{ijk_r} einer Route ist

$$uz_{ijk_r} = \sum_{r'} F(x_r(r')) \quad .$$

Berücksichtigung der ÖV-Ganglinie

Die oben beschriebene Routenauswahlwahrscheinlichkeit (Gl. 5.7) und die Relationsbewertungsgröße (Gl. 5.8) stellen lediglich die Basisvariante des EVA-U-Modells dar. Speziell für die Verkehrsart ÖV ist es sinnvoll, die Tagesganglinie zu berücksichtigen. Durch die reale stündliche Schwankung der Verkehrsnachfrage erhalten die Routen a priori nur einen bestimmten Anteil des Aufkommens. Durch den folgenden Ansatz (Gl. 5.19 und 5.20) wird die Zuordnung von Verkehrsaufkommen und Routen berücksichtigt. Im Gegenzug werden die Aufwände und die Routenströme entsprechend der relativen Häufigkeit von Ortsveränderungen in der Zeitscheibe s gewichtet.

Die Auswahlwahrscheinlichkeit einer zur Zeitscheibe s gehörenden Route⁵ r ergibt sich analog zu Gl. 5.7

$$P(R_{ijkrs}) = h_{iks} \cdot \frac{\sigma_{rs} \cdot BG(R_{ijk_r})}{\sum_{r'} \sigma_{r's} \cdot BG(R_{ijk_{r'}})} \quad (5.19)$$

⁵Im Kapitel 3 wurde vereinbart, dass auch die fahrplanfeinen ÖV-Verbindungen als Routen bezeichnet werden. Gemäß dieser Festlegung haben die ÖV-Routen einen Abfahrts- und Ankunftszeitpunkt und können einer Zeitscheibe eindeutig zugeordnet werden.

mit h_{iks} als relative Häufigkeit in Zeitscheibe s für den Quellbezirk i (Tagesganglinienwert) und σ_{rs} als Wert der Routen-Zeitscheiben-Inzidenzmatrix ($\sigma = 1$: Route gehört zu Zeitscheibe, $\sigma = 0$: sonst). Die Relationsbewertung ergibt sich analog zu Gl. 5.6:

$$BG_{ijk} = \sum_{s'} \left(PVMV_{eks'} \cdot F_k(VMA_{ijks'}) \cdot \left(\sum_{r'} \sigma_{r's'} \cdot P(R_{ijkr's'}) \cdot F(GK_{ijkr'}) \right) \right). \quad (5.20)$$

Die Tagesganglinie der Nachfrage ist vorzugeben und kein Ergebnis der Berechnung. Die Nachfrage einer Zeitscheibe wird auf die in dieser Zeitscheibe zur Verfügung stehenden Routen aufgeteilt, und zwar unabhängig von deren Abfahrtszeitpunkten. Maßgebend für die Routenwahl sind allein die Generalisierten Kosten und die Abhängigkeit der Routen. Ein explizites Wahlmodell für die Abfahrtszeit ist nicht Bestandteil des Modells EVA-U.

Beispiel für die Routenbewertung

Das folgende Beispiel zeigt die Auswahlwahrscheinlichkeit von Routen am Beispiel einer Netzmasche. Die Netzmasche und die zugehörigen Kenngrößen sind in Abb. 5.5 bzw. Tab. 5.1 dargestellt. Die Tabellen 5.2 bis 5.5 geben die Ergebnisse der Berechnungsschritte an.

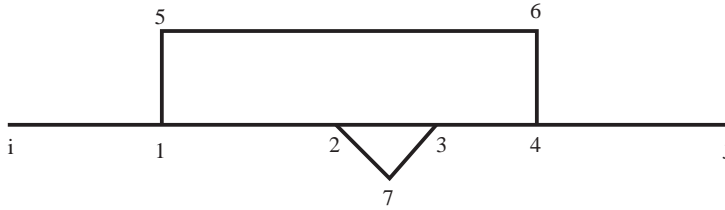


Abbildung 5.5: Netzmasche mit überlappenden Routen

Beispiel für die Relationsbewertung

Das folgende Beispiel zeigt die Bewertung einer Relation ij bei zwei Verkehrsmitteln (VM) MIV und ÖV. Für den ÖV wurde eine Tagesganglinie vorgegeben. Die Zeitscheibenummer s und die Abfahrtsfrequenzen h_{iks} sind in Spalte 0 bzw. 1 der Tabelle 5.6 angegeben. Die Auswahlwahrscheinlichkeiten unter Be-

Route r	Knotenfolge	Reisezeit $T0_r$ [min]
1	i-1-2-3-4-j	20
2	i-1-2-7-3-4-j	22
3	i-1-5-6-4-j	26

Strecke a	i1	4j	12	23	34	27	73	15	56	64
$T0_a$ [min]	2	2	8	1	7	1,5	1,5	4	14	4

Tabelle 5.1: Beispiel 1 – Daten der Netzmasche

Route r	T_r	$\gamma(T_r)$	GK_r	q_r	α_r	$m(GK_r)$	$M(R_r)$
1	20	1,02	20	1,00	0,00	1,000	0,377
2	22	1,02	22	1,11	0,01	0,976	0,368
3	26	1,04	27	1,34	0,13	0,678	0,255

Tabelle 5.2: Beispiel 1 – Bewertung der Generalisierten Kosten $m(GK_r)$ nach Gl. 5.14 bzw. 5.15. Annahmen: Parameter der γ -Funktion nach Gl. 5.10 mit den Parametern $(E/WP/G/\alpha/\beta)$: 4/50/4/0/1, Zeitbewertungsfaktor $z = 1$, Parameter der α -Funktion für die Mehrkosten nach Gl. 5.12 (a/b): 0,02/8.

Strecke a	T_a	$\frac{GK_a}{GK_1}$	$\frac{GK_a}{GK_2}$	$\frac{GK_a}{GK_3}$	N_1^*	N_2^*	N_3^*
i1	2	0,100	0,091	0,077	0,397	0,370	0,233
4j	2	0,100	0,091	0,077	0,397	0,370	0,233
12	8	0,400	0,364		0,517	0,483	
23	1	0,050			1,000		
34	7	0,350	0,318		0,517	0,483	
27	1,5		0,068			1,000	
73	1,5		0,068			1,000	
15	4			0,154			1,000
56	14			0,538			1,000
64	4			0,154			1,000

Tabelle 5.3: Beispiel 1 – Berechnung der Abhängigkeit (streckenweise Betrachtung) nach Gl. 5.17; $N_r^* = \frac{m(GK_r)}{\sum_{r'} \delta_{ar'} \cdot m(GK_{r'})}$.

Route r	$u(GK_r)$	$U(R_r)$
1	0,517	0,268
2	0,533	0,276
3	0,882	0,457
Summe	1,932	1,000

Tabelle 5.4: Beispiel 1 – Berechnung der Abhängigkeit u_r bzw. U_r nach Gl. 5.17 bzw. 5.16.

Route r	$M(R_r)$	$U(R_r)$	$BG(R_r)$	$P(R_r)$
1	0,377	0,262	0,099	0,309
2	0,368	0,280	0,103	0,323
3	0,255	0,459	0,117	0,368
Summe			0,319	1,000

Tabelle 5.5: Beispiel 1 – Routenauswahlwahrscheinlichkeiten $P(R_r)$ nach Gl. 5.7.

Spalte		0	1	2	3	4	5	6
Gl. bzw. Sp.			geg	geg	5.15	geg	3x4	5.19
Rte r	Vm k	ZS s	h_{iks}	GK	$M(R)$	$U(R)$	$BG(R)$	$P(R)$
1	MIV			20	0,37	0,27	0,10	0,31
2	MIV			22	0,36	0,27	0,10	0,30
3	MIV			26	0,28	0,46	0,13	0,39
Sum	MIV					1,00		1,00
4	ÖV	1	0,25	20	0,16	0,10	0,02	0,10
5	ÖV	1	0,25	26	0,12	0,20	0,02	0,15
6	ÖV	2	0,60	20	0,16	0,10	0,02	0,14
7	ÖV	2	0,60	20	0,16	0,30	0,05	0,41
8	ÖV	2	0,60	26	0,12	0,05	0,01	0,05
9	ÖV	3	0,15	20	0,16	0,15	0,02	0,10
10	ÖV	3	0,15	26	0,12	0,10	0,01	0,05
Sum	ÖV					1,0		1,00

Tabelle 5.6: Beispiel 2 - Bewertung und Auswahlwahrscheinlichkeiten der Routen der Verkehrsmittel einer Relation. Parameter der Funktion $M(R)$: $a=0,02$, $b=8$.

achtung der Tagesganglinie werden in Tabelle 5.6 bestimmt. Die Tabelle 5.7 gibt die Relationsbewertungsgröße BG_{ijk} und die EVA-U-Bewertungsgröße BG_{ijk_r} an. Die Nummern der verwendeten Gleichungen sind in den Tabellen angegeben. Die verwendeten Parameter sind für den ÖV und den MIV identisch.

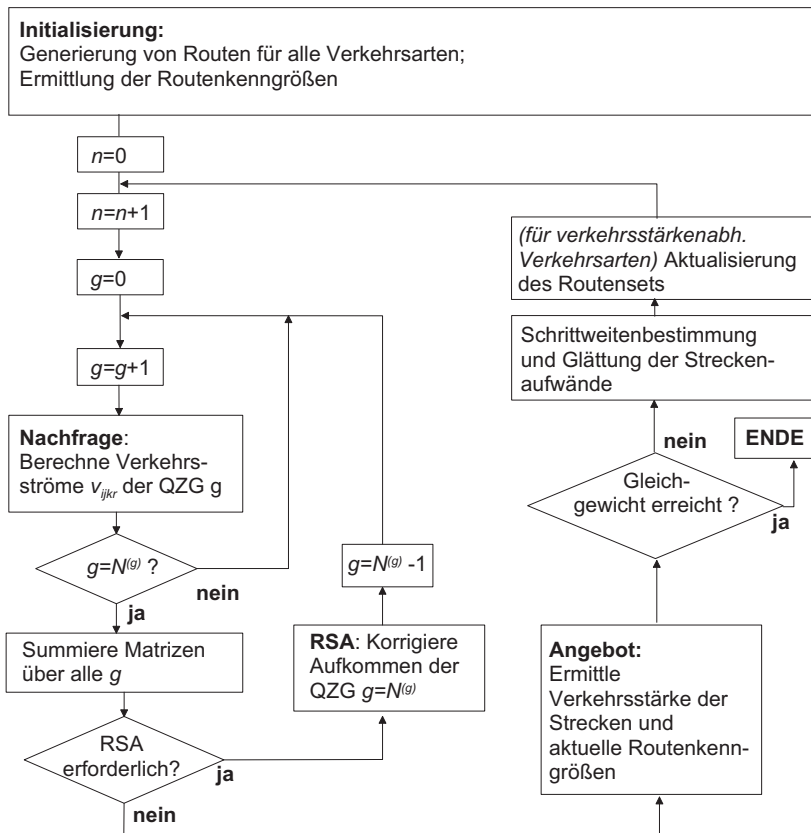
Spalte		7	8	9	10	11	12	13
Gl. bzw. Sp.			5.11	6x8	geg	5.11	5.20	5.5
Rte r	Vm k	ZS s	$F(GK)$		ZFZ	$F(ZFZ)$	BG_{ijk}	BG_{ijk_r}
1	MIV		0,66	0,20				0,16
2	MIV		0,56	0,17				0,16
3	MIV		0,37	0,14				0,20
Sum	MIV			0,52			0,52	0,52
4	ÖV	1	0,66	0,07	10	0,56		0,04
5	ÖV	1	0,37	0,06	10	0,56		0,07
6	ÖV	2	0,66	0,09	7	0,86		0,06
7	ÖV	2	0,66	0,27	7	0,86		0,18
8	ÖV	2	0,37	0,02	7	0,86		0,02
9	ÖV	3	0,66	0,07	10	0,56		0,04
10	ÖV	3	0,37	0,02	10	0,56		0,02
Sum	ÖV			0,59			0,44	0,44

Tabelle 5.7: Beispiel 2 - Relationbewertungsgrößen BG_{ijk} und BG_{ijk_r} . Parameter der EVA2-Funktion $F(GK)$ der der Generalisierten Kosten GK ($E/WP/G$): 8/22/4 und der EVA2-Funktion $F(ZFZ)$ der Zugfolgezeit ($E/WP/G$): 8/10/4.

Im Abschnitt 5.8 wird ein weiteres Beispiel vorgestellt, bei dem auch die Verteilung zwischen den Quellen und Zielen, die Aufteilung auf die Verkehrsarten und die Wirkung der Kapazitätsbeschränkungsfunktion gezeigt wird.

5.4 Ablauf, Rückkopplung und Gleichgewicht

Der Berechnungsablauf einer Nachfragemodellierung unterscheidet sich geringfügig von der bisher praktizierten Vorgehensweise. Beim Start werden für jedes Verkehrssystem die zur Verfügung stehenden Routen einschließlich der dazugehörigen Aufwände ermittelt. Die Routenaufwände sind die Eingangsgröße in das Nachfragemodell. Das Modell ermittelt die Nachfrage nach den Routen r der Relationen ijk . Diese Routenströme v_{ijk_r} werden auf die Routen umgelegt, es ergeben sich die Verkehrsstärken der Strecken. Die verkehrsstärkenabhängigen Aufwände der Routen werden aktualisiert und sind wiederum Eingangsgröße für den nächsten Schritt der Iteration. Die Abbildung 5.6 zeigt den Ablauf.



Abkürzungen: g – Index Quelle-Ziel-Gruppe, $N^{(g)}$ – größter Wert des Index vom Typ g , RSA – Randsummenausgleich, n – Iterationszähler

Abbildung 5.6: Berechnungsablauf des Simultanmodells EVA-U

Es ist sicherlich sinnvoll, die Routensuche für *verkehrsstärkenabhängige* Verkehrsarten nach den ersten Iterationen zu wiederholen, da unter Belastungsbedingungen eine gewisse Menge neuer Routen zu erwarten ist. Hier existiert weiterer Untersuchungsbedarf nach der hinsichtlich Laufzeit, Routenset und Untersuchungsgebiet optimalen Kombination von Suchparametern und Iterationsablauf.

Es wird davon ausgegangen, dass zumindest die Reisezeiten des MIV der Verkehrsstärkenabhängigkeit unterliegen. Ob auch für andere Verkehrsarten, beispielsweise für den ÖV, eine Verkehrsstärkenabhängigkeit angenommen wird, ist in Hinblick auf die Planungsaufgabe zu entscheiden. Das Modell bietet prinzipiell die Möglichkeit und der technische Aufwand ist nur unwesentlich höher.

Rückkopplung und Gleichgewicht Die Prozedur wird wiederholt, bis das System einen Gleichgewichtszustand⁶ erreicht hat (Rückkopplung). Um den Iterationsprozess zu beenden, muss das System auf das Erreichen des Gleichgewichtszustandes geprüft werden. Dazu sind die Ergebnisse eines der beiden Teilmodelle (Nachfrage oder Angebot) von zwei aufeinander folgenden Iterationsschritten zu vergleichen. Im Falle eines Gleichgewichtes stimmen die Ergebnisse hinreichend genau überein. Diese Interpretation entspricht der klassischen Definition von Gleichgewicht als einem Zustand, den ein System von sich aus ohne äußere Einflüsse nicht verlässt.

Abbruchprüfung und Dämpfung Das notwendige Gleichgewicht kann anhand verschiedener Größen geprüft werden, mögliche Prüfgrößen sind z.B. die Routenströme v_{ijk} des Nachfragemodells oder die Streckenaufwände des Netzmodells. Die Prüfung der Streckenaufwände hat zwei konkrete Vorteile. Erstens sind die Streckenaufwände die am meisten sensitiven Größen, denn wenn die Streckenaufwände stabil sind, dann sind auch die Routenaufwände und die daraus abgeleiteten Routenströme stabil. Zweitens ist erfahrungsgemäß die Zahl der Strecken mit verkehrsstärkeabhängigen Aufwänden häufig deutlich geringer als die Zahl der Relationen ijk , was sich günstig auf die Rechenzeit auswirkt.

Von allen Streckenaufwänden ändern sich im Verlauf der Iteration lediglich die verkehrsstärkenabhängigen Größen, wie z.B. die Reisezeiten des MIV oder der Besetzungsgrad des ÖV. Von allen möglichen Größen ist die MIV-Reisezeit den größten relativen Änderungen unterworfen. Deshalb ist es sinnvoll, den Gleichgewichtszustand auf Basis der MIV-Streckenreisezeiten zu prüfen (Abbruchprüfwert).

⁶In diesem Fall handelt es sich um ein stochastisches Nutzergleichgewicht.

Bezüglich der Definition eines Abbruchgrenzwertes ergeben sich drei grundsätzliche Möglichkeiten: (1.) ein konstanter absoluter Wert (z.B. 1 sec.) oder (2.) ein konstanter relativer Wert (z.B. 1% der Streckenreisezeit) oder (3.) ein variabler relativer Wert (z.B. 0,001...20% der Streckenreisezeit). Die letztgenannte Variante ist am ehesten geeignet, da sie den Einfluss der absoluten Streckenreisezeit mindert. Sie findet ebenfalls im Lernverfahren Anwendung (siehe Gl. 4.3 bzw. 4.4) und wird auch für die Bildung eines Abbruchgrenzwertes im Modell EVA-U empfohlen.

In den Iterationsschritten können sich ausgeprägte Schwankungen der rückzukoppelnden Größen zeigen. Es ist allgemein im Sinne der Konvergenz des Verfahrens und auch einer Verringerung der Rechenzeit bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes, dass nicht die Größe selbst, sondern der Mittelwert dieser Größe aus den Iterationsschritten in den nächsten Schritt eingeht. Die Einspeisung von Mittelwerten bewirkt eine **Dämpfung** der Schwingung.

Das Auffinden des Gleichgewichtszustandes kann mit einer approximativen Minimierung der Differenzen zwischen den aufeinander folgenden Lösungen des Iterationsverfahrens gleichgesetzt werden. Dabei ist es notwendig, die Schrittweiten des approximativen Lösungsverfahrens möglichst günstig zu wählen. Die Schrittweitenfestlegung hat auch das Ziel, eine stabile und möglichst schnelle Konvergenz des Verfahrens und damit auch einer Verringerung der Rechenzeit bis zum Gleichgewichtszustand zu erreichen. Für die Schrittweitenfestlegung wird die Lernformel (entspricht der Schätzzeit TS einer Strecke innerhalb des Lernverfahrens, siehe auch Gl. 4.2) empfohlen. Die Lernformel basiert auf der exponentiellen Glättung 1. Ordnung (BOSCH [14]), verwendet jedoch einen differenzierten Ansatz zur Bestimmung von Δ (Optimierung der Schrittweite des Lernfortschrittes) und ist damit auf diesen Anwendungsfall genau zugeschnitten. Diese Vorgehensweise kann auch als eine Regelungsaufgabe oder als eine Lernaufgabe interpretiert werden. Diese Verfahren ist vergleichbar mit dem MSA-Algorithmus (zum MSA siehe auch Abschnitt 4.2.1).

Im Modell EVA-U werden vom ersten Iterationsschritt an die Ströme auf mehrere Routen umgelegt. Eine deutliche Überlastung der Bestwege wie im ersten Schritt des klassischen Umlegungsverfahrens mit Bestwegroutensuchalgorithmus ist nicht oder nur in geringerem Maße zu erwarten. Dieser Sachverhalt und die Berücksichtigung der Abhängigkeit von Routen wirken ebenfalls dämpfend auf das Schwingungsverhalten des Systems.

Die Autorin DUGGE [19] beschreibt ein VBA-Makro für die automatische Rückkopplung⁷ zwischen der Nachfrage und dem Angebot (Software VISE-

⁷Dieses Verfahren ist inzwischen in VISEVA implementiert.

VA und VISUM) einschließlich der ersten praktischen Erfahrungen. Die im Makro verwendete Abbruchprüfung ist ebenfalls identisch mit der des Lernverfahrens. Das Gleichgewicht wurde – je nach Modell und Kalibrierungsstand – in der Regel nach 5...15 Rückkopplungsschritten erreicht. Berücksichtigt man für ein simultanes Modell im Mittel 20 Umlegungsschritte pro Rückkopplungsschritt, dann ergibt sich eine Spannweite von 100...300 Schritte. Für das Modell EVA-U ist eine Schrittzahl am unteren Rand dieser Spannweite zu erwarten.

5.5 Zeitscheiben

Die Berechnung der Nachfrage für eine strategische Planung mit großem Zeithorizont kann tagesfein (d.h. in einem Umfang von 24 Stunden) erfolgen. Im Hinblick auf die Modellierung der P+R-Nachfrage, von Überlastungssituationen oder des ruhenden Verkehrs ist jedoch eine zeitscheibenfeine Modellierung notwendig. Die Anwendung von Zeitscheiben ergibt sich aus folgenden Gründen:

- Überlastungen treten nur zu bestimmten Tageszeiten auf,
- P+R-Routen stellen nur zu einer bestimmten Tageszeit attraktive Alternativen dar und
- die Parkstände des ruhenden Verkehrs füllen und leeren sich im Verlauf eines Tages (siehe Abschnitt 5.6).

Die Berücksichtigung von Tageszeitscheiben im EVA-Modell wird von SCHILLER [41] erstmals ausführlich dargestellt. Die folgenden Ausführungen beruhen auf der genannten Arbeit und werden um eigene Anmerkungen z.B. zur Bestimmung quellorientierter Tagesganglinien und notwendiger Anpassungen an das Modell EVA-U beispielsweise bei der Berücksichtigung des Heimatstandortes ergänzt. Bei den folgenden Betrachtungen wird vorausgesetzt, dass die tagesfeinen Verkehrsstrommatrizen der Quelle-Ziel-Gruppen bekannt sind.

Berechnung der Quell- und Zielverkehrsaufkommen Aus der Erhebung von Wegekettens werden meistens quellorientierte Tagesganglinien abgeleitet, d.h. es werden die Abfahrtszeitpunkte an den Quellen der Ortsveränderung erfragt und in der Auswertung dargestellt. In diesem Fall ergeben sich die zeitscheibenfeinen Quellverkehrsaufkommen proportional zur relativen Ab-

fahrtshäufigkeit h_{is} im Bezirk i der Zeitscheibe s

$$Q_{is} = Q_i \cdot h_{is} \quad .$$

Das Zielverkehrsaufkommen der Zeitscheibe ergibt sich durch die Summation der zeitscheibenfeinen Ströme

$$Z_{js} = \sum_{i'} v_{i'j} \cdot h_{i's} \quad .$$

Transformation zielorientierter Ganglinien In bestimmten Fällen prägt jedoch die Tagesganglinie des Zielbezirkes den tageszeitlichen Verlauf des Verkehrsgeschehens, beispielsweise beim Schichtwechsel eines Großbetriebes. Da es für die Modellierung aber trotzdem sinnvoll ist, mit quellorientierten Ganglinien zu arbeiten⁸, ist eine Transformation von zielorientierten in quellorientierte Ganglinien notwendig.

Voraussetzung für die Transformation sind neben den tages- und Quelle-Ziel-Gruppen-feinen Matrizen auch die Verteilung der Ankünfte in den Verkehrsbezirken (zielorientierte Tagesganglinien). Diese Tagesganglinien müssen erhoben oder abgeschätzt werden.

Der Tag wird in Zeitscheiben $N^{(s)}$ zerlegt. Für die Dauer einer Zeitscheibe D_s wird das 90%-Perzentil der Reisezeit vorgeschlagen, d.h. dass die Zeitscheibe einen Zeitraum, in welchem 90% aller Ortsveränderungen enden, umfasst. Die Ortsveränderungen können zu jeder Minute eines Tages $\hat{s}, \hat{s} = 1 \dots 1440$ beginnen und enden.

Die relative Häufigkeit des Fahrtendes am Ziel j in der Zeitscheibe s sei h_{js} . Das zeitscheibenfeine Verkehrsaufkommen des Zielbezirkes j in der Zeitscheibe s ist

$$Z_{js} = Z_j \cdot h_{js} \quad ,$$

bzw. auf Basis der Ströme

$$Z_{js} = \sum_{i'} v_{i'js} = \sum_{i'} v_{i'j} \cdot h_{js} \quad .$$

Differenziert man weiter nach den Ankunftsminuten \hat{s} innerhalb der Zeitscheibe, so ist

$$v_{ij\hat{s}} = v_{ij} \cdot \frac{h_{js}}{D_s} \quad , \quad \hat{s} \in s \quad ,$$

⁸Die Arbeit mit quellorientierten Ganglinien ist sinnvoll, weil beispielsweise die dynamische Umlegung als ein mögliches Angebotsmodell ebenso mit quellorientierten Abfahrtszeiten arbeitet.

wenn innerhalb der Zeitscheibe eine Gleichverteilung der Ankünfte bzw. Abfahrten unterstellt wird. Auf Basis der Stromankunft $AN_{ij\hat{s}}$ zum Zeitpunkt \hat{s} kann die Abfahrt $AB_{ij\hat{s}}$ berechnet werden, denn ein Strom beginnt zu einem um die Differenz der Reisezeit TR_{ij} versetzten Zeitpunkt im Quellbezirk i

$$AB_{ij\hat{s}} = AN_{ij\hat{s}} - TR_{ij\hat{s}} \quad .$$

Durch das Zusammenfassen ergibt sich das zeitscheibenfeine Quellverkehrsaufkommen Q_{is}

$$Q_{is} = \sum_{j', \hat{s}': \{AB_{ij'\hat{s}'} \in s\}} v_{ij'\hat{s}'} \quad .$$

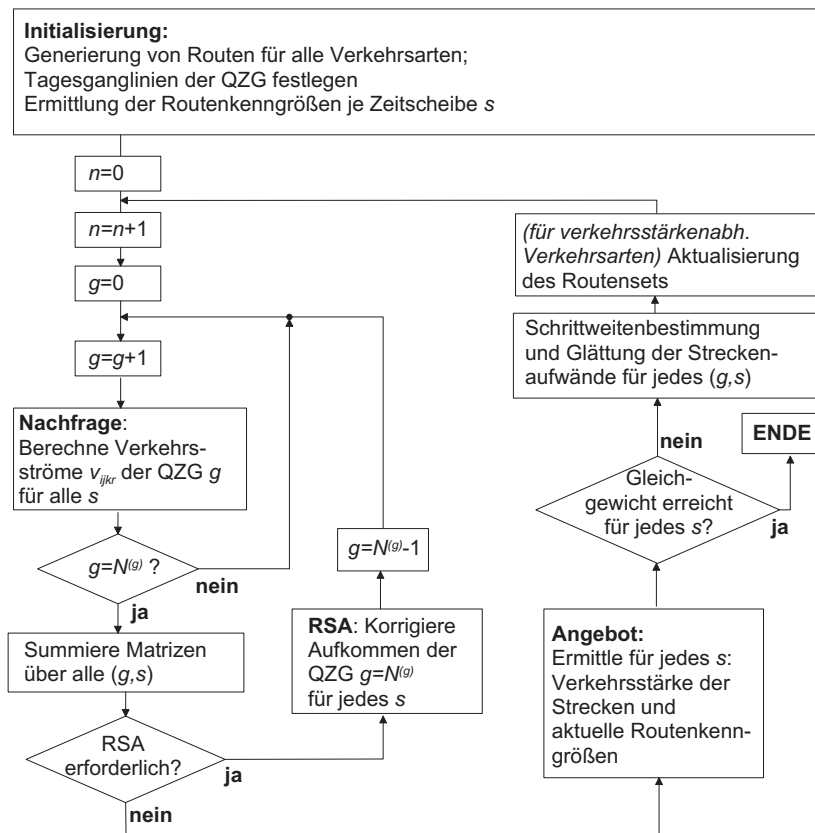
Die relative Abfahrtsfrequenz ist $h_{is} = Q_{is} / \sum_{s'} Q_{is'}$. Es ist möglich, dass auf diese Weise Ströme in eine frühere Zeitscheibe verschoben werden. Dass die Ortsveränderungen auch über die Zeitscheibengrenzen hinweg ausgeführt werden, ist jedoch ein natürliches Phänomen. Für die Modellierung ist lediglich wichtig, dass diese Ströme auch über die Zeitscheibengrenzen hinweg umgelegt werden. Sinngemäß gilt dies auch für Ströme der ersten Zeitscheibe, die in den vorherigen Tag hinein verschoben werden. Diese Ströme werden der letzten Scheibe des Tages zugeordnet.

Ablauf Die Berücksichtigung von Zeitscheiben erzwingt gegenüber der tagesfeinen Betrachtung kleinere Anpassungen im Berechnungsablauf, die aber die grundsätzliche Vorgehensweise nicht verändern. Die Abbildung 5.7 zeigt den Ablauf des Simultanmodells mit Berücksichtigung von Zeitscheiben.

Die Berechnung der zeitscheibenfeinen Quell- und Zielverkehrsaufkommen ist zu wiederholen, falls sich während der Berechnung wesentliche Änderungen in den Quell- oder Zielverkehrsaufkommen oder den zeitscheibenfeinen Reisezeiten ergeben. Die größte Schwierigkeit in der Anwendung dieses Verfahrens liegt sicherlich in der Beschaffung von Quelle-Ziel-Gruppen- und bezirksfeinen Ganglinien.

Randsummenausgleich In Abschnitt 2.1 wurde der Randsummenausgleich für das Kennwertmodell der Verkehrserzeugung beschrieben. Als Voraussetzung für die Durchführung eines Randsummenausgleichs in der QZG SS wurde dort angegeben, dass

- ein räumlich geschlossenes Untersuchungsgebiet vorliegt,
- das Gesamtverkehrsaufkommen V der QZG SS ausreichend groß ist und



Abkürzungen: g – Index Quelle-Ziel-Gruppe, $N^{(g)}$ – größter Wert des Index vom Typ g , s – Index Zeitscheibe, RSA – Randsummenausgleich, n –Iterationszähler

Abbildung 5.7: Berechnungsablauf des Modells EVA-U mit Zeitscheiben

- die Quell- und Zielverkehrsaufkommen aller QZG durch die vorhergehenden Berechnungsschritte schon bekannt sind.

Hinzu kommen Bedingungen, die sich durch die Betrachtung der Tageszeit ergeben, und zwar dass

- die Betrachtung eines zeitlich geschlossenen Intervalls (d.h. über alle Zeitscheiben eines Tages) notwendig ist. Es wird vorausgesetzt, dass sich alle Personen nach Ablauf eines Tages zum Zeitpunkt der Verkehrsrue wieder am Heimatstandort befinden.

Unsymmetrien treten auf, wenn für die Quell- und Zielverkehrsaufkommen aller QZG g gilt:

$$\sum_{g'} Q_{ig'} \neq \sum_{g'} Z_{jg'} \quad , \quad \text{wobei} \quad i = j$$

mit

$$Q_i = \sum_{g's'} Q_{g's'} = \sum_{j'k'r'} v_{ij'k'r'} \quad ,$$

$$Z_j = \sum_{g's'} Z_{g's'} = \sum_{i'k'r'} v_{i'jk'r'} \quad .$$

Anschließend erfolgt die Berechnung der Quell- und Zielverkehrspotenziale in der QZG SS analog zu Gleichung 2.2. Wenn die Aufkommen der QZG SS bekannt sind, werden sie entsprechend der gültigen Tagesganglinie auf die Zeitscheiben umgelegt.

Angebotsmodell Zu Beginn der Berechnung werden zunächst die Routen innerhalb der Verkehrsarten bestimmt. Für den Fuß- und den Radverkehr kann davon ausgegangen werden, dass sich die Zeiten im Verlauf des Tages nicht ändern.

Für den ÖV werden bei der Routensuche alle Routen des Tages bestimmt. Der Fahrplan bestimmt die komplexe Reisezeit. Weitere Unterschiede zwischen den Routen ergeben sich aufgrund der Kosten oder der Auslastung.

Für den MIV und P+R ergeben sich Unterschiede zwischen den Tagesganglinien hinsichtlich der Reisezeit, aber auch der Kosten (tageszeitabhängige Parkkosten oder/und Maut etc.). Ob die zu Beginn des Berechnungsablaufes generierte Routenanzahl auch innerhalb der Verkehrsspitzen ausreichend ist, ist im Einzelnen zu prüfen. Eventuell ist ein „Nachfassen“, d.h. eine zusätzliche Routensuche und -speicherung unter den Verkehrsbedingungen der Spitzenstunde

notwendig. Dieses Vorgehen bedarf aber der Erprobung. Die Anwendung einer dynamischen Umlegung zur Ermittlung von Verkehrsstärken und Reisezeiten ist ebenfalls möglich.

Berücksichtigung des Heimatstandortes Das simultane Nachfragemodell EVA sowie auch das darauf aufbauende Modell EVA-U berücksichtigen im Regelfall nur die Ortsveränderungen der Quelle-Ziel-Gruppen und nicht die Ortsveränderungen im vollständigen Wegekettens-Zusammenhang. Eine Betrachtung der Wegekettens von Einzelpersonen findet nicht statt, folglich wird der Heimatstandort von Personen nicht verwaltet. Im Modell EVA verursacht dieses Vorgehen wenig Probleme, denn die Aufkommen von korrespondierenden heimgebundenen QZG (z.B. WA/AW, WE/EW, WB/BW etc.) sind spiegelbildlich proportional⁹ und die Aufwände sehr häufig spiegelbildlich identisch. Wenn zusätzlich identische Parameter für die Bewertungsfunktionen verwendet werden, ist gesichert, dass z.B. die Ströme einer zielheimgebundenen QZG so bestimmt werden, dass die Personen zu ihrem ursprünglichen Wohnstandort zurückkehren. Die Matrix beispielsweise der QZG AW ist proportional zur transponierten Matrix WA .

Wenn Zeitscheiben berücksichtigt werden, dann unterscheiden sich die zeitscheibenfeinen Aufwände und möglicherweise auch die Parameter der Bewertungsfunktionen. Betrachtet man nun die summierten tagesfeinen QZG-Matrizen, so haben sich die Quellen der zielheimgebundenen Ortsveränderungen verändert. Dieser Effekt beruht darauf, dass im Modell (wie auch in der Realität) prinzipiell großen Aufwänden ausgewichen wird. Die Unsymmetrien können Probleme verursachen, z.B. eine unausgewogene Belastung von P+R-Parkständen, da Personen für die abendliche Heimfahrt andere Ziele bzw. Routen als für die morgendliche Hinfahrt wählen. Bei elastischen Randsummenbedingungen besteht die Möglichkeit, dass starke Abweichungen in den Aufkommen der Verkehrsbezirke auftreten, die durch einen Randsummenausgleich bilanziert werden müssen. Das diese Abweichungen insgesamt ausreichend klein sind, ist die Voraussetzung für die Anwendung des RSA-Verfahrens (siehe Abschnitt 2.1). Andernfalls kann dieses RSA-Verfahren nicht angewendet werden.

SCHILLER [41] beschreibt die Bewertung von Verkehrsteilnehmern wie folgt: *„Dabei bewerten Verkehrsteilnehmer die Aufwände für Hin- und Rückfahrt nicht getrennt voneinander, sondern beurteilen beide Fahrten bezüglich der Ziel- und*

⁹Sie sind „nur“ proportional und nicht identisch, denn i.d.R. unterscheiden sich beide Matrizen bezüglich des Gesamtverkehrsaufkommens. Das Aufkommen der zielheimgebundenen QZG ist i.d.R. etwas geringer, denn gelegentlich wird die Rückfahrt nicht direkt angetreten, sondern ein weiteres Ziel aufgesucht.

auch der Verkehrsmittelwahl im Zusammenhang und treffen danach ihre Entscheidung.“

Im Modell EVA-RV¹⁰ wird dies berücksichtigt, indem für das Modul Verteilung/Aufteilung ein Aufwandsmittelwert aus dem Aufwand der Hin- und Rückfahrt gebildet wird. Voraussetzung für die Bildung des Mittelwertes ist die Kenntnis des Rückfahrzeitpunktes. Diese Information kann aus der Verteilung der Aktivitätendauer in Abhängigkeit vom Ankunftszeitpunkt gewonnen werden, welche durch verschiedene Erhebungen bekannt sind¹¹. Die Personen betrachten die Aufwände für Hin- und Rückfahrt zwar gemeinsam, jedoch werden sehr oft unterschiedliche Routen genutzt. In diesem Sinne sind im Modell EVA-U die Routenwahlwahrscheinlichkeit entsprechend der zeitscheibenfeinen Routenbewertung¹² zu verwenden und es ist ein zeitscheibenbezogener Mittelwert für die Wahl der Relation zu bilden.

Der zeitscheibenbezogene Mittelwert einer Relationsbewertung für eine QZG g ist (auf die Angabe der Indizes ijk wird verzichtet)

$$\overline{BG} = \frac{BG_s + BG_{\tilde{s}}}{2}$$

mit s – Zeitscheibenindex für die Hinfahrt, \tilde{s} – Index der Zeitscheiben für die Rückfahrt und der Relationsbewertung BG nach Gl. 5.6. Die Bewertungsgröße des EVA-U-Modells für einen Routenstrom der Zeitscheibe s (Hinfahrt) ist nach Gl. 5.5

$$BG_{rs} = \overline{BG} \cdot P(R_{rs})$$

bzw. für die Rückfahrt in der Zeitscheibe \tilde{s}

$$BG_{r\tilde{s}} = \overline{BG} \cdot P(R_{r\tilde{s}}) \quad .$$

Die Gleichungssysteme der Zeitscheiben werden mit den üblichen iterativen Algorithmen gelöst.

¹⁰EVA-RV: Modell zur Berechnung des **R**uhenden **V**erkehrs, siehe SCHILLER [41] bzw. Abschnitt 5.6.

¹¹Das Verfahren wird in SCHILLER [41] angegeben.

¹²SCHILLER verwendet für die Mittelwertbildung zwar die Aufwände der Ortsveränderungen, eine Verwendung der Bewertungsgrößen ist jedoch ebenfalls möglich. Bisher existiert keine empirische Erfahrung hinsichtlich der Eignung beider Varianten. Wenn im Modell EVA-U die Aufwände gemittelt werden sollen, dann sind diese auf der Basis der Streckenaufwände zu bilden.

5.6 Berücksichtigung des ruhenden Verkehrs

SCHILLER entwickelt in [41] ein Simultanmodell für die Erzeugung, Verteilung und Aufteilung mit Berücksichtigung des ruhenden Verkehrs (EVA-RV). Die Basis des Simultanmodells bildet – wie für das Modell EVA-U auch – das Simultanmodell EVA von LOHSE [33]. Die beiden Modelle EVA-U und EVA-RV ergänzen sich und bilden zusammen ein sehr mächtiges disaggregiertes makroskopisches Verkehrsmodell. Die Grundlagen der Modellierung des ruhenden Verkehrs nach SCHILLER werden in diesem Abschnitt kurz dargestellt. Sie werden ergänzt um ein Verfahren zur Berücksichtigung der Randsummenbedingung von P+R-Parkständen.

Angebotsmodell Die Stellplatzkapazität der Parkstände repräsentiert das Angebot des ruhenden Verkehrs. Markante Stellplätze werden detailgetreu angebunden und abgebildet. Vereinzelte Stellplätze werden zu Parkständen zusammengefasst. Die Parkstände werden in das Netzmodell als Strecken, die sogenannten Parkstandsstrecken, integriert. Unterschiedliche Parkieranlagen (z.B. Anwohnerparken) können für bestimmte Nachfragesegmente (Quelle-Ziel-Gruppen) zugelassen oder gesperrt werden.

Die Parksuchzeit auf einer Parkieranlage ist abhängig von deren Auslastungsgrad. In Analogie zur CR-Funktion der Strecken entwickelt SCHILLER eine PR-Funktion¹³

$$\begin{aligned}
 PZ &= PZ0 \cdot \left(1 + a \cdot \left(\frac{SG}{b} \right)^{c+SG^d} \right) && \text{wenn } SG \leq F \\
 PZ &= PZ0 \cdot \left(1 + a \cdot \left(\frac{F}{b} \right)^{c+F^d} \right) + \frac{dPZ}{dF} \cdot (SG - F) && \text{wenn } SG > F
 \end{aligned} \tag{5.21}$$

mit

- a Anstieg des ersten Teils der Kurve (Parameter),
- b Verschiebung des mittleren Bogenansatzes entlang der Abzisse (Parameter),
- c Radius des mittleren Bogens (Parameter),
- C Kapazität (Stellplatzanzahl),
- d Anstieg des letzten Teils der Kurve (Parameter),

¹³PR: Parking-Restraint

F	Wert des Sättigungsgrades $SG = F$, ab dem die Kurve linear ansteigt,
M	Verkehrsstärke der Strecke,
PZ	Parksuchzeit der Strecke,
$PZ0$	Mindestsuchzeit,
SG	Sättigungsgrad $SG = M/C$.

Der Graph der PR-Funktion ist in seinem Verlauf variabler als die BPR-Funktion, die dieser Funktion zugrunde liegt. Wie bei der BPR-Kurve auch, sind Überlastungen, d.h. Werte $SG > 1$ möglich und werden mit stark anwachsenden Parksuchzeiten abgebildet.

Die PR-Funktion gilt nur für die Einfahrt in die Parkieranlage. Für das Verlassen der Anlage ist ein konstanter Zeitwert anzunehmen. Die Parkstandsstrecke erhält damit je nach Fahrtrichtung unterschiedliche Funktionen. Die PR-Funktion bildet nur die Suchzeit auf dem Parkstand selbst ab. Eine zusätzliche Zeit entsteht durch die Suche im Straßenraum und durch die von anderen Fahrzeugen ausgehende Behinderung.

In einem herkömmlichen Netzmodell verbinden die Anbindungen den Verkehrsbezirk mit einem repräsentativen Netzknoten. Im Netzmodell mit Parkständen werden alle Bezirke ausschließlich an die Parkstände (Parkstandsstrecken) und diese wiederum an das Netz der freien Strecken angebunden.

Bei begrenztem Parkraum kommt es vor, dass der gewählte Parkstand in einem anderen Verkehrsbezirk liegt als der ursprüngliche Ziel- bzw. Quellverkehrsbezirk (Parkverdrängungsverkehr). SCHILLER löst das Problem, indem er Bezirke fremdanbindet, d.h. die Anbindung eines Bezirkes zum Parkstand eines anderen Bezirkes führt. Mit der *Fremdanbindung* entsteht das Problem, dass die für einen Parkstand ermittelte Verkehrsmenge nicht gleich dem Zielverkehr des betrachteten Bezirkes ist. Die eindeutige Zuordnung ist notwendig, da im Nachfragemodell die Verkehrsaufkommen ermittelt und die Randsummenbedingungen geprüft werden. Da im Modell EVA-U aber die Routenströme v_{ijk} bekannt sind, ist auch für jeden Parkstand bekannt, zu welchem Zielbezirk j die Parkmenge zuzuordnen ist. Auf eine Splittung der Parkstände, wie im Modell EVA-RV notwendig und vorgeschlagen, kann im Modell EVA-U verzichtet werden.

Drei Kenngrößen sind für die Wahl eines Parkstandes wesentlich: (1.) die Parksuchzeit, (2.) die Parkdauer¹⁴ und (3.) die Ankunftszeit. Die Ankunftszeit und die Parkdauer werden sehr stark vom Fahrtzweck bestimmt. Die Park-

¹⁴In o.g. Quelle wird ein Verfahren zur Ermittlung der Parkdauerverteilung angeboten. Eingangsdaten hierfür sind die Quelle-Ziel-Gruppen-feinen Ankunftsverteilungen.

dauer multipliziert mit den Parkgebühren pro Zeiteinheit ergibt die Parkkosten. Alle drei Größen sind entweder Bestandteil der Generalisierten Kosten nach Gl. 5.9 oder können über die zeitscheibenfeine Modellierung berücksichtigt werden. Über die Festlegung Quelle-Ziel-Gruppen-feiner Parameter für die Gewichtsfunktionen γ der Generalisierten Kosten besteht auch die Möglichkeit, Parkrestriktionen differenziert für die QZG abzubilden. So kann simuliert werden, dass bestimmte QZG bestimmte Parkstände meiden oder bevorzugen.

Nachfragemodell Im Nachfragemodell werden zuzüglich zu den bekannten drei Randsummenbedingungen zwei weitere Bedingungen hinzugefügt, und zwar für das verkehrsmittelbezogene Quell- und Zielverkehrsaufkommen.

$$v_{ijk} = BG_{ijk} \cdot fq_i \cdot fz_j \cdot fa_k \cdot faq_{ik} \cdot faz_{jk} \quad (5.22)$$

mit harten Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} QP_i &= \sum_{j'k'} v_{ij'k'} \quad , \\ ZP_j &= \sum_{i'k'} v_{i'jk'} \quad , \\ AP_k &= \sum_{i'j'} v_{i'j'k} \quad , \\ QP_{ik} &= \sum_{j'} v_{ij'k} \quad , \\ ZP_{jk} &= \sum_{i'} v_{i'jk} \quad . \end{aligned}$$

Die verkehrsmittelbezogenen Quell- und Zielverkehrspotenziale QP_{ik} bzw. ZP_{jk} sind durch die Parkstandskapazitäten der Bezirke determiniert. Analog dazu ergeben sich die verkehrsmittelbezogenen Quell- und Zielverkehrsaufkommen durch die Parkstandsmenge der Bezirke. Verschiedene Randsummenbedingungen (hart, elastisch) sind möglich. Zur Lösung des Gleichungssystems mit verschiedenen Randsummenbedingungen werden Lösungsverfahren angegeben, die auf dem klassischen MULTI-Algorithmus basieren.

Ein Ablaufplan für das Modell des ruhenden Verkehrs EVA-RV unter Beachtung von Zeitscheiben ist in [41] angegeben und unterscheidet sich nur hinsichtlich der Details des ruhenden Verkehrs und des Umlegungsmoduls vom Modell EVA-U nach Abbildung 5.7.

Randsummenbedingung für P+R-Parkstände Im Laufe eines Tages füllen und leeren sich die P+R-Parkstände. Wenn P+R-Parkplätze ausschließlich dem Umsteigen und keinen sonstigen Parkzwecken dienen (z.B. Anwohnerparken), dann nimmt die Belastung der P+R-Parkstände zum Zeitpunkt der Verkehrsruhe den Wert Null an. Das im folgenden vorgeschlagene Verfahren prüft die Bilanz der Quell- und Zielverkehrsaufkommen der P+R-Parkstände und errechnet daraus routenbezogene Bilanzfaktoren. Die Anwendung der Bilanzfaktoren im Gleichungssystem bzw. im Gleichgewichtsverfahren führt zum erwünschten Ausgleich der Quell- und Zielverkehrsaufkommen der P+R-Parkstände.

Die Quell- und Zielverkehrsaufkommen Q_p bzw. Z_p der betreffenden Parkstände p werden bestimmt, indem man alle Routenströme, die über diesen Parkstandsstrecke führen und zum Verkehrsmittel $k=P+R$ gehören, unter Beachtung der Richtung des Verkehrsartwechsels addiert:

$$\begin{aligned} Z_{kp} &= \sum_{i'j'r'g's'} v_{i'j'r'g's'} && \text{Verkehrsartwechsel vom MIV zum ÖV, bzw.} \\ Q_{kp} &= \sum_{i'j'r'g's'} v_{i'j'r'g's'} && \text{Verkehrsartwechsel vom ÖV zum MIV.} \end{aligned} \quad (5.23)$$

Die Bilanzbedingung gilt nur für die Gesamtverkehrsstrommatrix eines Tages, d.h. die Addition erfolgt über Routen r der Relationen ij aller Quelle-Ziel-Gruppen g und aller Zeitscheiben s . Welche der beiden Größen, das Quell- oder das Zielverkehrsaufkommen eines Parkstandes, die Realität besser abbildet, ist nicht bekannt. Als Näherung wird der Mittelwert beider Größen \overline{QZ}_p angenommen:

$$\overline{QZ}_{kp} = \frac{Q_{kp} + Z_{kp}}{2} .$$

Aus dem Aufkommen und dem Mittelwert lassen sich Bilanzfaktoren für die Routen, die über einen bestimmten Parkstand p führen, bestimmen:

$$f_{pr} = \begin{cases} \overline{QZ}_{kp}/Q_{kp} & \text{wenn Route } r \text{ in } p \text{ vom ÖV zum MIV wechselt,} \\ \overline{QZ}_{kp}/Z_{kp} & \text{wenn Route } r \text{ in } p \text{ vom MIV zum ÖV wechselt,} \\ 1 & \text{wenn Route } r \text{ nicht über } p \text{ führt.} \end{cases} \quad (5.24)$$

Dabei gilt die Annahme, dass eine Route der Verkehrsart $k=P+R$ über genau einen Parkstand führt. Die Bilanzfaktoren sind nach Abschluss eines Iterations-

schritts zu bestimmen und im Nachfolgeschritt auf alle QZG- und alle Zeitscheibenmatrizen anzuwenden. Die Bestimmungsgleichung für einen Verkehrsstrom einschließlich der beispielsweise harten RSB lautet analog zu Gl. 5.1

$$v_{ijk_r} = BG_{ijk} \cdot P(R_{ijk_r}) \cdot f_{q_i} \cdot f_{z_j} \cdot f_{a_k} \cdot f_{p_r} \quad (5.25)$$

mit den bekannten Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} QP_i &= \sum_{j'k'} v_{ij'k'} \quad , \\ ZP_j &= \sum_{i'k'} v_{i'jk'} \quad , \\ AP_k &= \sum_{i'j'k'} v_{i'j'k} \quad , \\ Z_{kp} &= Q_{kp} \quad \text{für alle } p \text{ für } k=P+R \quad . \end{aligned}$$

Dieses Verfahren bedarf der praktischen Erprobung in großen Untersuchungsgebieten.

5.7 Generierung von Routen

Nach Abschnitt 5.5 wird davon ausgegangen, dass die Berechnung auch zeitscheibenfein erfolgen kann. Folglich müssen die Routen der Verkehrsmittel auch zeitscheibenfein bereitgestellt werden. Die Ermittlung der Routen kann prinzipiell mit einem beliebigen Verfahren erfolgen, jedoch sind Details zu beachten.

In einem MIV-Netz sind im Allgemeinen alle Routenverläufe für alle Zeitscheiben gültig. Die Unterschiede zwischen den Routen der Zeitscheiben liegen lediglich in den Routenkenngößen und in der Routennachfrage. Deshalb ist es nicht sinnvoll, für jede Zeitscheibe erneut ein Routensuchverfahren zu starten. Statt dessen können die Routen wie bisher mit einem geeigneten Verfahren, z.B. der Monte-Carlo-Methode, ermittelt werden. Entscheidend ist, dass für jede Relation und jede Zeitscheibe eine angemessen große Zahl von realen Routen gefunden wird. Die Routenanzahl lässt sich z.B. beim Monte-Carlo-Verfahren durch die Wahl des Streuungsparameters κ beeinflussen. Ein großer κ -Wert gleicht auch den Nachteil aus, dass die Routen in einem unbelasteten Netz gesucht werden müssen. So erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass sich in der Menge der gefundenen Routen auch jene befinden, die dann im belasteten Netzzustand tatsächlich zu den k-besten Routen gehören. Für den Rad- und

Fußgängerverkehr lassen sich die Empfehlungen für den MIV direkt übertragen. Die Routenzahl ist jedoch, bedingt durch die gegenüber dem MIV wesentlich höhere Umwegempfindlichkeit, geringer.

Für die Verkehrsart ÖV eignen sich aufgrund der Berücksichtigung von Zeitscheiben nur fahrplanabhängige Verfahren.

Bildung von P+R-Routen Intermodale Routen können sich aus den Routen der verschiedenen elementaren Verkehrsarten Fuß, Rad, ÖV und MIV zusammensetzen. Eine typische Verkehrsmittelkombination ist Park and Ride (P+R). Ein wesentlicher Unterschied zwischen den MIV- und ÖV-Routen besteht in deren unterschiedlicher zeitlicher Auflösung (MIV: zeitscheibenfein, ÖV: minutenfein). Für die Ermittlung von P+R-Routen ergeben sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

Variante A: Anpassung der MIV- an die ÖV-Auflösung, d.h. minutenfeine Auflösung des MIV-Netzes, verbinden beider Netze mittels Umsteigekanten und Generierung von Routen mit Hilfe eines klassischen Routensuchverfahrens. Dieses Vorgehen ist hinsichtlich Rechenzeit und Speicherplatz sehr aufwändig. Deshalb wird das folgende Vorgehen favorisiert.

Variante B: Die P+R-Routen werden aus den bekannten Teilrouten zusammengesetzt. Die bisherige zeitscheibenfeine Auflösung des MIV-Netzes und die minutenfeine Auflösung des ÖV wird beibehalten. Für die MIV-Teilrouten werden die zeitscheibenfeinen Kenngrößen bestimmt. Es wird unterstellt, dass die Kenngrößen der MIV-Teilrouten sowie auch die Routen selbst zu jeder Minute der betrachteten Zeitscheibe gültig sind. Die MIV-Teilrouten werden wie Zubzw. Abgangswege zum Verkehrsmittel ÖV behandelt. Für die Ermittlung der Wartezeiten beim Einstieg in den ÖV wird wie bei der Ermittlung der Startwartezeit für Fußgänger vorgegangen. Die durch das Umsteigen entstehenden Aufwände werden in den Generalisierten Kosten berücksichtigt.

Für die Generierung der P+R-Routen ist es notwendig, bestimmte Festlegungen zu treffen und bestimmte Daten zu beschaffen. Dazu gehören im Einzelnen:

- *Anzahl der zulässigen Verkehrsartwechsel* pro Ortsveränderung.
- Kennzeichnung der *Parkstände, an denen die Verkehrsart gewechselt werden kann*. Die Kennzeichnung erfolgt durch Einfügen spezieller Verkehrsartwechselkanten. Diese Wechselkanten werden mit einer Funktion versehen, um die durch das Umsteigen entstehenden Aufwände darzustellen.
- Bestimmung aller *Teilrouten*, d.h. der k-kürzesten Routen von MIV und ÖV zwischen allen Quellen und allen Umsteigekanten sowie zwischen allen

Umsteigekanten und allen Zielen.

Aus diesen Informationen werden *Routenschablonen* gebildet. Eine Routenschablone beschreibt eine mögliche Anordnung von Teilrouten unter Berücksichtigung der zulässigen elementaren Verkehrsarten, der Zahl der möglichen Verkehrsartwechsel und der Umsteigepunkte. Die Abbildung 5.8 zeigt einen Netzausschnitt mit einer Quelle i, einem Ziel j und drei Umsteigepunkten p1, p2 und p3. Die Zahl der Routenschablonen für P+R (hier ist sowohl die Kombination

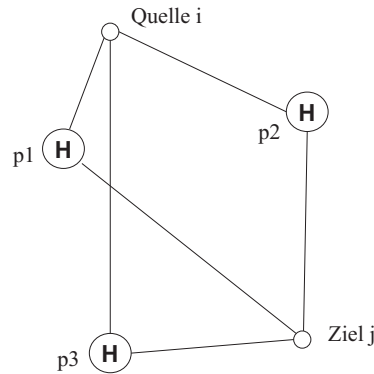


Abbildung 5.8: Netzmasche mit verschiedenen Umsteigepunkten. Auf jeder Kante kann jede Verkehrsart genutzt werden.

MIV-ÖV als auch ÖV-MIV gemeint) kann mit Hilfe der Kombinatorik ermittelt werden. Die Zahl der möglichen Routenverläufe unter Berücksichtigung der verschiedenen Umsteigepunkte und der Zahl der zulässigen Systemwechsel ergibt sich als Variation V von drei Elementen (= Anzahl der Umsteigepunkte) zu einer Klasse (= Anzahl der Systemwechsel):

$$V_k^n = \frac{n!}{(n-k)!} \quad , \quad \text{in diesem Fall} \quad V_1^3 = \frac{3!}{2!} = 3 \quad .$$

Die drei Routenverläufe zwischen Quelle und Ziel sind i-p1-j, i-p2-j und i-p3-j. Die möglichen Verkehrsartkombinationen für die ermittelten Routenverläufe ergeben sich durch Permutation, hier durch Permutation von zwei (elementaren) Verkehrsarten MIV und ÖV:

$$P_n = n! \quad , \quad \text{in diesem Fall} \quad P_2 = 2! = 2 \quad .$$

Für jeden der drei Routenverläufe sind demnach zwei Verkehrsartkombinationen möglich, insgesamt ergeben sich deshalb $2 \cdot 3 = 6$ Routenschablonen:

- Verkehrsartkombination MIV-ÖV: i-p1-j, i-p2-j, i-p3-j und
- Verkehrsartkombination ÖV-MIV: i-p1-j, i-p2-j, i-p3-j.

Unter der Annahme, dass auf jeder ÖV-Teilroute 6 Abfahrten in der betrachten Zeiteinheit angeboten werden und der Zu- bzw. Abgang zum ÖV auf jeweils 4 unterschiedlichen MIV-Teilrouten möglich ist, ergeben sich $6 \cdot 4 \cdot 6 = 144$ Routen für beide Kombinationen der betrachteten Quelle-Ziel-Relation.

Beim Zusammensetzen der Routen gemäß der Routenschablonen können zahlreiche unsinnige Routen entstehen, da die Routen aller Quelle-Ziel-Kombinationen über alle Umsteigepunkte geführt werden, und zwar unabhängig davon, ob deren geographische Position günstig ist oder nicht. Ein geographischer Filter, der nur die in einem vernünftigen Korridor liegenden Umsteigepunkte berücksichtigt, kann die Routenzahl deutlich reduzieren. Mögliche Denksätze für Filter sind (1.) nur P+R-Routen zuzulassen, die weniger als das x-fache der geringsten MIV-Reisezeit benötigen, oder/und (2.) nur Quelle-Ziel-Relationen zu wählen, die den Quell- und Zielverkehr des Planungsgebietes abbilden (meistens werden P+R-Parkplätze am Stadtrand als Angebot für Einpendler betrieben) oder/und (3.) Einzugsbereiche für die P+R-Parkstände zu definieren (z.B. mittels der Definition von Isochronen, die die möglichen Quellverkehrsbezirke filtern oder die Reisezeit der MIV-Zugänge begrenzen).

Das vorgestellte Verfahren zur Generierung von Routen kann auch auf andere intermodale Verkehrsarten ohne Fahrzeugmitnahme übertragen werden, beispielsweise Bike-and-Ride. Falls ein Fahrzeug in einem anderen Fahrzeug transportiert wird, sind weitere spezielle Annahmen z.B. hinsichtlich des zulässigen Verkehrssystems auf diesen Strecken zu treffen.

Löschen von unsinnigen Routen Bedingt durch das für den MIV vorgeschlagene Routensuchverfahren mittels Monte-Carlo-Simulation werden auch unsinnige Routen gefunden. Sie entstehen hauptsächlich durch kurze Absprünge von anderen Routen. Diese abspringenden Routen können ermittelt werden, indem Weglängen-, Reisezeiten- und Schleifentests durchgeführt werden (vgl. LOHSE [43] S. 289 ff.). So wird beim Weglängentest die Länge L_r der Route r ins Verhältnis zur Länge L^{min} der kürzesten Route gesetzt. Die Route wird gelöscht, wenn das Verhältnis n einen Grenzwert n_{zul} überschreitet:

$$n_L = \frac{L_k}{L^{min}} \quad \text{bzw. analog für den Reisezeitentest:} \quad n_{TR} = \frac{TR_k}{TR^{min}} \quad .$$

Der Schleifentest arbeitet nach dem gleichen Prinzip. Er kann auf zwei Routen mit gemeinsamen Teilrouten angewendet werden. Hier werden allerdings nicht die Gesamtlängen der Routen, sondern die Längen zwischen den Verzweigungspunkten untersucht.

In der ÖV-Routensuche wird das Finden unsinniger Routen schon durch Abbruchbedingungen im Routensuchalgorithmus verhindert (siehe Abschnitt 3.2).

Bei der Generierung von P+R-Routen können ebenfalls zahlreiche unsinnige Routen entstehen, da die Routen aller Quelle-Ziel-Kombinationen über alle Umsteigepunkte geführt werden, und zwar unabhängig davon, ob der Standort der Umsteigepunkte günstig ist oder nicht. Diese unsinnigen Routen können ebenfalls über einen Reisezeitentest identifiziert werden (siehe oben).

Unabhängig von den gewählten Löschroutinen sollten die Löschkriterien nicht zu streng gewählt werden. Die Prüfroutinen dienen nur dazu, den Speicher von *offensichtlichem* Ballast zu befreien. Ob ein Routenverlauf tatsächlich genutzt wird, ist ein Ergebnis des Nachfragemodells EVA-U.

5.8 Modellbeispiel

In den vorhergehenden Abschnitten wurde ein komplexes Modell für die Verteilung, Aufteilung und Routenwahl entwickelt. Die Anwendung dieses Berechnungsmodells an einem realen Gebiet verlangt ein neu zu erstellendes, sehr komplexes Programmsystem und ein hohes Maß an Zeit zur Eingabe der Daten sowie zur Kalibrierung. Die Programmierung dieses Modells ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Zur Demonstration der wesentlichen Wirkungen des vorgeschlagenen Modells wurde ein sehr kleines Modell konstruiert und das Grundgerüst des Berechnungsalgorithmus in MS Excel mit Visual Basic programmiert. Auf die Berücksichtigung von Quelle-Ziel-Gruppen, von Zeitscheiben und Parkständen wurde verzichtet.

Netzmodell und Berechnungsablauf Das Netzmodell mit drei Verkehrsbezirken (1, 2 und 3), zwei Verkehrsarten (MIV und ÖV), 23 Strecken und 32 Routen ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Die Eigenschaften der Routen sind unterschiedlich, einige Routen sind unabhängig, andere abhängig. Zudem gibt es Abhängigkeiten zwischen den Routen der verschiedenen Relationen, denn es teilen sich z.B. die Relationen {1,2,MIV} und {1,3,MIV} die Strecke 1 und konkurrieren um deren Kapazität. Auf die Modellierung von Abbiegebeziehungen wurde verzichtet. Ein Wert für die Zu- und Abgangszeit kann gesetzt

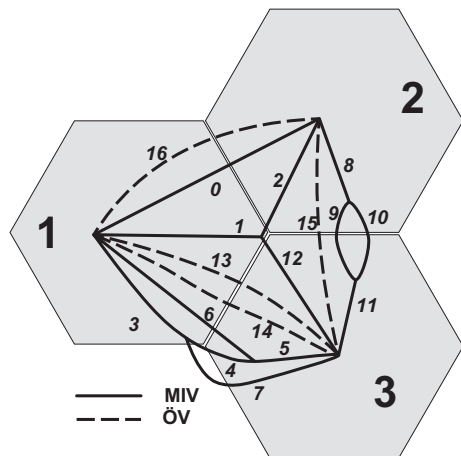


Abbildung 5.9: Beispiel 3 – Netzmodell mit drei Verkehrsbezirken, zwei Verkehrsarten und insgesamt 32 Routen

werden, spezielle Zu- und Abgangsstrecken sind jedoch nicht dargestellt. Der Binnenverkehr der Bezirke wird ebenfalls simuliert, d.h. die Hauptdiagonale der Aufwandsmatrix wird besetzt und der Zellbinnenverkehr wird bestimmt.

Nach dem Einlesen der Daten werden die Bewertungsgrößen der Routen ermittelt, das Gleichungssystem aufgebaut und gelöst. Die erhaltenen Routenströme v_{ijk_r} werden auf das Netz umgelegt und so die aktuellen Streckenbelastungen und Streckenkenngrößen bestimmt. Aus den Streckenkenngrößen lassen sich wiederum aktuelle Routenaufwände und Routenbewertungsgrößen errechnen, und ein weiterer Iterationsschritt beginnt. Die Iteration wird abgebrochen, wenn sich die Streckenreisezeiten aller Strecken im Vergleich zum Vorgängerschritt um weniger als 5% ändern. Die Verkehrsstärke der Strecken wird geglättet, d.h. es wird in jedem Schritt der Mittelwert aus allen in den Vorgängerschritten ermittelten Verkehrsstärken gebildet.

Eingabedaten und Berechnungsmodell Die Daten der Routen und Strecken wurden aus Excel-Tabellen eingelesen, ebenso die folgenden Quell-, Ziel- und Verkehrsmittelaufkommen.

Quellpotenzial	Zielpotenzial	Verkehrsartpotenzial
Q_1 8000	Z_1 8000	A_{MIV} 12000
Q_2 8000	Z_2 8000	$A_{\ddot{O}V}$ 12000
Q_3 8000	Z_3 8000	

Den Strecken des Verkehrsmittels $\ddot{O}V$ wurde eine Kapazität von 99999 Kfz/h zugeordnet (siehe Tabelle 5.8). Durch diese hohe Kapazität wirkt die Kapazitätsbeschränkungsfunktion

$$FZ = T0 \cdot (1 + a \cdot (M/C)^b)$$

(mit $a = 1$ und $b = 4$) nicht für die $\ddot{O}V$ -Strecken. Die Strecken Nr. 17 – 22 sind virtuelle Strecken innerhalb der Verkehrsbezirke und dienen der Abbildung des Zellbinnenverkehrs. Sie sind in der Abbildung 5.9 nicht dargestellt. Vereinfachend wurde angenommen, dass der Besetzungsgrad der MIV-Fahrzeuge gleich Eins ist, d.h. eine die Zahl der Personen-Ortsveränderungen in der Matrix ist gleich der PKW-Fahrten auf den Routen. Die Routentabelle (siehe Tab.

lfd. Nr.	VM k	$T0$	C
0	1	20	1000
1	1	10	1000
2	1	10	1000
3	1	10	1000
4	1	5	1000
5	1	5	1000
6	1	15	1000
7	1	10	1000
8	1	6	1000
9	1	8	1000
10	1	8	1000
11	1	6	1000

lfd. Nr.	VM k	$T0$	C
12	1	10	1000
13	2	20	99999
14	2	20	99999
15	2	20	99999
16	2	20	99999
17	1	20	1000
18	1	20	1000
19	1	20	1000
20	2	20	99999
21	2	20	99999
22	2	20	99999

Tabelle 5.8: Beispiel 3 – Liste der Strecken mit den Attributen Verkehrsmittel (VM) ($k=1$: MIV, $k=2$: $\ddot{O}V$), $T0$ -Reisezeit [min] und Kapazität (C)

5.9) enthält neben den Routenkenngrößen auch die Streckenfolge. Aus diesen Informationen wird die Strecken-Routen-Inzidenzmatrix generiert, welche den δ -Wert der Bewertungsgröße für Abhängigkeit enthält.

Die Routenreisezeit setzt sich aus den Streckenreisezeiten zusammen. Die in der Tabelle angegebene Größe Zugfolgezeit ZFZ ist zwar für jede Route

angegeben, bezieht sich aber auf die Relation ijk . Die Zugfolgezeit kann sinnvoll nur für das Verkehrsmittel ÖV interpretiert werden. Auf die Konstruktion eines Fahrplans wurde verzichtet, statt dessen wird die Größe Zugfolgezeit genutzt, um die Häufigkeit von Routen zwischen den Bezirken anzugeben. Der Wert $ZFZ = 0$ bedeutet, dass in jeder Minute eine Verbindung existiert. Im Planfall 3 (siehe folgenden Abschnitt) wird gezeigt, wie die Änderung der Zugfolgezeit auf die Nachfrage wirkt.

Die EVA-U-Bewertungsgröße ist

$$BG_{ijk r} = BG_{ijk} \cdot P(R_{ijk r})$$

mit den dem Beispiel angepassten Relationsbewertungen und der Routenauswahlwahrscheinlichkeit nach Gl. 5.6 und 5.7

$$BG_{ijk r} = F(ZFZ_{ijk}) \cdot \sum_{r'} \left(P(R_{ijk r'}) \cdot F(GK_{ijk r'}) \right) \cdot P(R_{ijk r})$$

mit

$$P(R_{ijk r}) = \frac{BG(R_{ijk r})}{\sum_{r'} BG(R_{ijk r'})} \quad .$$

Die Bewertung der Generalisierten Kosten und des Verkehrsmittelangebotes (Zugfolgezeit) erfolgt mit der EVA2-Funktion (siehe unten). Die Routenbewertung nach Gl. 5.8 ist

$$BG(R_{ijk r}) = M(R_{ijk r}) \cdot U(R_{ijk r})$$

mit

$$\begin{aligned} M(R_{ijk r}) &= \frac{m(GK_{ijk r})}{\sum_{r'} m(GK_{ijk r'})} \quad \text{mit} \\ m(GK_{ijk r}) &= (GK_{ijk r}^{\min})^{-\alpha_{ijk r}} \quad \text{und} \\ \alpha_{ijk r} &= a \cdot q_{ijk r}^b - a \cdot b \cdot q_{ijk r} + a \cdot b - a \end{aligned}$$

mit den zugehörigen Parametern $a = 0,02$ und $b = 8$. Die Mehrkosten q sind

$$q_{ijk r} = \frac{GK_{ijk r}}{GK_{ijk}^{\min}} \quad \text{mit} \quad GK_{ijk}^{\min} = \min_{r'} (GK_{ijk r'})$$

sowie den Generalisierten Kosten einer Route

$$GK_{ijkr} = \gamma_k(FZ_{ijkr}) \cdot FZ_{ijkr} + \gamma_k(UH_{ijkr}) \cdot UH_{ijkr} \\ + \gamma_k(ZUAB_{ijkr}) \cdot ZUAB_{ijkr} \quad .$$

Für den Zeitbewertungsfaktor gilt $z = 1$. Die nichtlinear wachsende Gewichtsfunktion γ_k in den Generalisierten Kosten ist die EVA2-Transformationsfunktion

$$\gamma_k(w) = \alpha + \beta \cdot \frac{1}{F^{\text{EVA2}}(w)} \quad .$$

Die nichtlinear fallende EVA2-Funktion F^{EVA2} , die für die Bewertung der Generalisierten Kosten GK und der Zugfolgezeit ZFZ von Bedeutung ist, ist lt. Gl. 5.11

$$F^{\text{EVA2}}(w) = \left[1 + \left(\frac{G-1}{E+1} \right) \cdot \left(\frac{w}{WP} \right)^G \right]^{-\frac{E}{G}} \quad .$$

Die Parameter der Funktion F^{EVA2} bzw. der Gewichtsfunktionen γ sind in der folgenden Tabelle angegeben. Die Parameter der Verkehrsarten MIV und ÖV sind identisch.

Aufwand		Zusammenhang	E	WP	G	α	β
Reisezeit	FZ	direkt	8	100	4	0	1
Zu- und Abgangszeit	$ZUAB$	direkt	4	5	4	0	1
Umsteigehäufigkeit	UH	direkt	4	2	4	0	1
Generalisierte Kosten	GK		10	30	3		
Zugfolgezeit	ZFZ		10	10	4		

Die Bewertung der Abhängigkeit erfolgt nach Gl. 5.17

$$u(GK_{ijkr}) = \sum_{a' \in S_r} \left(\frac{GK_{a'}}{GK_{ijkr}} \cdot \frac{m(GK_{ijkr})}{\sum_{r'} \delta_{a'r'} \cdot m(GK_{ijkr'})} \right) \quad .$$

Falls eine Route nicht genutzt wird und diese Route gleichzeitig auch die einzige Route im Routenbündel ist, dann tritt eine Division durch Null auf. Diese wird abgefangen, indem die klassische Version des PS-Faktors berücksichtigt wird (nur für diese Strecke!):

$$u(GK_{ijkr}) = \sum_{a' \in S_r} \left(\frac{GK_{a'}}{GK_{ijkr}} \cdot \frac{1}{\sum_{r'} \delta_{a'r'}} \right) \quad .$$

Die Umlage der Generalisierten Kosten einer Route auf die einzelnen Strecken erfolgt nach Gleichung 5.18, im Beispiel wurde

$$GK_a = \frac{FZ_a}{FZ_r} \cdot GK_r$$

verwendet. Die Werte für die Zugfolgezeit ZFZ , die Umsteigehäufigkeit UH und die zusammengefasste Zu- und Abgangszeit $ZUAB$ sind im ersten Beispiel gleich Null – damit sind diese Größen in der Bewertung unwirksam. So kann gezeigt werden, welche Wirkung allein die Mehrkosten und die Abhängigkeit haben.

Das trilineare EVA-Gleichungssystem mit harten Randsummenbedingungen (Gl. 5.1) wird mit dem trilinearen MULTI-Algorithmus (siehe Anhang C.1) gelöst. In diesen Beispielen sind weniger als 10 Schritte zur Lösung des Gleichungssystems notwendig.

Ergebnisse In einem ersten Schritt wird gezeigt, wie das Modell generell arbeitet. Die Tabelle 5.10 (links) veranschaulicht den Fall, dass nur der erste Iterationsschritt ausgeführt wird. Damit wirkt die Verdrängung aufgrund der Kapazitätsbeschränkungsfunktion noch nicht. Zu diesem Zeitpunkt weisen alle Routen noch eine identische Fahrzeit auf. Demzufolge erhalten alle Relationen ijk einen identischen Verkehrsstrom, nämlich $1/18$ des Gesamtverkehrsaufkommens V . Auf Relationen, die über mehrere unabhängige Routen verfügen, teilt sich der Verkehrsstrom v_{ijk} gleichmäßig auf die Routen auf (siehe Relation $\{1,2,MIV\}$ oder $\{1,3,ÖV\}$). Für abhängige Routen ergibt sich die Auswahlwahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung des Abhängigkeitsfaktors (z.B. Relation $\{1,3,MIV\}$). Die Randsummenbedingungen sind eingehalten, die vorgegebenen Potenziale werden erreicht.

Ab dem zweiten Iterationsschritt beeinflusst die Kapazitätsbeschränkungsfunktion sowohl die Routenwahl als auch die Aufteilung auf Verkehrsarten und die Zielwahl. Für die MIV-Routen, die im ersten Schritt überlastet wurden, steigt die Reisezeit an. Es treten Ausweichbewegungen auf: entweder werden andere Routen der gleichen Relation oder ein anderes Verkehrsmittel oder eine andere Quelle-Ziel-Kombination gewählt. Relationen mit mehreren MIV-Routen nehmen eine größere Zahl an Ortsveränderungen auf. Hierbei wirkt sich aus, dass mehrere Routen auch über ein Vielfaches der Kapazität verfügen (z.B. Relation $\{1,3,MIV\}$). Wenn jedoch die Strecken einer Route von mehreren Routen verschiedener Relationen genutzt werden, dann wird ein Teil dieser Streckenkapazität von dem Routenstrom der anderen Routen beansprucht. In der Folge kommt es zum Anstieg der Routenreisezeit und zum Absinken des

lfd. Nr.	i	j	k	r	Streckenfolge	FZ	$ZUAB$	UH	ZFZ
0	1	1	1	1	17	20	0	0	0
1	1	1	2	1	20	20	0	0	0
2	1	2	1	1	0	20	0	0	0
3	1	2	1	2	1-2	20	0	0	0
4	1	2	2	1	16	20	0	0	0
5	1	3	1	1	1-12	20	0	0	0
6	1	3	1	2	3-4-5	20	0	0	0
7	1	3	1	3	6-5	20	0	0	0
8	1	3	1	4	3-7	20	0	0	0
9	1	3	2	1	13	20	0	0	0
10	1	3	2	2	14	20	0	0	0
11	2	1	1	1	0	20	0	0	0
12	2	1	1	2	2-1	20	0	0	0
13	2	1	2	1	16	20	0	0	0
14	2	2	1	1	18	20	0	0	0
15	2	2	2	1	21	20	0	0	0
16	2	3	1	1	2-12	20	0	0	0
17	2	3	1	2	8-9-11	20	0	0	0
18	2	3	1	3	8-10-11	20	0	0	0
19	2	3	2	1	15	20	0	0	0
20	3	1	1	1	12-1	20	0	0	0
21	3	1	1	2	5-4-3	20	0	0	0
22	3	1	1	3	5-6	20	0	0	0
23	3	1	1	4	7-3	20	0	0	0
24	3	1	2	1	13	20	0	0	0
25	3	1	2	2	14	20	0	0	0
26	3	2	1	1	12-2	20	0	0	0
27	3	2	1	2	11-9-8	20	0	0	0
28	3	2	1	3	11-10-8	20	0	0	0
29	3	2	2	1	15	20	0	0	0
30	3	3	1	1	19	20	0	0	0
31	3	3	2	1	22	20	0	0	0

Tabelle 5.9: Beispiel 3 – Liste der Routen mit den relations- und strecken-bezogenen Daten: Quelle i , Ziel j , Verkehrsmittel k und Route r , dazu die $T0$ -Reisezeit FZ , die Zu- und Abgangszeit $ZUAB$ und die Umsteigehäufigkeit UH der Route und die Zugfolgezeit ZFZ der Relation ijk (hier für jede Route angegeben).

Routenstroms. Die Zahl der Ortsveränderungen auf den ÖV-Routen steigt an, denn ihre Reisezeit bleibt, da ohne Kapazitätsbeschränkungsfunktion, auf dem niedrigen Anfangsniveau. Diese Ausweichbewegung ist jedoch begrenzt, da das ÖV-Verkehrsartenpotenzial auf 12000 OV/h festgesetzt wurde. Die Abbildung 5.10 veranschaulicht die Verkehrsstärken der Strecken in diesen Gleichgewichtszustand.

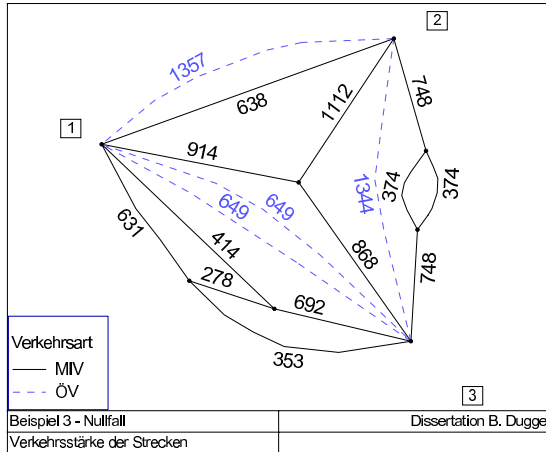


Abbildung 5.10: Beispiel 3 – Verkehrsstärken der Strecken im Nullfall

Ergebnisse der Planfälle Es werden mehrere Planfälle vorgestellt, bei denen Änderungen des Netzes bzw. der Routenkenngroßen vorgenommen werden. Die Änderungen gelten immer gleichzeitig für die Hin- und Rückrichtung. Der Vergleichsfall (Planfall 0) ist in Tab. 5.10 rechts dargestellt.

In einem *Planfall 1* wird die Topologie der abhängigen Routen Nr. 2 und 3 der Relation $\{2,3,MIV\}$ verändert (in Tab. 5.9 die Routen Nr. 17 und 18). Dazu werden die Fahrzeiten der Strecken 8 und 11 gekürzt (statt 6 jetzt 0,001) und im Gegenzug die Strecken 9 und 10 verlängert (statt 8 jetzt 19,998). Die Routenfahrzeit $FZ = 20$ bleibt jedoch erhalten. Damit werden die betrachteten Routen stärker unabhängig. Das vollständige Ergebnis ist in Tabelle 5.11 (links) bzw. in Abbildung 5.11 dargestellt.

Die betrachteten Routen verzeichnen einen Zuwachs. Insgesamt wächst auch der Strom der Relation $\{2,3,MIV\}$. Im Gegenzug nimmt der konkurrieren-

de ÖV-Strom ab. Die veränderte Topologie verändert auch die Attraktivität der Quelle bzw. des Zieles für den MIV, die MIV-Quell- und Zielverkehrsaufkommen der Verkehrsbezirke steigen ebenfalls an. Damit reagiert das Modell entsprechend der formulierten Hypothese, dass stärker unabhängig werdende Route zunehmend als vollwertige Alternativen wahrgenommen werden. Die Zunahme der Unabhängigkeit ist vergleichbar mit einer Kapazitätserweiterung und führt folgerichtig zum Anstieg der betreffenden Verkehrsströme, der Verkehrsaufkommen der betreffenden Quell- und Zielbezirke und zum Absinken der konkurrierenden ÖV-Ströme.

Im *Planfall 2* zeigt sich, welche Wirkung unterschiedliche Routenfahrzeiten in einem Routenbündel haben. Bisher verfügten alle Routen über die gleiche Reisezeit. Die Reisezeit der Route 10 (Strecke 14) der Relation $\{1,3,\text{ÖV}\}$ wird von 20 auf 25 erhöht.

Die vollständigen Ergebnisse sind in Tabelle 5.11 (rechts) bzw. in Abbildung 5.12 angegeben. Die Aufteilung zwischen den zwei Routen verschiebt sich zu Gunsten der schnelleren Route, wobei insgesamt eine geringfügige Minderung des Verkehrsstromes der Relation $\{1,3,\text{ÖV}\}$ zu verzeichnen ist. Der Anstieg einer Routenreisezeit verringert die ÖV-Erreichbarkeit des Verkehrsbezirkes. Dementsprechend reagiert das Modell folgerichtig mit einem (geringfügigen) Absinken der ÖV-Verkehrsaufkommen der betreffenden Verkehrsbezirke. Da das Verkehrsaufkommen der Bezirke durch die harte Randsummenbedingung festgelegt ist ($Q=Z=8000$), werden die fehlenden Ortsveränderungen vom MIV übernommen.

Im *Planfall 3* wird gezeigt, wie eine Abnahme der Bedienungshäufigkeit und damit die Zunahme der Zugfolgezeit für den ÖV zwischen Bezirk 2 und 3 die Nachfrage für diese Relation verändert. Dazu wird für Route 19 die Zugfolgezeit von 0 auf 10 min gesetzt. Der bisherige Wert von $ZFZ = 0$ bedeutet eine quasi kontinuierliche Bedienung der Relation. Die Bewertung der Zugfolgezeit $F(ZFZ)$ sinkt von 1 auf 0,55. Der Verkehrsstrom der Route nimmt um fast 50% ab. Es gibt Ausgleichsbewegungen – andere ÖV-Routen und MIV-Routen verzeichnen einen Zuwachs an Verkehrsströmen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.12 (links) bzw. in Abbildung 5.13 angegeben. Die Verringerung der Bedienungshäufigkeit verschlechtert die ÖV-Erreichbarkeit der betreffenden Bezirke. Das Modell reagiert mit einer Abnahme der entsprechenden ÖV-Verkehrsbezirksummen.

Im *Planfall 4* wird die Kapazität der Strecke 7 von 1000 auf 300 Kfz/h verringert. Diese Änderung betrifft die Route 8 der Relation $\{1,3,\text{MIV}\}$. Im Verlauf der Iteration steigen die verkehrsstärkenabhängige Routenreisezeiten und damit die Generalisierten Kosten dieser Routen und die der Relation schneller

an. Die betroffene Route 8 verliert die meisten Ortsveränderungen, die alternativen Routen der betrachteten Relation übernehmen ein Teil dieser Ortsveränderungen. Insgesamt sinken der Verkehrsartstrom $v_{1,3,MIV}$ und auch der Relationsstrom $v_{1,3}$ ab. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.12 (rechts) bzw. in Abbildung 5.14 dargestellt. Auch in diesem Planfall reagiert das Modell auf die Kapazitätsverringerung mit einer Verringerung der von der betrachteten Route abhängigen Relationströme bzw. Bezirksaufkommen tendenziell richtig.

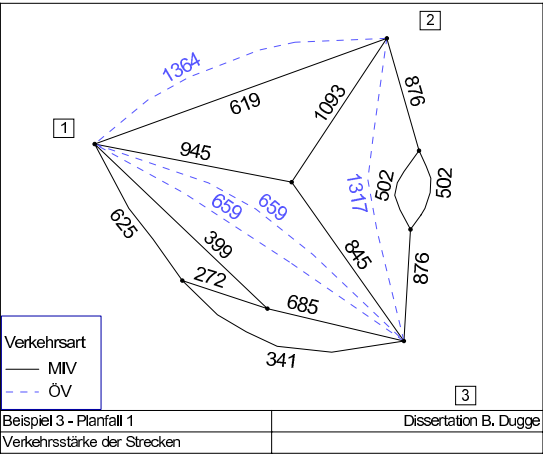


Abbildung 5.11: Beispiel 3 – Verkehrsstärken der Strecken im Planfall 1

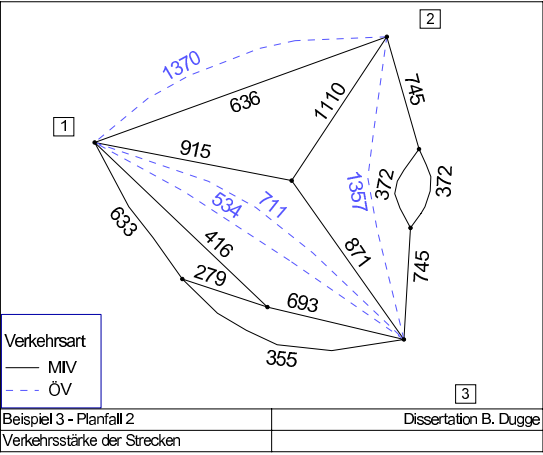


Abbildung 5.12: Beispiel 3 – Verkehrsstärken der Strecken im Planfall 2

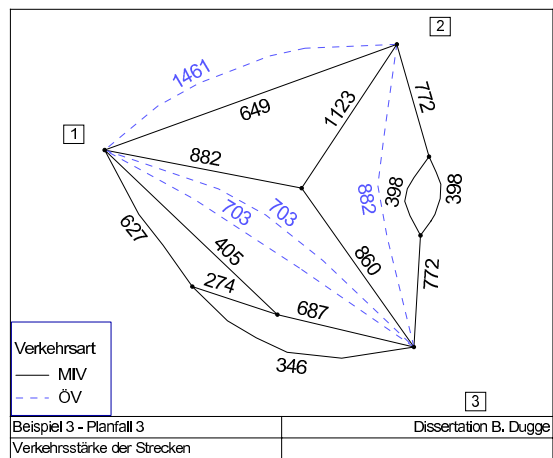


Abbildung 5.13: Beispiel 3 – Verkehrsstärken der Strecken im Planfall 3

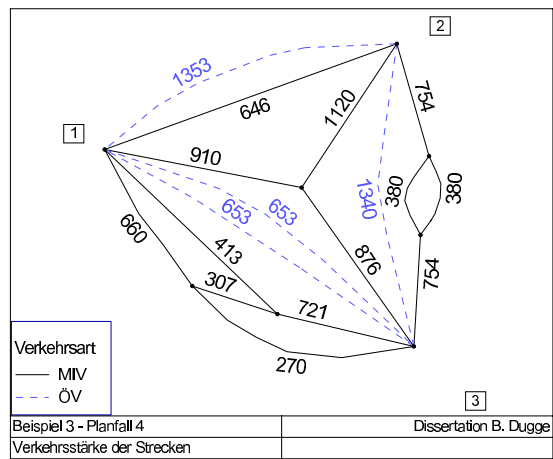


Abbildung 5.14: Beispiel 3 – Verkehrsstärken der Strecken im Planfall 4

Routenströme $v_{ijk\tau}$				
MIV	1	2	3	Q_i
1	1333	667 667	410 256 359 308	4000
2	667 667	1333	556 389 389	4000
3	410 256 359 308	556 389 389	1333	4000
Z_j	4000	4000	4000	12000
ÖV				
	1	2	3	Q_i
1	1333	1333	667 667	4000
2	1333	1333	1333	4000
3	667 667	1333	1333	4000
Z_j	4000	4000	4000	12000

Routenströme $v_{ijk\tau}$				
MIV	1	2	3	Q_i
1	1436	638 520	394 278 414 353	4033
2	638 520	1516	474 374 374	3895
3	394 278 414 353	474 374 374	1410	4071
Z_j	4033	3895	4071	12000
ÖV				
	1	2	3	Q_i
1	1311	1357	649 649	3967
2	1357	1404	1344	4105
3	649 649	1344	1286	3929
Z_j	3967	4105	3929	12000

Relationsströme v_{ijk}				
MIV	1	2	3	Q_i
1	1333	1333	1333	4000
2	1333	1333	1333	4000
3	1333	1333	1333	4000
Z_j	4000	4000	4000	12000
ÖV				
	1	2	3	Q_i
1	1333	1333	1333	4000
2	1333	1333	1333	4000
3	1333	1333	1333	4000
Z_j	4000	4000	4000	12000

Relationsströme v_{ijk}				
MIV	1	2	3	Q_i
1	1436	1158	1439	4033
2	1158	1516	1222	3895
3	1439	1222	1410	4071
Z_j	4033	3895	4071	12000
ÖV				
	1	2	3	Q_i
1	1311	1357	1299	3967
2	1357	1404	1344	4105
3	1299	1344	1286	3929
Z_j	3967	4105	3929	12000

Tabelle 5.10: Beispiel 3 – Ergebnisse nach dem ersten (links) und dem letzten Iterationsschritt (rechts).

Routenströme $v_{ijk\tau}$				
MIV	1	2	3	Q_i
1	1399	619 551	371 272 399 341	3951
2	619 551	1397	387 502 502	3957
3	371 272 399 341	387 502 502	1319	4092
Z_j	3951	3957	4092	12000
ÖV	1	2	3	Q_i
1	1366	1364	659 659	4049
2	1364	1362	1317	4043
3	659 659	1317	1273	3908
Z_j	4049	4043	3908	12000

Routenströme $v_{ijk\tau}$				
MIV	1	2	3	Q_i
1	1441	636 520	397 279 416 355	4045
2	636 520	1498	476 372 372	3873
3	397 279 416 355	476 372 372	1416	4082
Z_j	4045	3873	4082	12000
ÖV	1	2	3	Q_i
1	1341	1370	711 534	3955
2	1370	1399	1357	4127
3	711 534	1357	1316	3918
Z_j	3955	4127	3918	12000

Relationsströme v_{ijk}				
MIV	1	2	3	Q_i
1	1399	1170	1383	3951
2	1170	1397	1390	3957
3	1383	1390	1319	4092
Z_j	3951	3957	4092	12000
ÖV	1	2	3	Q_i
1	1366	1364	1319	4049
2	1364	1362	1317	4043
3	1319	1317	1273	3908
Z_j	4049	4043	3908	12000

Relationsströme v_{ijk}				
MIV	1	2	3	Q_i
1	1441	1156	1447	4045
2	1156	1498	1219	3873
3	1447	1219	1416	4082
Z_j	4045	3873	4082	12000
ÖV	1	2	3	Q_i
1	1341	1370	1244	3955
2	1370	1399	1357	4127
3	1244	1357	1316	3918
Z_j	3955	4127	3918	12000

Tabelle 5.11: Beispiel 3 – Planfall 1 (links): Veränderung der Topologie der Relation $\{2,3,\text{MIV}\}$ und Planfall 2 (rechts): erhöhte Reisezeit für die 2. Route der Relation $\{1,3,\text{ÖV}\}$.

Routenströme $v_{ijk\tau}$				
MIV	1	2	3	Q_i
1	1313	649 487	385 274 405 346	3860
2	649 487	1581	467 398 398	3979
3	385 274 405 346	467 398 398	1489	4161
Z_j	3860	3979	4161	12000
Routenströme $v_{ijk\tau}$				
MIV	1	2	3	Q_i
1	1465	646 516	402 307 413 270	4020
2	646 516	1528	471 380 380	3920
3	402 307 413 270	471 380 380	1438	4060
Z_j	4020	3920	4060	12000
Routenströme $v_{ijk\tau}$				
ÖV	1	2	3	Q_i
1	1274	1461	703 703	4140
2	1461	1677	882	4021
3	703 703	882	1551	3839
Z_j	4140	4021	3839	12000
Relationsströme v_{ijk}				
MIV	1	2	3	Q_i
1	1313	1136	1410	3860
2	1136	1581	1262	3979
3	1410	1262	1489	4161
Z_j	3860	3979	4161	12000
Relationsströme v_{ijk}				
ÖV	1	2	3	Q_i
1	1274	1461	1405	4140
2	1461	1677	882	4021
3	1405	882	1551	3839
Z_j	4140	4021	3839	12000
Relationsströme v_{ijk}				
MIV	1	2	3	Q_i
1	1465	1162	1392	4020
2	1162	1528	1230	3920
3	1392	1230	1438	4060
Z_j	4020	3920	4060	12000
Relationsströme v_{ijk}				
ÖV	1	2	3	Q_i
1	1320	1353	1307	3980
2	1353	1387	1340	4080
3	1307	1340	1293	3940
Z_j	3980	4080	3940	12000

Tabelle 5.12: Beispiel 3 – Planfall 3 (links): Änderung der Zugfolgezeit der Relation $\{2,3,\text{ÖV}\}$ und Planfall 4 (rechts): Verringerung der Kapazität für die 4. Route der Relation $\{1,3,\text{MIV}\}$.

Kapitel 6

Ergebnisse und Ausblick

Das Ziel der Arbeit war die Entwicklung eines Modells für die simultane Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung, Verkehrsaufteilung und Routenwahl. Das hier vorgestellte Modell EVA-U vereinigt die genannten Modellschritte.

Diese Arbeit wählt wichtige, bereits existierenden Modelle aus, beschreibt deren Ableitungen und Bewertungsfunktionen und integriert sie in dem neuen, ganzheitlichen Simultanmodell EVA-U. Die verschiedenen Bewertungsfunktionen einschließlich der Untersuchung ihrer Abbildungsqualität sind in dieser Arbeit dargestellt.

Ein Teil der Arbeit widmet sich der Monte-Carlo-Simulation der Routenwahl. Die Monte-Carlo-Simulation zeigt, dass verkehrsstärkenabhängige Umlegungsverfahren mit Bestwegroutensuchalgorithmus die Abhängigkeit von Routen prinzipiell berücksichtigen. Die praktische Anwendung der Simulation als Modell für die Generierung von MIV-Routen kann empfohlen werden. Die zu erwartenden Laufzeiten sind unwesentlich länger, dafür werden insbesondere unter der Bedingung einer geringen Verkehrsnachfrage mehr Routen gefunden. Die Zahl der Routen lässt sich leicht mit Hilfe der Abbruchbedingung und der Größe des Schätzparameters steuern.

Das Modell EVA-U führt eine einheitliche Bewertung der Alternativen auf Basis der Generalisierten Kosten ein. Der Routensuchalgorithmus und das Routenwahlmodell, welche bisher Bestandteile der Umlegung waren, werden aus dem Umlegungsverfahren herausgelöst. Die Routensuche wird in der Regel vor Beginn der Berechnung einmalig ausgeführt. Ein Routenwahlmodell wird mit den übrigen Nachfragemodellen vereint. Mit dem Modell EVA-U können sowohl tagesfeine als auch zeitscheibenfeine Verkehrsstrommatrizen ermittelt werden.

Weiterhin ist die Integration eines Verfahrens zur Modellierung der Parkstandwahl möglich und in dieser Arbeit beschrieben.

Das EVA-U-Modell erreicht ein stochastisches Nutzergleichgewicht und ist den universalen Logit-Modellen zuzuordnen. Die Basis des EVA-U-Modells ist das EVA-Simultanmodell. Zusätzliche Anforderungen an die empirischen Eingangsdaten im Vergleich zum EVA-Modell entstehen nicht. Die Lösung des entstehenden Gleichungssystems mit Nebenbedingungen ist mit den bekannten Lösungsalgorithmen möglich.

Gegenüber den bisherigen sequenziellen bzw. teilweise simultanen Modellen bzw. Verfahren wird aufgrund eines veränderten Berechnungsablaufes eine Verminderung der Rechenzeit bis zum Gleichgewichtszustand erwartet. Diese Zeiteinsparung ist möglich, da sich die Zahl der Routensuchen und der notwendigen Rückkopplungen verringert und da auf vormals erreichte Routenwahlergebnisse zurückgegriffen wird. Zusätzlich wirken die Berücksichtigung der Abhängigkeit und die Integration eines stochastischen Routenwahlmodells dämpfend auf das System.

Die Arbeit zeigt, wie P+R-Routen aus vorhandenen MIV- und ÖV-Routen generiert werden können. Die Berechnung der Nachfrage für P+R-Routen kann mit dem EVA-U-Modell erfolgen.

Der Aufwand für die praktische Umsetzung des Algorithmus als Computerprogramm wird insgesamt als gering eingeschätzt, wenn auf vorhandene Module zurückgegriffen werden kann. Vorausgesetzt, dass bereits Programmmodule mit Algorithmen für den Aufbau und für die Verwaltung von Netzmodellen aller Verkehrsarten, für die Suche und die Verwaltung von Routen, für die Lösung von n-linearen Gleichungssystemen mit Nebenbedingungen und für die Verwaltung von Matrizen vorhanden sind, sind lediglich die Vorschriften für die Bildung der EVA-U-Bewertungsgröße, für die Rückkopplung und Dämpfung sowie die Nutzerdialoge umzusetzen.

Für die Zukunft sind zunächst praktische Erfahrungen mit dem Modell EVA-U zu sammeln. Empirische Untersuchungen sind notwendig, um generell die Eignung der vorgeschlagenen Funktionen zu prüfen und um die Parameter beispielsweise der Gewichtsfunktionen in den Generalisierten Kosten, der Bewertungsfunktion für Routen und der Bewertungsfunktion für die Abhängigkeit von Routen festzustellen. Weiterer Untersuchungsbedarf existiert bezüglich der hinsichtlich Laufzeit, Routenset und Untersuchungsgebiet optimalen Kombination von Suchparametern und der Gestaltung des Berechnungsablaufs.

Anhang A

Definitionen und Erläuterungen

A.1 Details zum Logit-Modell

Das Logit-Modell hat seinen Ursprung in der ökonomischen Theorie (Zufallsnutzentheorie). Es gehört in die Gruppe der diskreten Entscheidungsmodelle. Diskrete Entscheidungsmodelle berücksichtigen, dass Nutzer zwischen einzelnen Alternativen wählen müssen. Es ist demnach nicht möglich, von zwei oder mehreren Alternativen jeweils nur einen Anteil zu verwenden. Ausführliche Darstellungen finden sich in BEN AKIVA [8], MAIER ET. AL. [35].

Die Auswahlwahrscheinlichkeit für Alternative k aus der Alternativenmenge (choice set) C eines Individuums sei

$$P(k) = P(k|C) \quad 0 \leq P(k|C) \leq 1 \quad .$$

Gemäß den Axiomen der Wahrscheinlichkeitsrechnung für disjunkte Ereignisse gilt für die Alternativen k, l ($k \neq l$)

$$P(k \text{ und } l \mid C) = 0$$

und

$$P(k \text{ oder } l \mid C) = P(k|C) + P(l|C)$$

Allgemein gilt für jede Teilmenge $C' \subseteq C$

$$P(C'|C) = \sum_{k' \in C'} P(k'|C) \quad .$$

Die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Alternative k aus einer Teilmenge C' gewählt wird, lautet

$$P(k|C) = \{P(k|C') \cdot P(C'|C)\} \quad .$$

Die grundlegenden Annahmen der Logit-Modelle sind in der folgenden Liste zusammengefasst:

- Ein Nutzer hat i.d.R. zwischen mehreren Alternativen k, k' auszuwählen. Die Menge der Alternativen wird mit C bezeichnet.
- Die Nutzer maximieren ihren Nutzen, d.h. sie werden unter allen verfügbaren Alternativen diejenige mit dem höchsten Nutzen U für sich auswählen.

$$U(k) \geq U(k')$$

Formal kommt man mit dieser Annahme zu einer Auswahlwahrscheinlichkeit für die Alternative k für den binomialen Fall

$$P(k) = P(U_k \geq U_{k'})$$

und für den multinomialen Fall

$$P(k) = P(U_k \geq \max_{k' \in C} (U_{k'})) \quad .$$

- Der Nutzen einer Alternative k kann weder durch den Nutzer noch durch einen Beobachter genau bestimmt werden. MAIER ET. AL. [35] gibt folgende Gründe an:
 - nicht alle relevanten Charakteristika der Alternativen sind bekannt,
 - nicht alle relevanten Charakteristika des Verkehrsteilnehmers sind bekannt,
 - manche relevanten Charakteristika lassen sich nicht exakt messen (Messfehler),
 - manche relevanten Charakteristika lassen sich nicht direkt, sondern nur über Hilfsvariablen messen.

Deshalb wird der Nutzenswert U_k als Zufallsvariable aufgefasst.

- Der Nutzen U_k wird in zwei Teile zerlegt, einen deterministischen V_k und einen stochastischen Anteil ϵ_k (Störterm). Der deterministische Anteil wird als Erwartungswert der Zufallsgröße interpretiert. Der Wert ϵ drückt aus, dass die tatsächlich realisierten Werte U_k zufälligen Störungen unterliegen und um den Erwartungswert schwanken:

$$U_k = V_k + \epsilon_k .$$

Damit ergibt sich die Auswahlwahrscheinlichkeit im multinomialen Fall

$$P(k) = P(V_k + \epsilon_k \geq \max_{k' \in C} (V_{k'} + \epsilon_{k'})) .$$

- Der deterministische Anteil ist eine Linearkombination der Form

$$V_k = \sum_{x'} \beta_{k,x'} \cdot w_{k,x'} .$$

Die Werte $w_{k,x'}$ sind die erklärenden Variablen x , die die Qualitäten einer Alternative beschreiben. Welche der Aufwände (Reisezeit, Reiseweite, Kosten, Bedienungshäufigkeit, ...) die erklärenden Variablen sind, hängt von der betrachteten Personengruppe und natürlich von der Alternative selbst ab. Jedem Term im Vektor $w_{k,i'}$ ist nur ein Parameter $\beta_{k,i'}$ zugeordnet. In der Literatur wird dies als *linear in den Parametern* bezeichnet, denn die Parameter β treten nur einzeln auf und nicht als Potenz oder Produkt, wie z.B. $\beta_{k,1} \cdot \beta_{k,2}$. Die Linearität in den Parametern ist eine willkürliche, jedoch hilfreiche Annahme, denn sie erleichtert die Schätzung dieser Parameter (z.B. in Stated-Preference-Schätzungen) wesentlich. Die Parameter β drücken die Vorlieben und Präferenzen der Individuen bezüglich eines bestimmten Kriteriums aus. Aufwände, wie z.B. die Reisezeit, verringern den Nutzen und deshalb ist der zugeordnete β -Wert negativ.

- Die Größe $w_{k,i'}$ selbst kann wiederum eine Funktion der Alternativenmenge C selbst und/oder der sozioökonomischen Charakteristik S des Individuums n sein:

$$w_{k,i'} = g_k(C, S_n) .$$

Die Funktion $g()$ darf nur eine (lineare oder nichtlineare) positiv monotone Transformationsfunktion sein.

- Es wird angenommen, dass die Störterme ϵ einer Gumbel-Verteilung folgen. Die Gumbel-Verteilung hat die Form einer Glockenkurve (Ähnlich-

keit zur Normalverteilung!), ist jedoch dabei leicht linksschief. Die Verteilungsfunktion lautet

$$P(X \leq \epsilon) = F(\epsilon) = \exp[-\exp(-\mu \cdot (\epsilon - \eta))]$$

und die Dichtefunktion ist

$$f(\epsilon) = \mu \cdot \exp(-\mu \cdot (\epsilon - \eta)) \cdot \exp[-\exp(-\mu \cdot (\epsilon - \eta))] \quad .$$

Dabei sind

μ	Skalierungsparameter, $\mu > 0$,
η	Lageparameter,
$\eta + \gamma/\mu$	Mittelwert, $\gamma \approx 0,577$ (Eulersche Konstante),
$\pi^2/6\mu^2$	Varianz.

In Abbildung A.1 sind Dichtefunktionen für die Gumbel-Verteilung mit unterschiedlichen Parametern dargestellt.

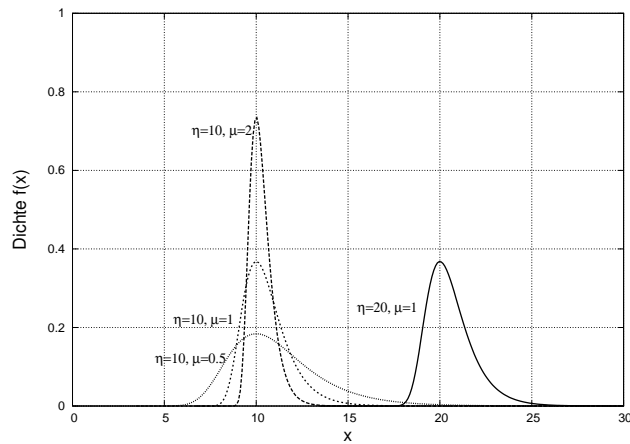


Abbildung A.1: Graphen der Gumbel-Verteilung

- Der Lageparameter η bestimmt die Lage des Gipfels der Glockenkurve. Der Parameter *könnte* benutzt werden, um die Störgröße gegenüber dem deterministischen Erwartungswert des Nutzens V_k auf der x-Achse zu

versetzen. Auf diesen Versatz wird allerdings aus praktischen Gründen verzichtet (d.h. $\eta = 0$), stattdessen bestimmt der deterministische Anteil der Nutzenfunktion die Lage des Gipfels der Glockenkurve $\eta := V$.

- Der Skalierungsparameter bestimmt die Breite der Glockenkurve. Dieser Parameter lässt sich unmittelbar aus der (vorzugebenden) Varianz bestimmen.
- Die betrachteten Alternativen sind immer *identisch verteilt*, d.h. ihre Verteilungen besitzen die gleiche Varianz. Da Varianz und Skalierungsparameter konstant proportional zueinander sind, besitzen die betrachteten Alternativen auch einen identischen Skalierungsparameter.
- Als *Parameter der Verteilung* werden i.d.R. die Lage- und Skalierungsparameter bezeichnet.
- Im Fall, dass mehr als zwei Alternativen zu berücksichtigen sind, muss die Verteilungsfunktion des Maximums von Gumbel-verteilten Zufallsgrößen $\max(f(\epsilon_1), \dots, f(\epsilon_l))$ gebildet werden. Die Gumbel-Verteilung hat die besondere Eigenschaft, dass diese Verteilung des Maximums wiederum Gumbel-verteilt ist mit den Parametern $[\eta; \mu]$

$$\left[\frac{1}{\mu} \ln \sum_{k' \in C} \exp(\mu \cdot \eta_{k'}) ; \mu \right] .$$

- Der Lageparameter des Maximums η wird auch als *Logsummenparameter* bezeichnet. Wie oben erwähnt, wird der Lageparameter gleich dem deterministischen Anteil des Nutzens gesetzt. In Abbildung A.2 sind die Verteilungen von drei Alternativen und die Verteilung des Maximums dargestellt. Der Skalierungsparameter (bzw. die Varianz) ist für alle Alternativen sowie auch für das Maximum identisch.
- Die Auswahlwahrscheinlichkeit ist

$$P(k) = P(V_k + \epsilon_k \geq \max_{k' \in C} (V_{k'} + \epsilon_{k'})) ,$$

wobei sich für das Maximum des Nutzens $\max_{k'} (V_{k'} + \epsilon_{k'})$ schreiben lässt

$$V^* = \frac{1}{\mu} \ln \sum_{k'} \exp(\mu \cdot V_{k'}) , \quad (\text{A.1})$$

und damit ist

$$P(k) = P(V_k + \epsilon_k - (V^* + \epsilon^*) \geq 0) .$$

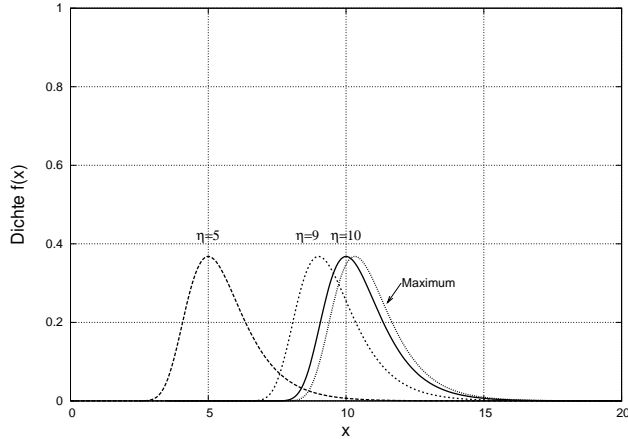


Abbildung A.2: Gumbel-Verteilungen von Alternativen ($\eta = 5, 9$ bzw. 10 ; $\mu = 1$) und deren Maximum ($\eta = 10, 86, \mu = 1$)

- Die Auswahlwahrscheinlichkeit für eine Summe $V_k + (-V^*)$ kann durch Faltung der Gumbel-verteilten Dichtefunktionen ermittelt werden. Im Ergebnis dieser Faltung entsteht die bekannte logistische Verteilungsfunktion

$$P(k) = \frac{\exp(\mu \cdot V_k)}{\sum_{k'} \exp(\mu \cdot V_{k'})} \quad . \quad (\text{A.2})$$

Nach BEN AKIVA [8], S. 107 kann $\mu = 1$ gesetzt werden.

$$P(k) = \frac{\exp(V_k)}{\sum_{k'} \exp(V_{k'})}$$

Der Parameter μ besitzt nur im Nested-Logit-Modell, nicht jedoch im einfachen Logit-Modell eine Bedeutung. Im einfachen Logit-Modell kann er gedanklich eliminiert werden, wenn er entweder in den Nutzenterm V_k einmultipliziert oder gleich Eins gesetzt wird. Falls $\mu = 0$ gilt (d.h. die Varianz strebt gegen unendlich), dann wird der tatsächliche Nutzen einer Alternative unbedeutend und die Auswahl einer Alternative gleichwahrscheinlich zu den anderen Alternativen.

Die IIA-Eigenschaft Mathematisch-formal ausgedrückt bedeutet die IIA-Eigenschaft

$$\frac{P(k|C')}{P(k'|C')} = \frac{P(k|C)}{P(k'|C)} \quad (\text{A.3})$$

mit

C', C Alternativenmengen, wobei $C' \subseteq C$,
 $P(k|C)$ Auswahlwahrscheinlichkeit P für Alternative k aus der
 Alternativenmenge C .

Das multinomiale Logit-Modell genügt dieser Bedingung, denn es lässt sich zeigen, dass

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\exp(V_1)}{\sum_{k'} \exp(V_{k'})} \bigg/ \frac{\exp(V_2)}{\sum_{k'} \exp(V_{k'})} = \exp(\mu(V_1 - V_2)) \quad .$$

Das Ergebnis enthält eine weitere interessante Information, nämlich dass die Auswahlwahrscheinlichkeit nur von der Differenz der deterministischen Nutzen zwischen den Alternativen abhängig ist.

A.2 Elastizität

Die Elastizität ϵ einer Funktion ist ein Zahlenwert, der angibt, wie stark sich die abhängige Größe ändert, wenn die unabhängige Größe verändert wird (BOSCH [14]). Es ist

$$\begin{aligned} \epsilon(x) &= \frac{\text{relative Änderung von } y}{\text{relative Änderung von } x} = \frac{\Delta y}{y} \div \frac{\Delta x}{x} \\ &= \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \cdot \frac{x}{f(x)} \quad , \\ \epsilon(x) &\approx x \cdot \frac{f'(x)}{f(x)} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Eine Nachfragefunktion für ein typisches Konsumgut hat eine fallende Elastizitätsfunktion. Das bedeutet, dass bei steigendem Preis die Nachfrage absinkt. Es ist üblich, die Elastizität für eine 1%-ige Änderung von x anzugeben.

Die *Kreuzelastizität* gibt an, wie sich die Nachfrage nach einem Gut ändert, wenn der Preis für ein anderes, konkurrierendes Gut variiert wird. Wenn z.B. die Fahrtkosten für die Nutzung des PKW steigen, dann verringert sich

die Nachfrage nach PKW-Fahrten (Elastizität) und erhöht sich die Nachfrage nach anderen Verkehrsarten (Kreuzelastizität). Die Elastizität einer Funktion kann konstant, linear oder nichtlinear sein (REBENTISCH [39]). Beispiele für Elastizitäten sind im Abschnitt 2.6 dargestellt.

A.3 Annahmen über das Verkehrsverhalten

Im Abschnitt 2.6 wurden Hypothesen über das Verhalten von Verkehrsteilnehmern formuliert. Die Hypothesen basieren auf verschiedenen Betrachtungen und Quellen, die im folgenden Text kurz dargestellt werden.

Hypothese 1: Das Gelegenheitsmodell entstand als Alternative zum klassischen Verteilungsmodell (siehe Abschnitt 2.2) in verschiedenen Modellvarianten (TOMAZINIS [51], ORTÚZAR et al. [36]). Bei Gelegenheitsmodellen werden – wie der Name schon andeutet – die Gelegenheiten zur Befriedigung von Bedürfnissen der Verkehrsteilnehmer betrachtet. Dieser Ansatz führt zu einer Definition von Zeitzonen (eine Zeitzone ist die [kreisringförmige] Differenz zweier Isochronen) rings um die Quelle i , deren verkehrliche Attraktivität durch die Zielpotenziale ZP beschrieben wird. Je weiter entfernt eine Zeitzone vom Ziel ist, desto größer ist ihre Attraktivität (Fläche des Kreisrings und damit auch die Zahl der Ziele ist größer). Gleichzeitig sinkt aber die Auswahlwahrscheinlichkeit (Bewertungsgröße), da alle Bedürfnisse möglicherweise schon in näher liegenden Zeitzonen erfüllt werden können.

Das Ergebnis der Berechnung ist abhängig von der Definition der Zeitzonbreite. SCHÖPPE hat bezüglich der optimalen Gestaltung der Zeitzonen eine (empirische) Untersuchung vorgenommen [44]. Die optimale Zeitzoneneinteilung besitzt unregelmäßige Isochronenabstände, wobei die erste Zeitzone die größte Ausdehnung aufweist. Das Ergebnis ist als Indiz zu werten, dass die Verkehrsteilnehmer für Ziele im Nahbereich keine differenzierende Betrachtung der Aufwände vornehmen, d.h. im Nahbereich gilt das Zufallsmodell. Eine Bewertungsfunktion, die dieses Verhalten abbildet, weist die Form einer Halbglockenkurve auf (im Nahbereich waagerechter Verlauf). Die von ORTÚZAR dargestellte Ableitung des Modells führt zu einer Bewertung von Zielpotenzialen mit Hilfe einer Exponentialfunktion. Allerdings wird in dieser Darstellung a priori von einer konstanten Zeitzonbreite ausgegangen.

In einer anderen Arbeit von KIRCH et al. [27], S. 7ff. werden die Widerstandsfunktionen für ein Gravitationsmodell untersucht. Dazu werden die mit dem Gravitationsmodell ermittelten Reiseweitenverteilungen ins Verhältnis zu den sich nach dem Gelegenheitsmodell ergebenden Gelegenheiten gesetzt. Das

Ergebnis ist ebenfalls eine Halbglockenkurve mit waagerechtem Verlauf im Nahbereich.

Hypothese 2: Ausgangspunkt der Überlegung sind die grundsätzlichen Annahmen des stochastischen Nutzergleichgewichtes (siehe auch Abschnitt 2.4 unter Punkt Gleichgewicht). Wenn Nutzer den Aufwand einer Route nicht genau kennen, dann können Routen mit geringfügig unterschiedlichen Aufwänden als gleichwertig wahrgenommen werden.

Im Gegensatz dazu erzeugt das multinomiale Logit-Modell eine Routenauswahlwahrscheinlichkeit, die bereits im Bereich geringster Umwege einen ausgeprägten negativen Anstieg aufweist (siehe Abbildung 2.8 unten). Systematische Erhebungen über die Routenwahl, d.h. mit Berücksichtigung von unterschiedlichen Reisedistanzen (Nah- und Fernverkehr) und in unterschiedlichen Netztopologien, sind ausgesprochen aufwändig und werden selten durchgeführt. Erhebungen für die Schätzungen der Parameter von Routenwahlmodellen (z.B. RAMMING [38], HOOGENDOORN et al. [24]) untersuchen häufig a priori nur Logit-Modelle (Exponentialfunktion) oder Probit-Modelle.

Hypothese 3: Indizien für die Annahme, dass abhängige Routen keine vollwertigen Routen darstellen, sind beispielsweise durch Betrachtung zur IIA-Eigenschaft (siehe 2.4.3) oder durch die Ergebnisse von Monte-Carlo-Simulationen (siehe Abschnitt 4.3.2) gegeben. HOOGENDOORN et al. [24] zeigen, dass die Verwendung eines Path-Size-Faktors im Vergleich zu einem Logit-Modell ohne Berücksichtigung der Abhängigkeit die Anpassung des Modells an empirische Daten verbessert.

Anhang B

Simulationsergebnisse

B.1 Simulationsprogramm

Die Abbildung B.1 zeigt die Eingabemaske des Simulationsprogramms.

Der folgende Text ist ein Ausschnitt aus einem Simulationsprotokoll mit der Zahl der Routen und der Zahl der Strecken, die die Gleichgewichtsbedingung nicht erfüllen.

```
*****
* Iterationsprotokoll
* Datum: 02.06.2003 16:17:57
*****
* Schritt; Anzahl differierender Strecken; Anzahl Routen
1; ; 9506
2; 2; 14034
3; 6; 17381
4; 6; 20341
5; 7; 22163
6; 6; 25541
7; 6; 26981
8; 5; 29224
9; 4; 30859
:
usw.
```

Ein anderes Protokoll und zeigt den Fortgang der Simulation an.

```
*****
* Protokoll
* Datum: 02.06.2003 16:17:57
* Netz: D:\D_Diss\VISUM\ver\grh.ver
```

The screenshot shows a Windows-style application window titled "Stochastische Umlegung". The interface is divided into several sections:

- Ein- und Ausgabe:** Contains input fields for "VISUM-versionsdatei", "Mode" (set to 'P'), "Fahrtenmatrix", "FMA-Faktor" (set to '1'), "BPRI-Parametersdatei", and "Ausgabeverzeichnis".
- Iteration:** Contains settings for "Lernverfahren" (radio buttons for "Lernverfahren" and "Stochastische Umlegung", with "Stochastische Umlegung" selected), "Kappa [%]" (set to '300'), "Abbruchgrenzwert" (sub-section with "P1" at '0.5' and "P2" at '0.33333'), "Lernformel" (sub-section with "UDelta" at '0.15' and "ODelta" at '0.5'), and "Max. Anzahl Iterationsschritte" (set to '1000').
- Buttons:** "Start" and "Schließen" buttons are located on the right side.
- Status:** A large empty text area at the bottom left for displaying status information.

Abbildung B.1: Hauptformular des Simulationsprogramms


```

* Matrix: D:\D_Diss\VISUM\fma\grh_pkw.fma
* Matrixfaktor: 1.2
* Umlegungsart:
* Faktor Kappa : 3
* P1: 0.5
* P2: 0.33333
* UDELTA: 0.15
* ODELTA: 0.5
* Max. Schritte: 1000
*****
02.06.2003 16:17:57 Lade Netzdaten...
02.06.2003 16:17:57 Starte VISUM
02.06.2003 16:18:34 Lade Version
                    Lade Verkehrssysteme
                    Lade Bezirksliste
                    Lade Strecken
                    Lade Anbindungen
                    Lade Abbiegebeziehungen
02.06.2003 16:18:41 Anz. gelesene Strecken: 3596
                    Ergnze Anbindungen
                    Anz. geladene Strecken: 3630
                    Schließe VISUM
                    Erzeuge Nachfolgerliste
02.06.2003 16:18:53 Lade Fahrtenmatrix
02.06.2003 16:18:53 Initialisiere Routenauswertung
02.06.2003 16:18:53 Initialisiere Routenspeicher
02.06.2003 16:18:53 Schritt 1
02.06.2003 16:18:53 Routensuche
02.06.2003 16:18:54 Stromumlegung
                    Max No. Links per Route: 99 Mean: 38,37
                    Same Hash: 0, davon wirklich identisch: 0
02.06.2003 16:18:55 T_akt aktualisieren
                    Abgelehnte Zeitwerte: 639
02.06.2003 16:18:55 Abbruchbedingungen prüfen
02.06.2003 16:18:55 T_schtz aktualisieren
02.06.2003 16:18:55 Schritt 2
02.06.2003 16:18:55 Routensuche
02.06.2003 16:18:56 Stromumlegung
                    :
                    usw.

```

Erzeugung von normalverteilten Zufallszahlen Die meisten Bibliotheken von Programmiersprachen bieten lediglich die Erzeugung von gleichverteilten Zufallszahlen an. Dieser Algorithmus verwendet gleichverteilte Zufallszahlen als Basis und erzeugt daraus normalverteilte Zufallszahlen (KNUTH [28]). Schritt 1: Zwei unabhängige, gleichverteilte Zufallszahlen g_1, g_2 im Bereich zwi-

schen 0 und 1 generieren.

$$\begin{aligned}v_1 &= 2 \cdot g_1 - 1 \\v_2 &= 2 \cdot g_2 - 1\end{aligned}$$

Schritt 2: s berechnen

$$s = v_1^2 + v_2^2$$

Schritt 3: wenn $s \geq 1$, dann mit Schritt 1 fortsetzen, sonst Schritt 4

Schritt 4: x_1 und x_2 berechnen

$$\begin{aligned}x_1 &= v_1 \cdot \sqrt{(-2 \cdot \ln(s))/s} \\x_2 &= v_2 \cdot \sqrt{(-2 \cdot \ln(s))/s}\end{aligned}$$

Die Werte x_1, x_2 sind die gesuchten normalverteilten Zufallszahlen im Bereich $N(0, 1)$. Die Umrechnung in Zufallszahlen anderer Normalverteilungen $x^* \in N(EX, DX)$ ist möglich durch die Beziehung

$$x^* = EX + DX \cdot x \quad .$$

B.2 Simulationsergebnisse Großenhain

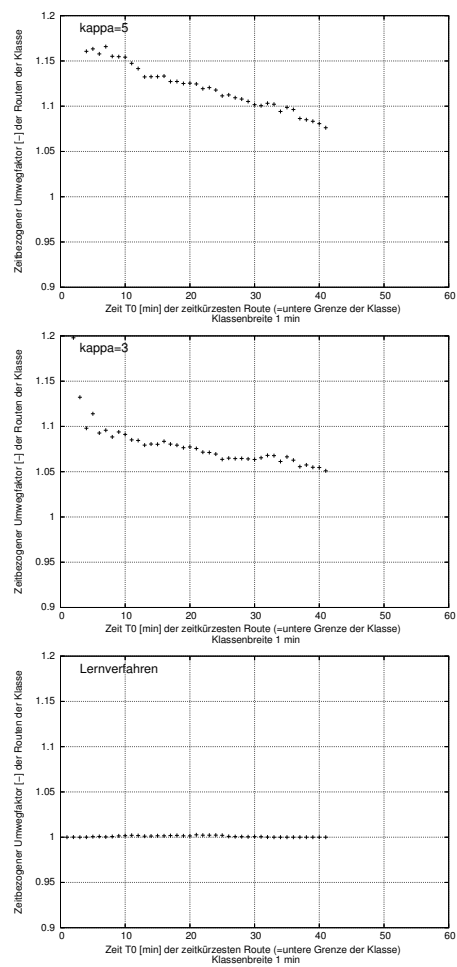


Abbildung B.2: Zeitbezogener Umwegfaktor der Routen im Netzmodell Grossenhain.

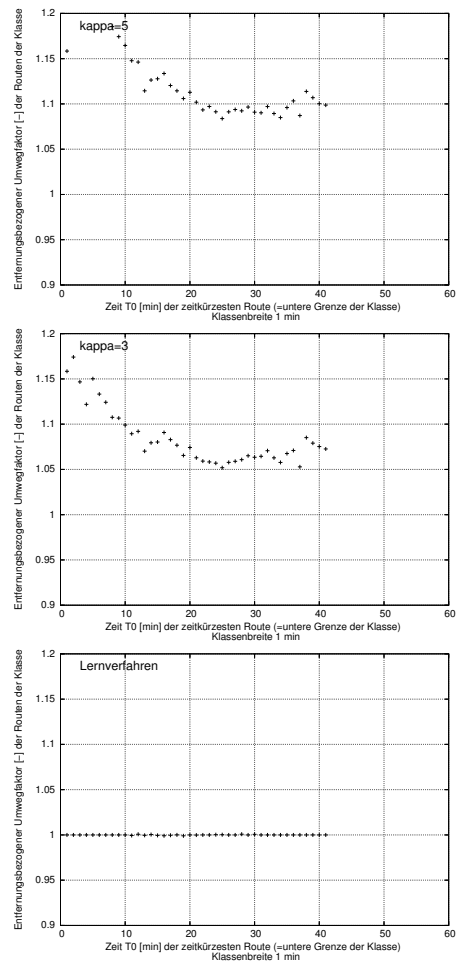


Abbildung B.3: Entfernungsbezogener Umwegfaktor der Routen im Netzmodell
Großenhain.

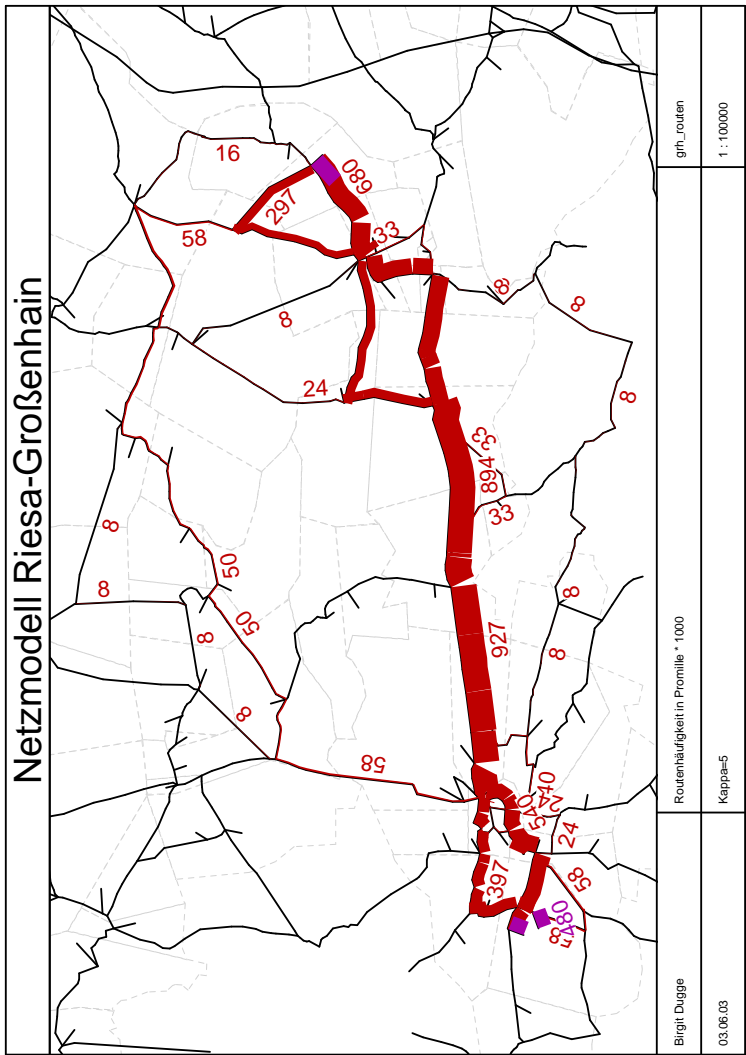


Abbildung B.4: Routen und Routenhäufigkeit zwischen zwei Bezirken im Netzmodell Großenhain. Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation mit $\kappa = 5$. Die Distanz zwischen Quell- und Zielbezirk beträgt ca. 17,5 km.

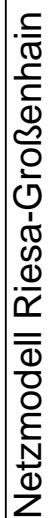


Abbildung B.5: Routen und Routenhäufigkeit zwischen zwei Bezirken im Netzwerkmodell Großenhain. Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation mit $\kappa = 3$.

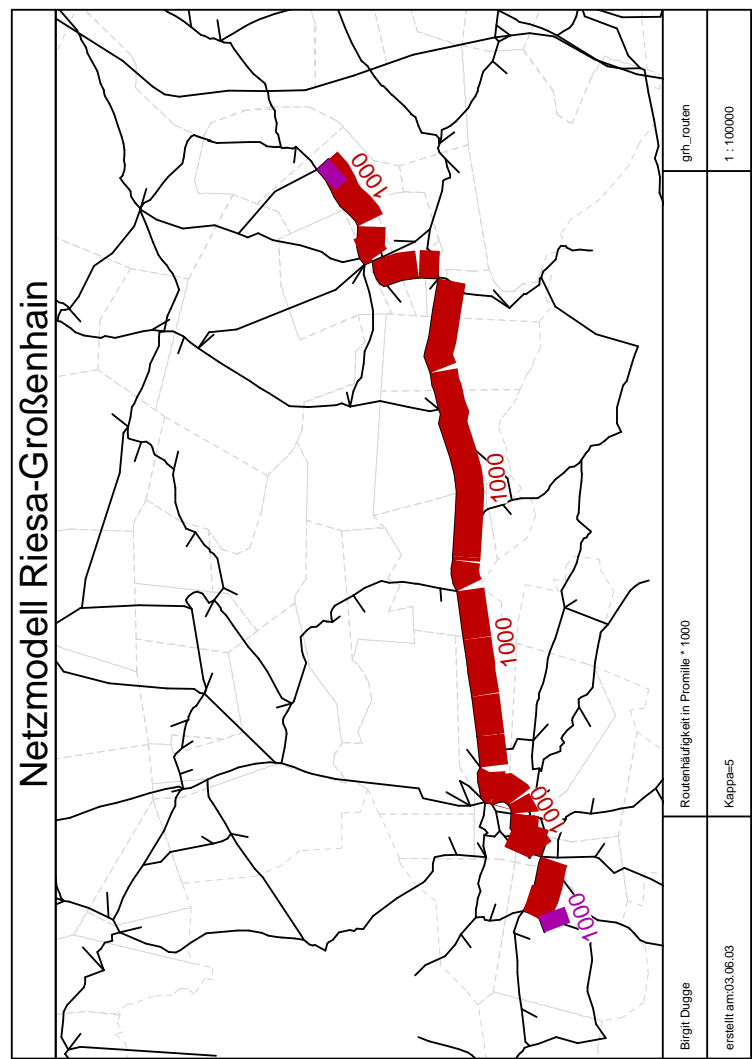


Abbildung B.6: Routen und Routenhäufigkeit zwischen zwei Bezirken im Netzmodell Großenhain. Ergebnisse des Lernverfahrens.

B.3 Simulationsergebnisse Dresden

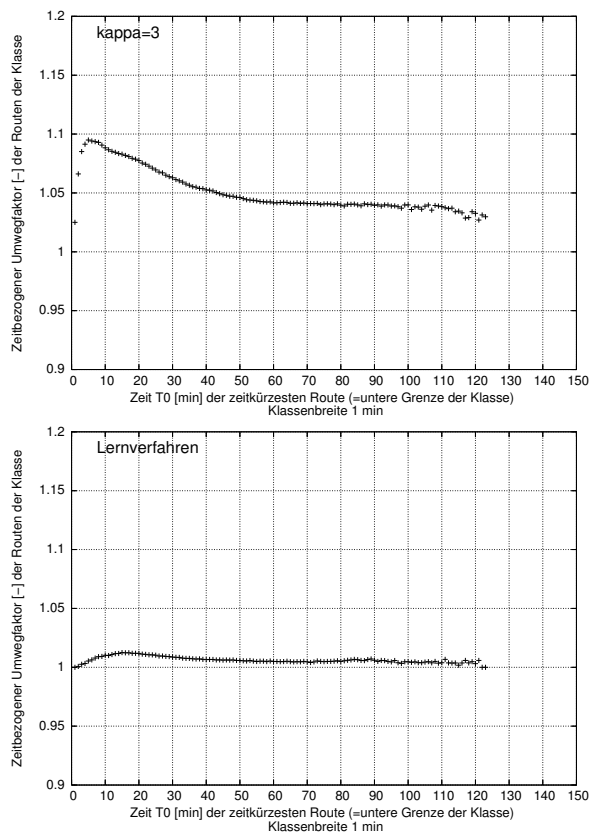


Abbildung B.7: Zeitbezogener Umwegfaktor der Routen im Netzmodell Dresden

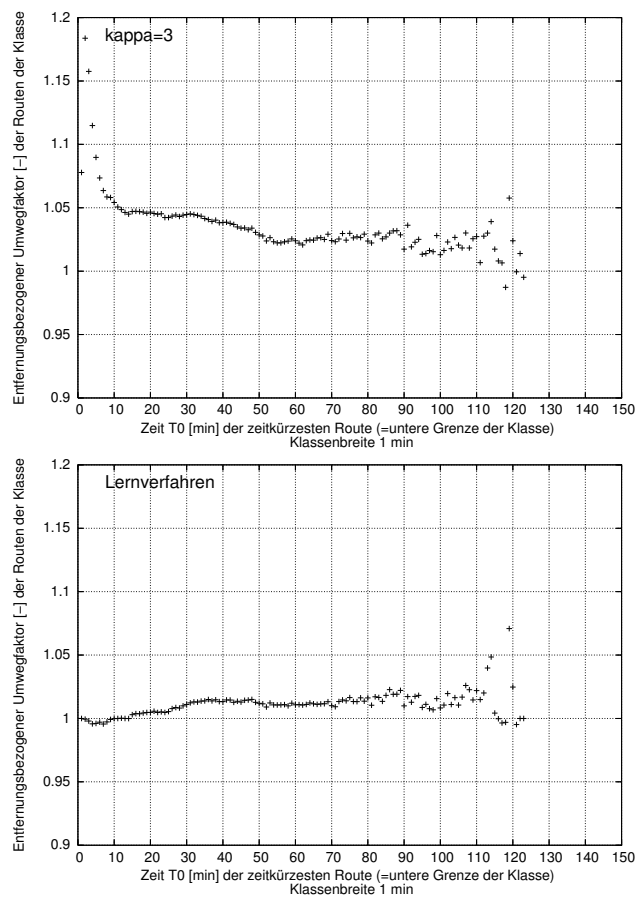


Abbildung B.8: Entfernungsbezogener Umwegfaktor der Routen im Netzmodell Dresden

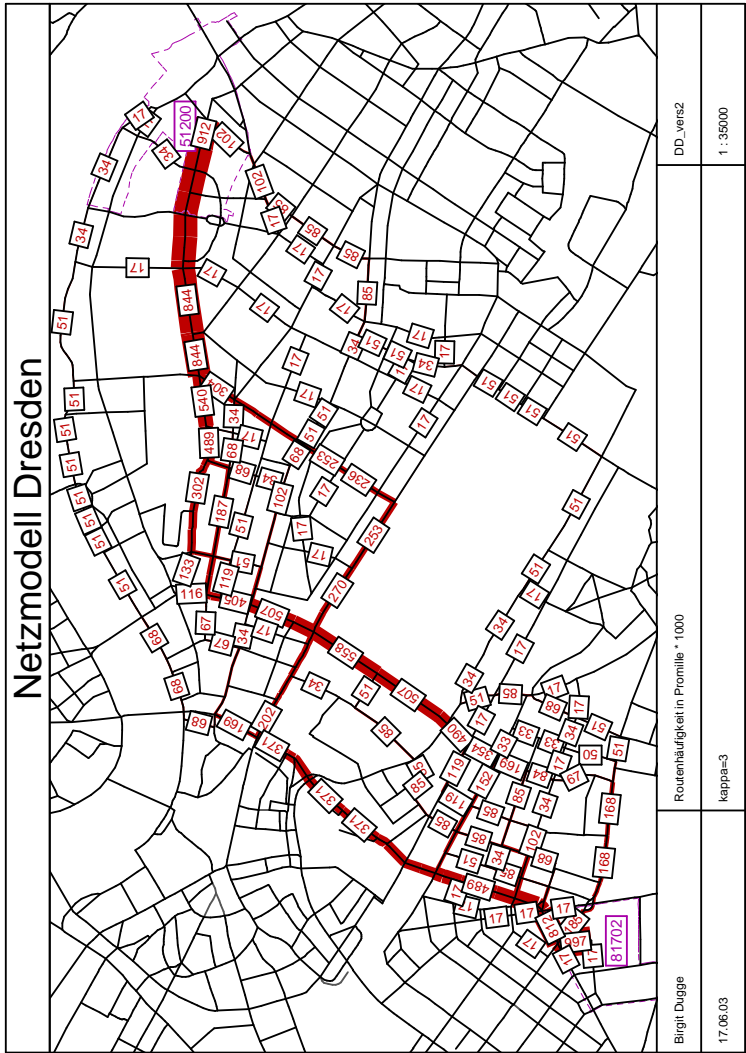


Abbildung B.9: Routen und Routenhäufigkeit zwischen zwei Bezirken im Netzmodell Dresden. Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation mit $\kappa = 3$.

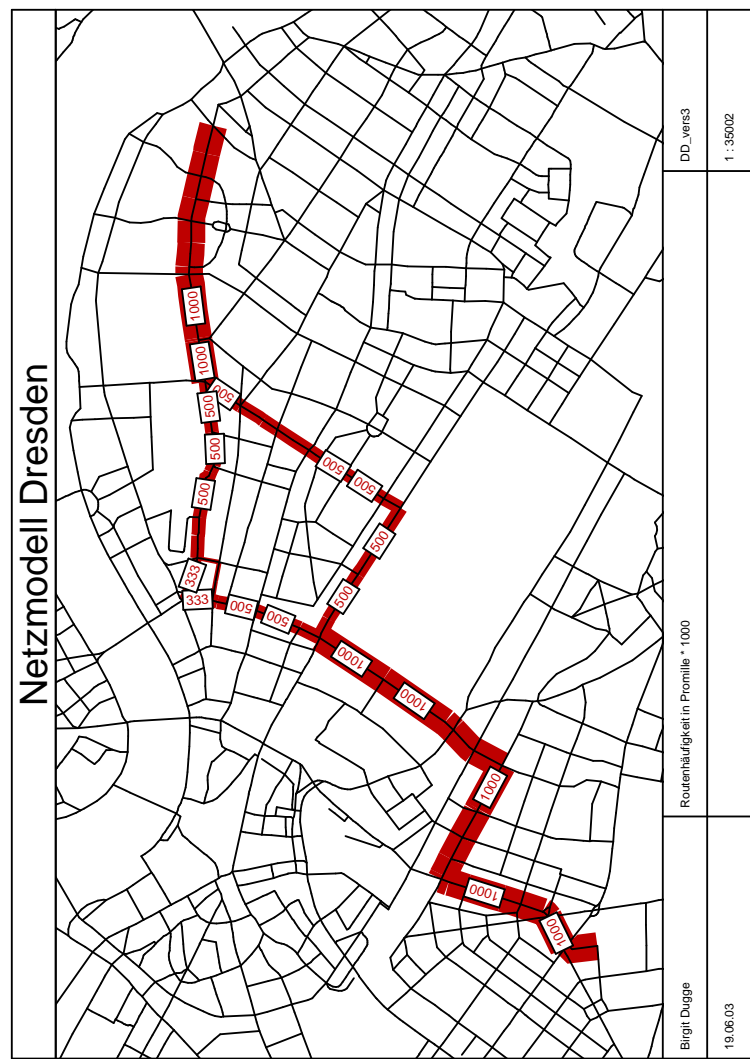


Abbildung B.10: Routen und Routenhäufigkeit zwischen zwei Bezirken im Netzmodell Dresden. Ergebnisse des Lernverfahrens.

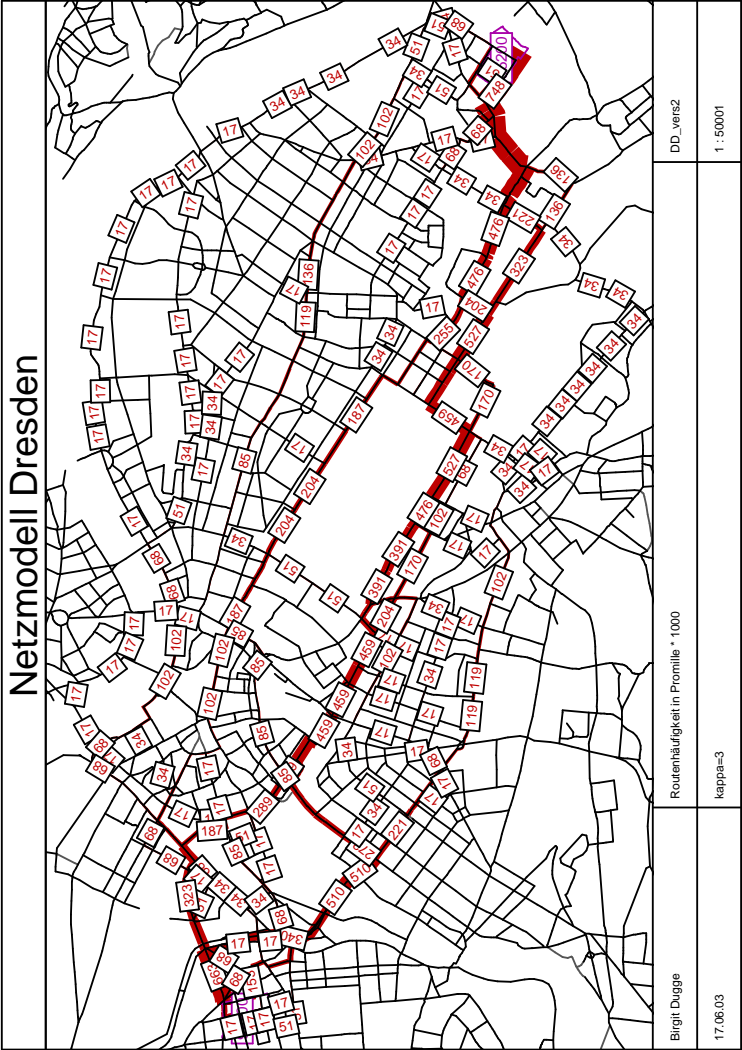


Abbildung B.11: Routen und Routenhäufigkeit zwischen zwei Bezirken im Netzmodell Dresden. Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation mit $\kappa = 3$.

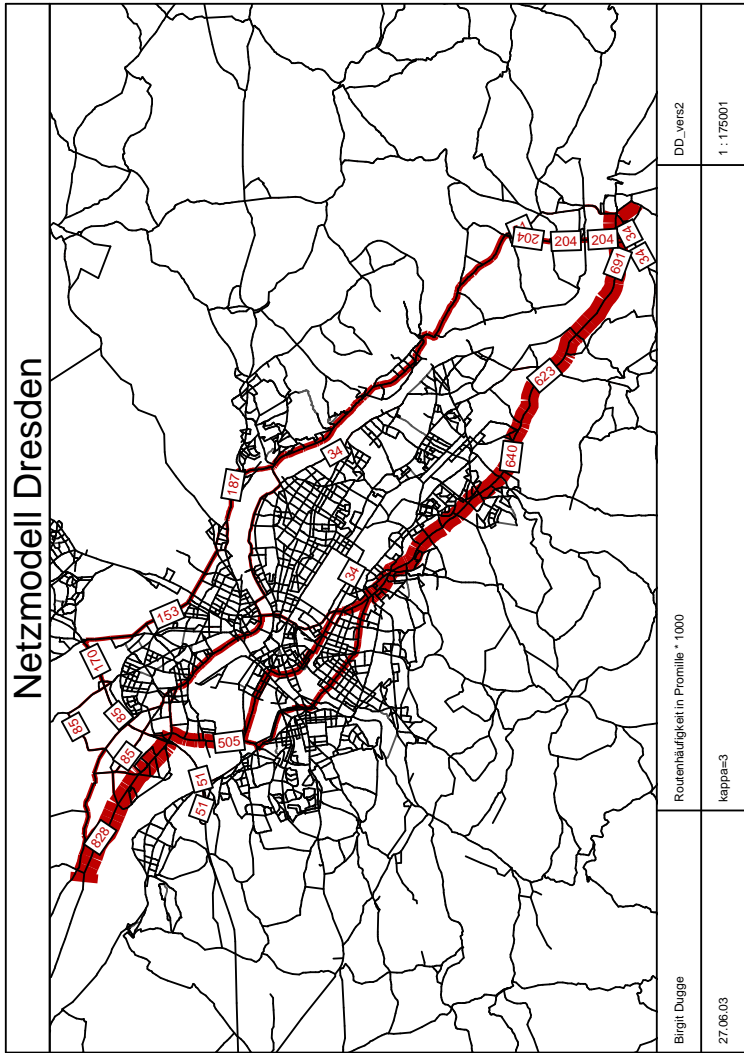


Abbildung B.13: Routen und Routenhäufigkeit zwischen zwei Bezirken im Netzmodell Dresden. Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation mit $\kappa = 3$.

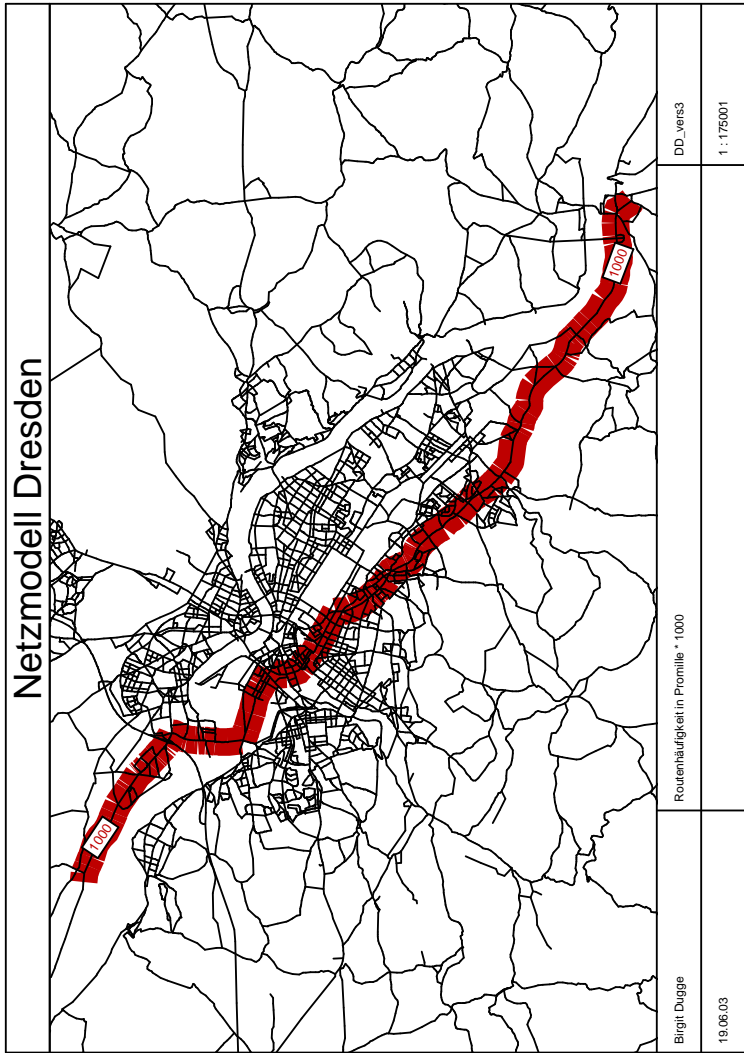


Abbildung B.14: Routen und Routenhäufigkeit zwischen zwei Bezirken im Netzmodell Dresden. Ergebnisse des Lernverfahrens.

Anhang C

Lösungsverfahren

C.1 Das trilineare MULTI-Verfahren

Nach LOHSE [43], S.257 ist die Iterationsvorschrift für das trilineare MULTI-Verfahren:

$$v_{ijk}^{(n+1)} = v_{ijk}^{(n)} \cdot \frac{q_i^{(n)}}{\bar{q}_i^{(n)}} \cdot \frac{z_j^{(n)}}{\bar{z}_j^{(n)}} \cdot \frac{a_k^{(n)}}{\bar{a}_k^{(n)}} \cdot f^{(n)} \quad (\text{C.1})$$

mit

$$\begin{aligned} q_i^{(n)} &= \frac{QP_i}{Q_i^{(n)}}, & z_j^{(n)} &= \frac{ZP_j}{Z_j^{(n)}}, & a_k^{(n)} &= \frac{AP_k}{A_k^{(n)}}, & f^{(n)} &= \frac{V}{V^{(n)}}, \\ Q_i^{(n)} &= \sum_{j'k'} v_{ij'k'}^{(n)}, & Z_j^{(n)} &= \sum_{i'k'} v_{i'jk'}^{(n)}, & A_k^{(n)} &= \sum_{i'j'} v_{i'j'k}^{(n)}, \\ \bar{q}_i^{(n)} &= \frac{\sum_{j'k'} v_{ij'k'} \cdot (z_{j'}^{(n)} + a_{k'}^{(n)})}{2 \cdot Q_i^{(n)}} \\ \bar{z}_j^{(n)} &= \frac{\sum_{i'k'} v_{i'jk'} \cdot (q_{i'}^{(n)} + a_{k'}^{(n)})}{2 \cdot Z_j^{(n)}} \\ \bar{a}_k^{(n)} &= \frac{\sum_{i'j'} v_{i'j'k} \cdot (q_{i'}^{(n)} + z_{j'}^{(n)})}{2 \cdot A_k^{(n)}} \end{aligned}$$

mit

n	Iterationsschrittzähler
$v_{ijk}^{(n)}$	Verkehrsstrom
Q, Z, A, V	Verkehrsaufkommen
QP, ZP, AP, V	Potenziale (aus der Erzeugung bekannt) $\sum_{i'} QP_{i'} = \sum_{j'} ZP_{j'} = \sum_{k'} AP_{k'} = V$

Initialisierung:

$$v_{ijk}^{(n+1)} = BG_{ijk}^0$$

mit der Basislösung für BG

$$BG_{ijk}^{(0)} = BG_{ijk} \cdot \frac{QP_i}{V} \cdot \frac{ZP_j}{V} \cdot \frac{AP_k}{V} \cdot f$$

$$f = \frac{V}{\sum_{i'j'k'} BG_{i'j'k'} \cdot \frac{QP_{i'}}{V} \cdot \frac{ZP_{j'}}{V} \cdot \frac{AP_{k'}}{V}} \quad .$$

Wenn für das Gleichungssystem auch das **Prognoseverfahren** (siehe Abschnitt 2.5.2) angewendet werden soll, dann ist folgende Basislösung zu verwenden:

$$BG_{ijk}^{(0)} = BG_{ijk} \cdot \frac{QP_i}{V} \cdot \frac{ZP_j}{V} \cdot f$$

$$f = \frac{V}{\sum_{i'j'k'} BG_{i'j'k'} \cdot \frac{QP_{i'}}{V} \cdot \frac{ZP_{j'}}{V}} \quad .$$

Die Iteration wird beendet, wenn folgende Bedingungen für alle Quell-, Ziel-, Verkehrsmittel- und das Gesamtverkehrsaufkommen erfüllt sind

$$|q_i^n - 1| \leq EQ_i, \quad |z_j^n - 1| \leq EZ_j,$$

$$|a_k^n - 1| \leq EA_k, \quad |f^n - 1| \leq EV,$$

mit den variablen Genauigkeitsschranken

$$EQ_i = 1/(GFQ \cdot \sqrt{Q_i}), \quad EZ_j = 1/(GFZ \cdot \sqrt{Z_j}) \quad ,$$

$$EA_k = 1/(GFA \cdot \sqrt{A_k}), \quad EV = 1/(GFV \cdot \sqrt{V}) \quad ,$$

wobei die Werte GFQ, GFZ, GFA und GFV die durch den Nutzer vorzugebenden Genauigkeitsfaktoren sind.

Literaturverzeichnis

- [1] *Benutzerhandbuch VISEM 4.10*. Karlsruhe, November 1999
- [2] *Benutzerhandbuch VISEVA*. Karlsruhe, 2000
- [3] *Benutzerhandbuch VISUM*. Karlsruhe, 2000
- [4] Städtepegel 1998, SrV Datenbank / TU Dresden. 2000. – Forschungsbericht
- [5] Kennziffern der Mobilität in der Stadt Frankfurt am Main. Ergebnisbericht der Verkehrserhebung 'Mobilität in Städten - SrV 2003' / TU Dresden, Verkehrs- und Infrastrukturplanung. 2004. – Forschungsbericht
- [6] BEKHOR, S.: *Integration of behavioral transport planning models with traffic assignment problem*, Israel Institute of Technology, Dissertation, 1999
- [7] BEN-AKIVA, Moshe ; BIERLAIRE, Michel: Discrete choice methods and their applications to short term travel decisions. In: *handbook of transportation science* (2000)
- [8] BEN-AKIVA, Moshe ; LERMAN, Steven R.: *Theory and application to travel demand*. Cambridge, Massachusetts : MIT Press, 1987
- [9] BEN-AKIVA, Moshe ; RAMMING, M. S.: *Lecture notes: Discrete choice models of travelers behavior in networks*. Prepared for advanced methods for planning and management of transportation networks. 25 May 1998
- [10] BHAT, Chandra R.: *Econometric choice formulations: alternative model structures, estimation techniques and emerging directions*. 2003 IATBR Conference, Lucerne, Switzerland. 2000

- [11] BIERLAIRE, Michel: A theoretical analysis of the cross-nested logit model; Technical Report RO-011218 / Swiss Insitute of Technology, Lausanne. 2001. – Forschungsbericht. URL:<http://roso.epfl.ch/mbi/>; Geladen am 18.07.03
- [12] BIES, Günther: *Mathematik für Ingenieure, Naturwissenschaftler, Ökonomen und Landwirte*. Bd. 21/2: *Graphentheorie*. Leipzig : BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1988
- [13] BOBINGER, Rupert: *Modellierung der Verkehrsnachfrage bei preispolitischen Maßnahmen*, TU München, Dissertation, 2001
- [14] BOSCH, Karl: *Mathematik-Taschenbuch*. München : R. Oldenbourg Verlag, 1998
- [15] BOSCH, Karl: *Statistik-Taschenbuch*. München : R. Oldenbourg Verlag, 1998
- [16] BURRELL, J.E.: *Multiple road assignment and its application to capacity restraint*. Proceedings of th 4th international symposium on the theory and traffic flow. 1968
- [17] CASCETTA, Ennio ; RUSSO, Francesco ; VIOLA, Francesco A.: A model of route perception in urban road networks. In: *Transportation Research Board Part B* 36 (2002), S. 557–592
- [18] DOMSCHKE, Wolfgang: *Einführung in Operations Research*. Berlin : Springer-Verlag, 1995
- [19] DUGGE, Birgit: *Feedback traffic demand and traffic supply using VISEVA and VISUM*. PTV-Anwenderseminar. Oktober 2002
- [20] FALKENHAUSEN, Hasso v.: *Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*. Bd. 58: *Ein stochastisches Modell zur Verkehrsumlegung*. Bonn : Bundesministerium für Verkehr, 1967
- [21] FELDGES, Michael: *Reisezeitprognose für dynamische Park-and-Ride-Systeme*. Aachen : RWTH Aachen, Institut für Straßenwesen, 1994 (Mitteilung Nr. 36)
- [22] FRIEDRICH, Markus: *Rechnergestützte Entwurfsverfahren für den ÖPNV im ländlichen Raum*, TU München, Dissertation, 1994

- [23] FRIEDRICH, Markus ; HOFSSÄSS, Ingmar ; WEKECK, Steffen: Timetable-based transit assignment using branch & bound. In: *Transportation Research Record* 1752 (2001), S. 100–107
- [24] HOOGENDOORN-LANSER, Sascha ; NES, Rob van ; BOVY, Piet: *Path-Size modeling in multi-modal route choice analysis*. 84th Annual Meeting Of The Transportation Research Board. 2004
- [25] INTRAPLAN: Berechnung zur P+R-Nachfrage an Haltestellen von Neu- und Ausbaustrecken (Schiene) / Hessisches Landesamt für Straßenbau. 1992. – Forschungsbericht
- [26] JUNGnickel, Dieter: *Graphen, Netzwerke und Algorithmen*. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 1994
- [27] KIRSCH, H. ; RAU, H. ; KALLENBERGER, W.: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*. Bd. 262: *Ein Beitrag zur Widerstandsfunktion für das Gravitationsmodell in Abhängigkeit prognostizierbarer struktureller Einflüsse*. Bonn : Bundesministerium für Verkehr, 1978
- [28] KNUTH, Donald: *The art of computer programming, volume 2: seminumerical algorithms*. London : Addison Wesley, 1969
- [29] KUTTER, E.: *Demographische Determinanten des städtischen Personenverkehrs*. Braunschweig : Institut für Stadtbauwesen der TU Braunschweig, 1972 (Heft Nr. 9)
- [30] LAMMOND, B. ; STEWART, N. F.: Bregman's balancing method. In: *Transportation Research Record* 158 (1981), S. 239–248
- [31] LENER, Claus: *Wegesuche zur Verkehrsumlegung in ÖV-Netzen*, Universität Stuttgart Fakultät Informatik, Diplomarbeit, Oktober 1997
- [32] LOHSE, Dieter: *Vorlesungsmanuskript Theoretische Verkehrsplanung*. 1992-2002
- [33] LOHSE, Dieter ; TEICHERT, Heidrun ; DUGGE, Birgit ; BACHNER, Gerald: *Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen*. Band 5. TU Dresden : Schriftenreihe des Institutes für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, 1997
- [34] MACK, Marcus: *Untersuchung von effizienten Algorithmen zur Bestimmung der k-kürzesten Wege innerhalb von ÖPNV-Verkehrsnetzen*, Universität Stuttgart Fakultät Informatik, Diplomarbeit, Juli 1996

- [35] MAIER, Gunther ; WEISS, Peter: *Modelle diskreter Entscheidungen*. Wien : Springer-Verlag, 1990
- [36] ORTÚZAR, Juan de D. ; WILLUMSEN, Luis G.: *Transport Modelling*. Chichester : John Wiley & Sons, Ltd., 2004
- [37] PATRIKSSON, Michael: *The traffic assignment problem: models and methods*. Utrecht : VSP, 1994 (Topics in Transportation)
- [38] RAMMING, M. S.: *Network knowledge and route choice*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Dissertation, 2002
- [39] REBENTISCH, Susanne: *Verkehrsnachfrage mit dem Modell EVA unter Einbeziehung der Kostenfunktion*, TU Dresden Fakultät Verkehrswissenschaften, Diplomarbeit, 2001
- [40] RIBBECK, Karl. F.: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*. Bd. 134: *Routensuche in Stadtstraßennetzen*. Bonn : Bundesministerium für Verkehr, 1972
- [41] SCHILLER, Christian: *Integration des ruhenden Verkehrs in die Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung*, TU Dresden, Dissertation, 2004
- [42] SCHMIEDEL, R.: *Bestimmung verhaltensähnlicher Personenkreise für die Verkehrsplanung*. Karlsruhe : Institut für Städtebau und Landesplanung der Universität Karlsruhe, 1984 (Heft Nr. 18)
- [43] SCHNABEL, Werner ; LOHSE, Dieter: *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*. Band 2. Berlin : Verlag für Bauwesen, 1997
- [44] SCHÖPPE, Ernst: Die Widerstandsabhängigkeit in Verkehrsmodellen und ihre Fahrtgruppenspezifik. In: *Die Straße*, Transpress Verlag Berlin (1974), S. 488–492
- [45] SCHÜLER, Thorsten: *Ein integriertes Netz- und Modal-Split-Modell als objektorientiertes System*, Universität Hannover, Dissertation, 1998
- [46] SCHÜRGER, Klaus: *Wahrscheinlichkeitstheorie*. München : R. Oldenbourg Verlag, 1998
- [47] SHEFFI, Y. ; POWELL, W.B.: An algorithm for the equilibrium assignment problem with random link times. In: *Networks* 12 (1982), S. 191–207

- [48] SHEFFI, Yosef: *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*. Cambridge : Massachusetts Institute of Technology, 1972
- [49] THEEG, Gregor: *Verkehrsnachfrageberechnung mit dem Modell EVA unter Beachtung von Generalisierten Kosten*, TU Dresden Fakultät Verkehrswissenschaften, Diplomarbeit, 2003
- [50] THUST, Martin: *Simultane Verkehrsmittelwahl, Verkehrsverteilung und Umlegung mittels hierarchischer Logitmodelle unter Einhaltung von Straßenkapazitäten*. Berlin : Verlag für Wissenschaft und Forschung, 1999
- [51] TOMAZINIS, A.: A new method of trip distribution in an urban area. In: *Highway Research Board Bulletin* 347 (1962)
- [52] TU DRESDEN ; PTV AG: Nachfrageberechnung bei flexiblem S-Bahn-Betrieb im Verdichtungsraum Dresden (INTERMOBIL) / Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). 2000-2003. – Forschungsbericht
- [53] TU DRESDEN ; PTV AG: Personennahverkehr für die Region: Ausschreibung und Modellierung von alternativen Bedienungsformen in Form von Teilnetzen unter Integration traditioneller Linienverkehre (AMABILE) / Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). 2002. – Forschungsbericht
- [54] VOVSHA, P. ; BEKHOR, S.: Link-nested logit model of route choice – Overcomming route overlapping problem. In: *Transportation Research Record* 1645 (1998), S. 133–142
- [55] VRTIC, Milenko: *Ein simultanes Routen- und Verkehrsmittelwahlmodell*, TU Dresden, Dissertation, März 2004
- [56] WILSON, A.G.: A statistical theory of spatial distribution models. In: *Transportation Research Board* 1 (1967), S. 253–269

Index

- a-priori/ a-posteriori-Wkt., 131
- Abbruchbedingung, 96, 153
- Abhängigkeit, 26, 29, 37, 118, 142
 - Commonality factor, 40
 - Eigenständigkeit, 41
 - Link-Nested-Logit-Modell, 48
 - PS-Faktor, 38
 - zeitlich im ÖV, 146
- Ableitung
 - BAYES'sches Axiom, 22
 - Entropiemaximierung, 19
 - EVA-U-Modell, 131
 - Informationsgewinn, 20
- Absprung von Routen, 120, 138
- Anbindungen, 83
- Auflösung von Straßenknoten, 85
- Aufteilung, *siehe* Verkehrsaufteilung
- Auswahlwahrscheinlichkeit, 62

- BAYES'sches Axiom, 22, 131
- Beispiel, 148, 170
- Besetzungsfaktor, 139
- Bestweghäufigkeit, 33, 100
- Bewertungsfunktionen, 62
 - Elastizität, 62
- Bewertungsgröße, 61, 77
 - Annahmen, 62, 194
 - EVA-Modell, 77
 - EVA-U-Modell, 135
 - Funktionen, 62
 - Generalisierte Kosten, 77
 - Mehrkosten, 141
 - P+R-Routen, 77
 - Routenwahl, 77
 - Simultanmodell, 77
 - Zusammenfassen von Aufwänden, 77
- Bewertungswahrscheinlichkeit, 22, 131
- Bezirke, 83
- Bilanzbedingung, *siehe* Randsummenbedingung
- Bilanzfaktoren, 19, 22, 131
 - für Routen, 165
- Box-Cox-Transformation, 73
- Box-Tukey-Transformation, 74

- C-Logit-Modell, *siehe* Logit-Modell
- Commonality factor, 40
- Cross-Nested-Logit-Modell, 48

- Deterministisches Gleichgewicht, 29

- Eigenständigkeit, 41, 146
- Eigenverkehr, 17
- Elastizität
 - Bewertungsfunktion, 62
 - Definition, 193
- Entropiemaximierung, 18
- Erzeugung, 5
 - bei Zeitscheiben, 155
- Erzeugungsrate, 6

- EVA-Bewertungsgröße, 77
- EVA-Modell, 51
- EVA-RV-Modell, 162
- EVA-Transformation, 74
- EVA-U-Modell, 127
 - Ablauf, 151
 - Bewertungsgröße, 135
 - Zeitscheiben, 155
- Fahrplan im ÖV, 88
- Fahrplangraph, 88
- Fixierung, 54
- Fremdanbindung, 162
- Funktion
 - EVA-~, 67
 - EVA2-~, 71
 - Exponential-~, 63
 - Modifikationen des Logit-Modells, 66
 - Potenz-~, 63
- Ganglinie ÖV, *siehe* Tagesganglinie
- Generalisierte Kosten, 77, 139
- Glättung, 96, 153
- Gleichgewicht, 29, 153
 - deterministisch, 27
 - stochastisch, 27
- Glelegenheitsmodell, 194
- Gravitationsmodell, 18
- Grundmodell der Verteilung, 18
- Gumbel-Verteilung, 24, 191
- Heimatstandort, 6, 58, 160
- homogene Schichten des Verkehrs, 5, 127
- Hybrid-Logit, *siehe* Logit-Modell
- IIA-Eigenschaft
 - Beispiel, 37
 - Beschreibung, 26
 - mathematische Definition, 192
- Independence Factor, 41
- Informationsgewinn, 18
- Inklusionsparameter, 48
- KIRCHHOFF-Modell, 32
- Kanten, 83
- Kapazitätsbeschränkung
 - Bezirk, 11
 - Knoten, 86
 - ruhender Verkehr, 162
 - Strecken, 85
- Kennwertmodell, 5, 6
- Knoten, 83
 - Auflösung, 85
 - Kapazitätsbeschränkung, 86
- Kopplung, 54
- Lösungsverfahren
 - Algorithmen, 215
 - bilineares Grundmodell, 24
 - EVA-U, 131
 - trilineares EVA-Modell, 58
- Lagefaktor, 22, 131
- Lernformel, 96
- Lernverfahren, 36, 96
- Linien im ÖV, 88
- Link-Nested-Logit-Modell, 48
- Logit-Modell
 - Ableitungen, 187
 - C-~, 40
 - Cross-Nested-~, 41, 48
 - Hybrid-~, 27
 - Link-Nested-~, 48
 - Multinomiales, 25
 - Nested-~, 43
 - PS-~, 38
 - universales ~, 51
- Logsummenparameter, 43, 191

- Mehrfachanbindung, 102
- Mehrkosten, 141
- Modellvarianten, 51
- Monte-Carlo-Simulation, 33, 96
 - Ablauf, 96
 - Besonderheiten, 100
- MSA-Algorithmus, 99, 153
- MULTI-Algorithmus, 215
- Multinomiales Logit-Modell, 25
- Nested-Logit-Modell, 43
- Netzmodell
 - ÖV, 88
 - MIV, 85
 - NMIV, 87
- Normalverteilung
 - Abschneiden, 100
 - Seiteneffekt, 100
- P+R
 - Bewertungsgröße, 77
- Parkstände, 162
- Parksuchzeit, 162
- Parkverdrängungsverkehre, 162
- Path Size factor, 38
- Potenzial, 5
 - Gegenüberstellung, 17
 - ruhender Verkehr, 164
- PR-Funktion, 162
- Probit-Modell, 27
- Prognose, 53, 215
 - EVA-U, 131
- PS-Logit-Modell, 38
- Quelle-Ziel-Gruppen, 6
 - ~-Typen, 6
- Randsummenausgleich, 15
 - bei Zeitscheiben, 157
- Randsummenbedingung, 54
- Erzeugung, 11
- EVA-Modell, 51
- EVA-U-Modell, 127
- Logit-Modelle, 51
- P+R-Parkstände, 165
- ruhender Verkehr, 164
- Verkehrsverteilung, 18
- Reisezeittest, 169
- Routen, 84, 166
 - Abhängigkeit, 37
 - Generierung, 166
 - im ÖV, 88
 - im Modell EVA-U, 166
 - intermodale ~, 92
 - P+R-~, 92, 167
 - Suchalgorithmen, 84
 - unsinnige, 169
- Routenanzahl, 48, 137
- Routenschablone, 168
- Routenwahl, 27
 - Abhängigkeit, 37, 38
 - Bewertungsgröße, 77
 - Deterministische Modelle, 35
 - Rückkopplung, 28
 - Stochastische Modelle, 31
 - Verkehrsstärkenabhängigkeit, 28
- Rückkopplung, 151
- Ruhender Verkehr, 162
- Schleifentest, 169
- Seiteneffekt, 33
- Simultanmodell
 - Bewertungsgröße, 77
 - Cross-Nested-Logit, 48
 - deterministisches Gleichgewicht, 60
 - EVA-Modell, 51
 - EVA-U-Modell, 135
 - hierarchische Logit-Modelle, 43
 - Nested-Logit-Modelle, 43

- Skalierungsparameter, 43, 191
- Spezifisches Verkehrsaufkommen, 6
- Stochastische Modelle, 31
- Stochastisches Gleichgewicht, 29
- Strecken, 83
- Tagesganglinie
 - im EVA-U-Modell, 147, 155
 - im Netzmodell, 87, 91, 167
- Transformationsfunktion, 73
 - Box-Cox- \sim , 73
 - Box-Tukey- \sim , 74
 - EVA- \sim , 74
- Überlappung, *siehe* Abhängigkeit
- Umlegung
 - determ. Gleichgewicht, 35
 - nach WARDROP, 35
 - Ablauf, 28
 - Lernverfahren, 36
 - Monte-Carlo-Simulation, 33
- Verkehrsangebot, 83
- Verkehrsartenpotenzial, 51
- Verkehrsaufteilung, 24
- Verkehrsaufkommen von Bezirken, 18
- Verkehrsaufteilung
 - Bewertungsgröße, 77
 - Modelle, 24
- Verkehrsmittelgunstfaktor, 53
- Verkehrsstärkenabhängigkeit, 28
- Verkehrsstromaufteilung, *siehe* Routenwahl
- Verkehrsverteilung, 18
- Verteilung, *siehe* Verkehrsverteilung
- WARDROP, 35
- WILSON-Modell, 18
- Wegeketten, 6
- Weglängentest, 169
- Zeitscheibe, 155
- Zufallszahlen, Erzeugung von \sim , 199
- Zusammenfassen von Aufwänden, 77

Bisher sind in dieser Schriftenreihe folgende Hefte erschienen:

Heft 1/1996:

KNÖBEL, WERMUTH, ACKERMANN, FÖRSCHNER: System repräsentativer Verkehrsbefragung 1994 (SrV Abschlusskolloquium)

Heft 2/1996:

RICHTER, BECKER, ELSEL: Emissionsabschätzung einer Ausfallstraße in Dresden

Heft 3/1997:

LOHSE, SCHNEIDER: Vergleichende Untersuchung der aggregierten und disaggregierten Verkehrsplanungsmodelle in der Deutschen Demokratischen Republik und der Bundesrepublik Deutschland unter Berücksichtigung vorhandener Daten aus Verkehrszählungen und Befragungen

Heft 4/1997:

LÄTZSCH: Die Wirkungsweise deterministischer und stochastischer Modell zur Umlegung des individuellen Kraftfahrzeugverkehrs bei Straßennetzberechnungen

Heft 5/1997:

LOHSE, TEICHERT, DUGGE, BACHNER: Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen – Verkehrsnachfragemodellierung –

Heft 6/1999:

KNOTE, KORN, LÄTZSCH, RINGEL, SCHNABEL: Bewertung des Verkehrsablaufes auf städtischen Hauptverkehrsstraßen – gezeigt am Beispiel der Reisezeitmessung in der Stadt Dresden

Heft 7/2003:

KNOTE: Die Kapazität von Nebenströmen auf städtischen Vorfahrtknoten

Heft 8/2004:

SCHILLER: Integration des ruhenden Verkehrs in die Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung

Heft 9/2006:

DUGGE: Ein simultanes Erzeugungs-, Verteilungs-, Aufteilungs- und Routenwahlmodell (EVA-U)