

Die Methodik der ökonomischen Bewertung von Verkehrsmaßnahmen in Multiagentensimulationen

Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung
des Grades eines Diplom-Ingenieurs.

Benjamin Kickhöfer
217671

Betreuer:
Prof. Dr. Kai Nagel
Dominik Grether

Technische Universität Berlin
Fakultät V (Verkehrs- und Maschinensysteme)
Institut für Land- und Seeverkehr (ILS)
Fachgebiet für Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik (VSP)

Berlin, Juni 2009

Kurzfassung

Die ökonomische Bewertung von Verkehrsmaßnahmen dient der Abschätzung ihrer volkswirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit. Dafür wird meist eine aggregierte Nutzen-Kosten-Analyse durchgeführt. Daneben beeinflusst die gesellschaftliche Akzeptanz entscheidend die Chancen einer Umsetzung. Dies wiederum legt nahe, dass eine Betrachtung individueller Nutzenänderungen der beteiligten Personen nötig ist: denn auch eine effizienzsteigernde Maßnahme könnte von einer Mehrheit der Bevölkerung abgelehnt werden, wenn die Wohlfahrtseffekte ungleich verteilt sind. Eine an das Projekt gekoppelte Kompensationen könnte ihre Akzeptanz erhöhen und so die Realisierung erleichtern. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass Multiagentensimulationen im Gegensatz zu handelsüblicher Verkehrsplanungssoftware in der Lage sind, Nutzenänderungen auf individueller Ebene darzustellen, welche durch veränderte Reisezeiten oder Kosten entstehen. Zunächst wird der Tagesverkehr der Metropolregion Zürich simuliert, um diese Ergebnisse aus erweiterten und geschätzten Nutzenfunktionen mit bestehenden Simulationen zu vergleichen. Anschließend wird in einem Testszenario der Einfluss einer Verkehrsmaßnahme auf die individuelle Wohlfahrt einer fiktiven Bevölkerung analysiert. Darauf aufbauend wird eine erste mögliche Ausgestaltung einer monetären Kompensation entwickelt, durch welche die gesellschaftliche Akzeptanz gesteigert werden könnte.

Abstract

In order to examine the efficiency of transport policies, usually an economic evaluation is conducted. In this context, cost-benefit-analyses are used to evaluate the overall welfare effect. Furthermore, public opinion strongly influences the project realisation leading towards the need of considering individual welfare change: due to unequally distributed welfare effects, an economically efficient project might not be supported by a majority of the population. A compensatory package that goes with the policy measure could help to increase public acceptability and thus facilitate its realisation. In this thesis, I show that multi-agent transport simulation – in contrast to conventional transportation planning tools – is able to illustrate welfare changes on an individual level which result from varying travel times or costs. Primarily, I simulate daily traffic of the Zurich metropolitan region in Switzerland in order to compare these results with my estimated and expanded utility functions to prior simulations. Subsequently, within a test case, I analyse the impact of a policy change on individual welfare levels. Based on the results, I deduce a possible design for compensatory packages that aim to improve public acceptability.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Die Modellierung individueller Entscheidungen	4
2.1	Grundlagen individueller Entscheidungsmodelle	5
2.1.1	Unterschiede zwischen ökonomischen und psychologischen Theorien zum Entscheidungsprozess.....	6
2.1.2	Theorie der diskreten Wahl (Discrete Choice Theory).....	7
2.2	Theorie der stochastischen Wahl.....	9
2.2.1	Random Utility Model.....	10
2.2.2	Binary Logit.....	11
2.3	Maximum Likelihood Schätzung mit BIOGEME.....	12
3	Die ökonomische Bewertung von Verkehrsmaßnahmen und deren Akzeptanz	19
3.1	Akzeptanz- und Umsetzungsprobleme verkehrspolitischer Maßnahmen	21
3.2	Indikatoren der Kompensation	23
3.2.1	Konsumentenrente	23
3.2.2	Kompensations- und Äquivalenzvariation.....	26
4	Vorstellung der Modellierungssoftware MATSim	29
4.1	Struktur von MATSim	30
4.2	Bewertung der Tagespläne (scoring).....	34
4.3	Variation und Auswahl der Tagespläne (replanning)	36
5	Erweiterung der MATSim-Nutzenfunktion um monetäre Einflussfaktoren ..	40
5.1	Schätzung der Verhaltensparameter	41
5.1.1	Eingangsdaten	42
5.1.2	Extraktion des Fußverkehrs	44
5.1.3	Bestimmung der Verhaltensparameter aller drei Verkehrsmittel	47
5.1.4	Vergleich der Zahlungsbereitschaften	48
5.2	Interpretation und Überführung in die MATSim-Nutzenfunktion	50
5.2.1	Interpretation der geschätzten Verhaltensparameter.....	50
5.2.2	Verhaltensparameter für verspätetes Eintreffen am Aktivitätenort	52
5.2.3	Überblick der geschätzten Nutzenfunktionen	53
6	Simulation eines Testszenarios	55
6.1	Modellkonfiguration	55
6.1.1	Testszenario mit Abfahrtszeitwahl	56
6.1.2	Testszenario mit Abfahrtszeit- und Verkehrsmittelwahl	56
6.2	Ergebnisse	58
6.2.1	Testszenario mit Abfahrtszeitwahl	58
6.2.2	Testszenario mit Abfahrtszeit- und Verkehrsmittelwahl	60

7	Anwendung auf ein reelles Szenario: Großraum Zürich.....	62
7.1	Modellkonfiguration	62
7.2	Ergebnisse	65
8	Integration des Einkommens in die MATSim-Nutzenfunktion	69
8.1	Theoretische Überlegungen.....	69
8.2	Auswahl des einkommensabhängigen Modells	70
8.2.1	Lineare Approximation des Logarithmus	73
8.2.2	Quadratische Approximation des Logarithmus	74
8.2.3	Überblick der einkommensabhängigen MATSim-Nutzenfunktionen.....	75
9	Simulation eines Testszenarios mit Einkommensabhängigkeit	76
9.1	Modellkonfiguration	76
9.1.1	Generierung einer fiktiven Bevölkerung mit realer Einkommensverteilung ..	76
9.1.2	Entwurf des Maßnahmenfalls	78
9.2	Ergebnisse	80
9.2.1	Plausibilitätsprüfung.....	80
9.2.2	Veränderung der individuellen Wohlfahrt und Kompensation.....	82
10	Fazit.....	86
	Literatur	88

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispielhafte Datei zur Modellspezifikation in BIOGEME.	14
Abbildung 2: Beispiel einer Output-Datei aus BIOGEME.....	16
Abbildung 3: Preis-Mengen-Diagramm.	24
Abbildung 4: Konsumentenrente, Kompensations- und Äquivalenzvariation.....	27
Abbildung 5: Die Prozess-Struktur von MATSim.....	30
Abbildung 6: Beispielhafte Beschreibung der initialen Verkehrsnachfrage einer synthetischen Person für einen gesamten Tag.....	32
Abbildung 7: Beispiel für einen Fragebogen der Befragung SP4.	43
Abbildung 8: Layout des Testnetzwerks mit Kapazitäten und Aktivitätenorten.	55
Abbildung 9: Ergebnisse des Testszenarios mit Abfahrtszeitwahl.	59
Abbildung 10: Ergebnisse des Testszenarios mit Abfahrtszeit- und Verkehrsmittelwahl.	61
Abbildung 11: Vergleich der beiden Simulationen: Tagesganglinien der abfahrenden Agenten über den Tag.....	65
Abbildung 12: Vergleich mit Verkehrszählstellen in Zürich: Mittlerer relativer Fehler des Testfalls (a) und des Vergleichsfalls (b).	66
Abbildung 13: Vergleich des Modal Split von Test- und Vergleichsfall.	67
Abbildung 14: Auswahl einer einkommensabhängigen Nutzenfunktion.....	71
Abbildung 15: Lorenzkurve des Kantons Zürich [blau], Approximation durch eine Polynomfunktion [schwarz] und Einkommenskurve [rot].....	77
Abbildung 16: Maßnahmen- und Vergleichsfall: Anzahl der Abfahrten ÖV. Verschobene Vormittagsspitze aufgrund der ÖV-Beschleunigung.	81
Abbildung 17: Maßnahmen- und Vergleichsfall: Anzahl der Abfahrten Auto. Entzerrung der Vormittagsspitze.....	81
Abbildung 18: Individuelle Nutzenänderungen durch die Beschleunigung und Verteuerung des öffentlichen Verkehrs.....	82
Abbildung 19: Nötige monetäre Kompensation zur Erhaltung des individuellen Nutzenniveaus.	84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispielhafter Aufbau der von BIOGEME verwendeten Daten.	13
Tabelle 2: Geschätzte Verhaltensparameter des Modells zur Extraktion des Fußverkehrs...46	
Tabelle 3: Gegenüberstellung der geschätzten Verhaltensparameter: Ausgangsstudie Vrtic et al. (2007) und eigene Schätzungen.	48
Tabelle 4: Gegenüberstellung der Values of Time in [CHF/h]: Ausgangsstudie Vrtic et al. (2007) und eigene Ergebnisse.	49
Tabelle 5: Übersicht der in den Testszenarien verwendeten Parameter.	57
Tabelle 6: Öffnungszeiten nach Aktivitätentyp.	63
Tabelle 7: Vergleich der verwendeten Verhaltensparameter: Rieser / Grether / Nagel (2008) und eigene Werte.	64
Tabelle 8: Vergleich verkehrsrelevanter Kenngrößen: Mittlere Fahrtweite und mittlere Reisezeit einer Fahrt.	68
Tabelle 9: Vergleich der verwendeten Verhaltensparameter: Maßnahmenfall und Vergleichsfall.	79

Abkürzungsverzeichnis

bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d. h.	das heißt
et al.	et alii
etc.	et cetera
f.	folgende
ff	fortfolgende
ggf.	gegebenenfalls
i. d. R.	in der Regel
IVT	Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme der ETH Zürich
ÖV	Öffentlicher Verkehr
pt	Public Transit (Öffentlicher Verkehr)
PKW	Personenkraftwagen
PTV AG	Planung Transport Verkehr Aktiengesellschaft
S.	Seite
u. a.	unter anderem
u. U.	unter Umständen
vgl.	vergleiche
VoT	Value of Time
z. B.	zum Beispiel

1 Einleitung

Die Planung von Verkehrsprojekten wird in vielen Ländern mit ökonomischen Analysen und Bewertungen unterstützt. Aufgrund begrenzter Haushaltsmittel der öffentlichen Hand müssen dabei meistens verschiedene Projekte oder unterschiedliche Varianten einer Maßnahme auf ihre ökonomische Vorteilhaftigkeit untersucht werden. Häufig soll aus den Ergebnissen der Bewertung eine Priorisierung der Maßnahmen abgeleitet werden. Die Nutzen-Kosten-Analyse spielt dabei in Deutschland und anderen Industrieländern eine entscheidende Rolle. So werden z. B. die größeren Verkehrsprojekte des Bundesverkehrswegeplans (BVWP) mittels dieser Bewertungsmethodik analysiert (BMVBW, 2003).¹ Überwiegen bei der Bewertung eines Projekts die aggregierten Nutzenzuwächse dessen Kosten, so gilt die Umsetzung aus ökonomischer Sicht als wohlfahrtssteigernd und damit als sinnvoll. Diese Sichtweise basiert auf der utilitaristischen Theorie von Mill (1863), welche nach dem größten aggregierten Nutzen aller beteiligten Personen strebt. In vielen Städten gewinnen insbesondere Maßnahmen zur Beschleunigung des öffentlichen Verkehrs oder zur Optimierung der Kapazitätsauslastung immer mehr an Bedeutung. Eine Lösung der Verkehrsprobleme durch stetige Kapazitätserweiterungen erzielte in der Vergangenheit nicht die gewünschten Effekte und ist heutzutage aufgrund von Flächenmangel häufig nicht mehr möglich. Deshalb werden zunehmend auch Maßnahmen in Erwägung gezogen, die eine Steuerung des Mobilitätsverhaltens über ökonomische Anreize zulassen. Das bekannteste Beispiel dafür ist die City-Maut.

Entscheidend für die Realisation ist neben der ökonomischen Vorteilhaftigkeit aber letztlich der politische Wille und damit die gesellschaftliche Akzeptanz. Verteilt sich bspw. die Wohlfahrtssteigerung nur auf einen kleinen Teil der Bevölkerung, so muss mit hartem Widerstand der betroffenen Bevölkerungs- und Lobbygruppen gerechnet werden. Daher erscheint es nötig, verschiedene Möglichkeiten einer Kompensation jener zu untersuchen, die nicht direkt von der Maßnahme profitieren können. Bei sinnvoller Ausgestaltung würde so u. U. ein Großteil der Bevölkerung eine Wohlfahrtssteigerung wahrnehmen, wodurch die gesellschaftliche Akzeptanz deutlich steigen würde. Multiagentensimulationen sind im Gegensatz zu handelsüblicher Verkehrsplanungssoftware in der Lage, Nutzenänderungen durch veränderte Reisezeiten oder Kostenschwankungen auf individueller Ebene darzustellen. Als innovatives Hilfsmittel könnten derartige Simulationen die Arbeit von Planungsbehörden bei der Gestaltung von gesellschaftlich akzeptierten Verkehrsprojekten in

¹ Neben der Nutzen-Kosten-Analyse sind seit dem BVWP 2003 zusätzlich eine erweiterte Umweltverträglichkeitsprüfung und eine Raumwirksamkeitsanalyse Bestandteil der Bewertungsmethodik.

Zukunft nachhaltig unterstützen. So könnte bspw. untersucht werden, welcher Anteil der Bevölkerung das betrachtete Projekt unterstützen würde, je nachdem wie die daran gekoppelte Kompensationsmaßnahme ausgestaltet wird.

Bisher standen für MATSim keinerlei aus Befragungsdaten abgeleitete Verhaltensparameter zu Verfügung. In den bestehenden Simulationen des Großraums Zürich wurden Verhaltensparameter verwendet, die aus dem bekannten Flaschenhalsszenario von Vickrey (1969) und Arnott et al. (1990) abgeleitet wurden. Außerdem wurde bisher weder der Einfluss der Treibstoffkosten für das Auto noch des Fahrpreises für den öffentlichen Verkehr berücksichtigt. Auch die Bewertung dieser Kosten in Abhängigkeit vom individuellen Einkommen der Agenten, war bislang nicht einbezogen worden (Rieser / Grether / Nagel, 2008).

Im Rahmen dieser Arbeit werden Multiagentensimulationen durchgeführt, die auf realen Befragungsdaten aus der Schweiz basieren. Dafür werden zum einen reisezeitabhängige Verhaltensparameter anhand eines diskreten Wahlmodells (Discrete Choice Model) geschätzt, die dann Eingang in die Nutzenfunktionen der simulierten Agenten finden. Zum anderen werden diese Nutzenfunktionen, welche die Präferenzen der betrachteten Personen abbilden, um monetäre Einflussfaktoren ergänzt. So kann neben der Reisezeit nun auch der Einfluss der Treibstoffkosten und des Fahrpreises mitbetrachtet werden. Dadurch können in Zukunft realitätsnahe Vorhersagen des Verkehrsbildes abgeleitet werden, welches sich nach Durchführung einer Verkehrsmaßnahme ergeben wird. In einem dritten Schritt wird untersucht, wie eine sinnvolle monetäre Kompensation ausgestaltet sein könnte, die direkt mit einer geplanten Maßnahme einhergeht. Dafür werden die Nutzenfunktionen um das individuelle Einkommen erweitert, wobei nicht - wie in weiten Teilen der Literatur üblich - von konstantem, sondern von abnehmendem Grenznutzen des Einkommens ausgegangen wird. Die Auswirkungen der Maßnahme auf die personenbezogenen Wohlfahrtsniveaus kann damit entlang der Einkommensverteilung aufgetragen und analysiert werden.

Die Struktur der Arbeit stellt sich demnach wie folgt dar: In Kapitel 0 bis 4 werden die theoretischen Grundlagen für die weitere Bearbeitung gelegt. Kapitel 0 erläutert die Modellierung individueller Entscheidungen im Allgemeinen und anhand diskreter Wahlmodelle im Besonderen sowie die Parameterschätzung mittels der verwendeten Software BIOGEME. Kapitel 3 gibt einen Überblick über die Literatur zu Akzeptanz- und Umsetzungsproblemen verkehrspolitischer Entscheidungen und geht genauer auf die Möglichkeiten der ökonomische Bewertung von Verkehrsmaßnahmen ein. In Kapitel 4 ist die Funktionsweise der für die Simulationen verwendeten Verkehrsmodellierungssoftware MATSim dargestellt. Kapitel 5 bis 9 stellen den methodischen Teil dieser Arbeit dar. Die

Schätzung der reisezeit- und reisekostenabhängigen Verhaltensparameter und deren Interpretation für die Nutzenfunktion sind Bestandteil von Kapitel 5. Auf dieser Basis werden in Kapitel 6 Simulationen in einem Testszenario durchgeführt, um dann nach Ableitung einiger Zwischenergebnisse in Kapitel 7 den Tagesverkehr im Großraum Zürich zu simulieren. In Kapitel 8 werden die Nutzenfunktionen um einen einkommensabhängigen Term erweitert, wobei die Schätzungen als Ausgangspunkt für ein zweites Testszenario in Kapitel 9 dienen. Abschließend fasst Kapitel 10 die wichtigsten Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungen.

2 Die Modellierung individueller Entscheidungen

In vielen Bereichen der Wirtschaftswissenschaften wird versucht, aus Rahmenbedingungen und vermuteten Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen theoretische Modelle zu konstruieren. Anhand dieser Modelle, die unter bestimmten Annahmen den Anspruch haben allgemeingültig zu sein, können Wirtschaftsprognosen bspw. über Angebots- und Nachfrageentwicklung abgeleitet werden. Die Ökonometrie hat zum Ziel, diese wirtschaftswissenschaftlichen Theorien über Wirkungszusammenhänge und Verhaltensweisen anhand statistischer Methoden auf ihren empirischen Gehalt hin zu überprüfen. Bis spät in die 1960er Jahre wurden dabei überwiegend aggregierte Daten verwendet, die sich auf einen bestimmten Markt oder die gesamte Volkswirtschaft bezogen. So beschreibt auch das lange Zeit zur Analyse der Verkehrsnachfrage verwendete Gravitationsmodell die aggregierte Verkehrsnachfrage zwischen Quell- und Zielbezirken in Abhängigkeit von Bezirksattraktivität und generalisierten Reisekosten (McFadden, 2000, S. 1). Die Einschränkung dieser aggregierten Analyse liegt auf der Hand: es können keine Aussagen über die zugrunde liegenden individuellen Entscheidungen der Akteure auf dem jeweiligen Markt getroffen werden. Auch ist es unmöglich abzuleiten, welche Verhaltensänderungen mögliche (regulatorische) Maßnahmen am Markt auf individueller Ebene nach sich ziehen. Genau diese exaktere Quantifizierung einzelner Entscheidungseinflüsse steht seit Anfang der 1970er Jahre im Mittelpunkt der *mikroökonomischen* Forschung. Die Mikroökonomie gewann seither immer mehr an Bedeutung, auch weil leistungsfähigere Rechner und intelligente Software die Analyse von großen Datenmengen möglich machten. Die disaggregierte verhaltensbasierte Analyse der Verkehrsnachfrage beispielsweise liefert im Vergleich zur makroskopischen Analyse einem politischen Entscheidungsträger deutlich mehr Informationen über die zugrunde liegenden individuellen Entscheidungsprozesse der Akteure. Denn genau diese werden auf der Basis von Befragungen und Beobachtungen modelliert. So können nun Fragen zur Entwicklung des Modal Splits, des Fahrtenaufkommens und der Zeitwahl von Fahrten, die sich durch größere Eingriffe in das Verkehrssystem ergeben, deutlich detaillierter dargestellt und analysiert werden. Allerdings ergeben sich beim Arbeiten mit Mikrodaten auch Interpretationsprobleme, die erst durch die richtungsweisenden Forschungen von Heckman (1971) und McFadden (1974) angegangen wurden.

Im Zuge dieser Arbeit kommen einige mikroökonomische Modelle zur Anwendung, die dann in mikroskopischen, verhaltensbasierten Verkehrssimulationen verwendet werden. Aus diesen Gründen wird in den folgenden Abschnitten ein Überblick über die theoretischen Grundlagen in diesem Gebiet gegeben. Dabei wird immer der Bezug zu verkehrsrelevanten

Anwendungen gesucht, um die Relevanz der Grundlagen für diese Arbeit zu illustrieren. Abschnitt 2.1 fasst dafür die Grundlagen individueller Entscheidungsmodelle zusammen, während Abschnitt 2.2 stochastische Modelle vorstellt. Abschnitt 2.3 erläutert schließlich die Funktionsweise des in dieser Arbeit verwendeten Softwaretools BIOGEME, welches konzeptionell auf den vorgestellten Modellen aufbaut.

2.1 Grundlagen individueller Entscheidungsmodelle

Das Verhalten einer großen Anzahl von Individuen, welches im Verkehr sowohl als aggregierte aber auch als fein aufgelöste Nachfrage beobachtet werden kann, ist das Ergebnis von individuellen Entscheidungen, die u. U. voneinander abhängig sind. Will man Aussagen über die zukünftige Entwicklung dieser Entscheidungen treffen, die als Reaktion auf eine geplante verkehrspolitische Maßnahme entstehen, benötigt man ein Verhaltensmodell. Ziel eines solchen Modells ist es, die für die Maßnahme relevanten Aspekte des Verhaltens der Akteure beschreiben zu können und eine gewisse Allgemeingültigkeit herzustellen. Häufig soll im Weiteren das Ergebnis dieser Entscheidungen quantifiziert werden. Dies stellt eine dritte Anforderung an das Modell dar: es muss mittels schätzbarer und messbarer Parameter spezifiziert werden können (Ben-Akiva / Lerman, 1985, S. 31). Allerdings existiert kein allgemein anerkanntes Modell zur Beschreibung des menschlichen Entscheidungsprozesses. Die vorhandenen Modelle, welche häufig aus der psychologischen Forschung abgeleitet werden, unterscheiden sich vor allem in der Detailgenauigkeit, in der sie die Entscheidungsfindung modellieren. Nach Ben-Akiva / Lerman (1985) sind jedoch den meisten von ihnen folgende vier Elemente gemein: es existiert (1) eine Person, die zwischen verschiedenen (2) Alternativen anhand deren (3) Attribute mittels einer (4) Entscheidungsregel zu einer Auswahl zwischen den Alternativen kommt. Im Allgemeinen wird angenommen, dass die Alternativen für die Person einerseits bekannt und andererseits bezüglich ihrer Charakteristika durchführbar sind. Darüber hinaus wird zwischen kontinuierlich substituierbaren und diskreten, sich gegenseitig ausschließenden Alternativen unterschieden. Letztere sind in der Verkehrswissenschaft relevant, wo sich Personen beispielsweise zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln entscheiden müssen und führt so direkt zu Modellen diskreter Wahl, der Discrete Choice Theory. Bei einer solchen Wahl wird angenommen, dass die Alternativen anhand ihrer Attribute wie Reisezeit, Kosten, Komfort, Zuverlässigkeit etc. von der betreffenden Person evaluiert werden. Die Art und Weise, die man der entscheidenden Person für ihre Bewertung unterstellt, bestimmt schließlich die modellbildende Entscheidungsregel. Es kommt in der Realität selten vor, dass eine Alternative alle anderen in sämtlichen Attributen dominiert oder

dass nur ein einziges Attribut ausschlaggebend ist. Deshalb wird unterstellt, dass jede Person im Zuge des Entscheidungsprozesses die Alternativen anhand der für sie relevanten Attribute bewertet. Letztendlich ergibt sich so für jede Alternative eine bestimmte Attraktivität als einzelner numerischer Wert auf einer ordinalen Skala – der Nutzen.² Diese Interpretation macht es möglich, dass z. B. ein Verkehrsmittel gewählt wird, obwohl es teurer ist als ein anderes aber dafür Reisezeiteinsparungen oder mehr Komfort bieten kann. Zu beachten ist, dass diese Vorstellung der individuellen Entscheidungsfindung explizit nicht voraussetzt, dass die absoluten Nutzenunterschiede zwischen den Alternativen in irgendeiner Form bewertet werden müssen oder mit denen einer anderen Person aufgerechnet werden. Ein außen stehender Beobachter kann also nicht beurteilen, ob die Bewertung der Alternativen sinnvoll war oder nicht, da er die zugehörige, nur der entscheidenden Person bekannte Zielfunktion nicht kennt. Auf die Bewertung von Nutzenunterschieden und den sich daraus ergebenden Problemen wird ausführlicher in Kapitel 3 eingegangen.

2.1.1 Unterschiede zwischen ökonomischen und psychologischen Theorien zum Entscheidungsprozess

Das Vorhandensein einer dauerhaft gültigen Entscheidungsregel setzt voraus, dass die Person sich innerhalb des Prozesses konsistent und rational bezüglich ihrer Ziele verhält. Hier herrscht ein deutlicher Unterschied zwischen der Sichtweise von Psychologen und Ökonomen auf den Entscheidungsprozess. Mit dem ökonomischen Standardmodell, welches unterstellt, dass unabänderbare Präferenzen oder Nutzen in (wenn auch nur intern) rationaler Art maximiert werden, lassen sich keinerlei gemütsabhängige oder veränderliche Entscheidungen erklären. Nach der psychologischen Sichtweise wird die Entscheidungsregel allerdings fortlaufend durch Erfahrungen und Lernvorgänge immer im Bezug auf die momentanen Rahmenbedingungen verändert (Ben-Akiva et al., 1999, S. 188f). Die Problematik dieses Ansatzes ergibt sich durch die schwierige Quantifizierbarkeit der Einflüsse. Zwar kann angenommen werden, dass beispielsweise die morgendliche Fahrt zur Arbeit aufgrund der häufigen Wiederholungen einem rationalen Kalkül unterliegt, weshalb das ökonomische Standardmodell in diesem Falle eine gute Approximation der Verkehrsnachfrage liefern kann. Dennoch sei angemerkt, dass es z. B. bei der Vorhersage von Freizeitverkehr deutlich schlechtere Ergebnisse liefern könnte und deshalb eine Integration weiterer Elemente der psychologischen Sichtweise sinnvoll wären. Aus diesen Gründen wurde das ökonomische Modell in der Vergangenheit häufig in Frage gestellt und in

² Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Begriffe Attraktivität und Nutzen analog verwendet.

spieltheoretischen Experimenten teilweise widerlegt. Die Notwendigkeit einer Aufweichung der getroffenen Annahmen erkannten schließlich u. a. Luce / Suppes (1965) und McFadden (1974), welcher das auf Thurstone (1927) zurückgehende stochastische Nutzenmodell weiterentwickelte.

2.1.2 Theorie der diskreten Wahl (Discrete Choice Theory)

In der Verkehrswissenschaft kommt es häufig zu Entscheidungssituationen, in denen sich eine Person zwischen sich gegenseitig ausschließenden Alternativen entscheiden muss.³ Derartige Situationen sind beispielsweise bei der Wahl zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln oder zwischen sich einander ausschließenden Tagesplänen gegeben. Auf der Wahl zwischen verschiedenen Tagesplänen, innerhalb derer eine Person ihre gewünschten Aktivitäten in einer bestimmten Reihenfolge anordnet, basiert die in dieser Arbeit verwendete Verkehrssimulationssoftware MATSim.⁴ In der Discrete Choice Theory wird zunächst dem ökonomischen Standardmodell gefolgt und davon ausgegangen, dass die entscheidende Person beständige und transitive Präferenzen hat und ihren Nutzen maximiert (Ben-Akiva / Lerman, 1985, S. 38 und Train, 2003, S. 19). Dies bedeutet, dass die Person unter identischen Umständen ihre Wahl wiederholen wird und dass gilt:

$$U_{car} > U_{pt} \wedge U_{pt} > U_{bike} \Rightarrow U_{car} > U_{bike} \quad (2.1)$$

Hierbei bezeichnet U den Nutzen der Verkehrsmittel Auto (*car*), öffentlichem Verkehr (ÖV bzw. public transit = *pt*) und Fahrrad (*bike*). Wenn also die Fahrt mit dem Auto mehr Nutzen erzeugt als die Fahrt mit dem ÖV **und** die Fahrt mit dem ÖV mehr Nutzen erzeugt als die Fahrt mit dem Fahrrad, dann folgt daraus, dass auch die Fahrt mit dem Auto mehr Nutzen erzeugen muss als die Fahrt mit dem Fahrrad.

Um nun innerhalb des Modells einen Nutzenwert für jede der verfügbaren Alternativen zu erhalten, müssen Annahmen über die Natur der Nutzenfunktionen getroffen werden. Dieser Schritt korrespondiert mit der Modellierung des internen Abwägens und Bewertens einer entscheidenden Person. Durch die Formulierung der Nutzenfunktionen werden also implizit Annahmen über die Präferenzen des Entscheiders getroffen. Diese beziehen sich einerseits auf die Charakteristika der Alternativen, andererseits aber auch auf die Merkmale der

³ Neben der gegenseitigen Ausschließbarkeit der Alternativen, nennt Train (2003, S. 16) noch zwei weitere nötige Charakteristika der Wahlalternativen: erstens müssen alle möglichen Alternativen in der Auswahl vertreten sein und zweitens muss die Anzahl der Alternativen endlich sein, damit die Discrete Choice Theory angewendet werden kann.

⁴ Eine ausführliche Darstellung der Funktionsweise des Programms findet sich in Kapitel 4.

entscheidenden Person. Häufig werden additive, lineare Nutzenfunktionen gewählt, wie z. B. die folgenden:

$$U_{car} = \underline{x}'\underline{\beta} + \underline{z}'\underline{\delta} \quad (2.2)$$

$$U_{pt} = \underline{x}'\underline{\lambda} + \underline{z}'\underline{\mu} \quad (2.3)$$

Der Vektor \underline{x} beinhaltet die verkehrsmittelabhängigen Einflussfaktoren auf das Nutzenniveau, während der Vektor \underline{z} sozioökonomische Charakteristika zusammenfasst, die ihrerseits den Nutzen aus den Alternativen beeinflussen.⁵ Dazu zählen z. B. das Einkommen der Person, die Verfügbarkeit eines Autos oder einer Zeitkarte für den öffentlichen Verkehr. Die genannten Vektoren müssen nicht zwangsweise identisch für die unterschiedlichen Verkehrsmittel sein. Häufig wird das Modell in der Anwendung aus Mangel an Daten auch auf rein verkehrsmittelabhängige Einflussvariablen wie Fahrzeit und Fahrtkosten reduziert. Hier soll der Fokus aber auf den Verhaltensparametervektoren $\underline{\beta}$ bzw. $\underline{\lambda}$ liegen: man nehme an, dass mehrere Beobachtungen über die Verkehrsmittelwahl einer Person vorhanden sind. Diese korrespondieren mit verschiedenen Wahlsituationen, die z. B. aus Variationen der Fahrzeit resultieren. Im Rahmen der Discrete-Choice-Modelle wird nun versucht, die Parametervektoren $\underline{\beta}$ bzw. $\underline{\lambda}$ so zu optimieren, dass das Modell für das von der Person gewählte Verkehrsmittel immer den höchsten Nutzen ausgibt. Wenn allerdings nicht alle Entscheidungen durch die optimierten Vektoren erklärt werden können, so ist die Transitivitätsannahme verletzt (Ben-Akiva / Lerman, 1985, S. 47). Dieses Problem tritt bei den meisten in der Praxis verwendeten und durch Befragungen oder Beobachtungen gewonnenen Daten auf und kann nicht einfach nur auf Erfassungs- oder Entscheidungsfehler zurückgeführt werden. Letztendlich führte die häufige Verletzung der Transitivitätsannahme zur Entwicklung der stochastischen Entscheidungsmodelle, welche dieses Phänomen durch latente, nicht beobachtete Einflussgrößen zu erklären versuchen wie in Abschnitt 2.2 erläutert wird.

Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass die Form der verwendeten Nutzenfunktionen beliebig gewählt werden kann, mit dieser aber automatisch Annahmen über die Präferenzen der Person getroffen werden. So könnte es bspw. vorkommen, dass für manche Personen eine Erhöhung der Reisezeit um eine Stunde nicht mit einer proportionalen sondern mit einer überproportionalen Nutzeneinbuße bewertet wird. In

⁵ Vektoren werden im Rahmen dieser Arbeit grundsätzlich mit einem Unterstrich gekennzeichnet.

diesem Fall würde ein unterstellter linearer Zusammenhang den Effekt der Reisezeit auf die Wahl des Verkehrsmittels unterschätzen.

2.2 Theorie der stochastischen Wahl

Die Notwendigkeit einer Weiterentwicklung des ökonomischen Standardmodells zur Entscheidungsfindung zwischen diskreten Alternativen ergab sich daraus, dass beobachtete Wahlentscheidungen zum Teil nicht plausibel erklärt werden konnten. So konnte in Experimenten beobachtet werden, dass sich Personen, obwohl sie sich in äußerlich identischen Entscheidungssituationen befanden, nicht immer dieselbe Wahlentscheidung reproduzierten. Dies korrespondiert mit einer Verletzung der Annahmen über konsistente und transitive Präferenzen, die für die uneingeschränkte Gültigkeit der ursprünglichen Discrete Choice Theorien nötig sind. Ebenso konnte beobachtet werden, dass sich verschiedene Individuen mit identischen Wahlmöglichkeiten und sozioökonomischen Charakteristika u. U. nicht für dieselben Alternativen entscheiden (Ben-Akiva / Lerman, 1985, S. 49). Für diese Abweichung des Modells von der Beobachtung wurden von Luce / Suppes (1965) zwei unterschiedliche Interpretationsansätze nahegelegt: Es könnte sein, dass Individuen ihre Wahl grundsätzlich zufällig treffen, und dies zu den abweichenden Ergebnissen führt; dabei wird unterstellt, dass die Nutzen aus den Alternativen konstant sind (**Constant Utility Model**). Oder aber die Wahlentscheidung der Personen *erscheint* dem Beobachter nur zufällig, da er nicht in der Lage ist den gesamten Entscheidungsprozess zu verstehen oder nicht alle entscheidungsrelevanten Einflüsse in sein Modell aufgenommen hat; hier wird davon ausgegangen, dass die Nutzen einen zufälligen Fehlerterm beinhalten (**Random Utility Model**). Beide Modelle haben nicht zum Ziel, die Auswahl einer Person vorherzusagen, sondern berechnen lediglich die **Auswahlwahrscheinlichkeiten** aller Alternativen. Während die erste Interpretation jedoch der ökonomischen Vorstellung des nutzenmaximierenden Individuums widerspricht, ist die zweite Sichtweise immer noch mit ihr vereinbar. Denn dort wird angenommen, dass der Beobachter *die wahren Nutzen* der Person, die sich aus den Alternativen ergeben, schlichtweg *nicht kennt*. Darüber hinaus können anhand der zweiten Interpretation auch Verhaltensmodelle erklärt werden, die nicht auf der Annahme einer nutzenmaximierenden Person beruhen (Train, 2003, S. 18). Anders gesagt bedeutet dies, dass Random Utility Modelle deutlich weniger restriktiv bzgl. ihrer Annahmen sind. Aus diesem Grund wurden sie von McFadden (1975) zur Entwicklung des „conditional logit model“ verwendet, das heute als „multinomial logit model“ (MNL) bekannt ist. Im Folgenden soll ein Überblick über die

mathematische Formalisierung des Random Utility Model im Allgemeinen und des in dieser Arbeit verwendeten „binary logit model“ im Speziellen gegeben werden.

2.2.1 Random Utility Model

In diesem Model besteht die Annahme, dass die Nutzen U_i und U_j , die einer Person aus der Wahl einer der beiden verfügbaren Alternativen i oder j entstehen, von einem außenstehenden Beobachter nur zum Teil abgebildet werden können.⁶ Dieser deterministische Nutzenanteil wird in den Gleichungen (2.4) und (2.5) mit V_i bzw. V_j notiert. Alle nicht betrachteten oder nicht beobachtbaren Attribute der Alternativen oder Charakteristika der Person werden in den zufälligen Fehlertermen ε_i und ε_j abgefangen:

$$U_i = V_i + \varepsilon_i \quad (2.4)$$

$$U_j = V_j + \varepsilon_j \quad (2.5)$$

Um im Einklang mit der ökonomischen Theorie zu bleiben wird angenommen, dass die Person ihren Nutzen über beide Alternativen maximiert. Dies geht aufgrund des Fehlerterms aber nicht zwangsläufig mit einer Maximierung des deterministischen Teils einher. Anhand dieser Annahme und der Zuhilfenahme der Gleichungen (2.4) und (2.5) ergibt sich die Wahlwahrscheinlichkeit P_i für Alternative i zu:

$$\begin{aligned} P_i &= P(U_i > U_j) \\ &= P(V_i + \varepsilon_i > V_j + \varepsilon_j) \\ &= P(\varepsilon_j - \varepsilon_i < V_i - V_j) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Dies bedeutet zunächst, dass die Wahrscheinlichkeit Alternative i zu wählen lediglich von der relativen Attraktivität respektive Nutzen dieser Option gegenüber der anderen abhängt (Train, 2003, S. 19). Dies gilt sowohl für die interne Entscheidung der Person als auch für das Modell. In letzterem kann es jedoch dazu kommen, dass zwar der deterministische Nutzen von Alternative i den von j übertrifft, die Differenz der zufälligen Fehlerterme $\varepsilon_j - \varepsilon_i$ aber größer als die Nutzendifferenz ist, weshalb die Person dann Alternative j wählt. Man beachte, dass lediglich Nutzendifferenzen betrachtet werden, was u. a. bedeutet, dass die

⁶ Im Rahmen dieser Arbeit werden Wahlentscheidungen zwischen lediglich zwei Alternativen dargestellt. Zum einen wird in den durchgeführten Simulationen nur ein derartiges Modell verwendet, zum anderen dient diese Darstellung der Übersichtlichkeit. Für eine allgemeinere Formulierung des Random Utility Model vgl. z. B. Train, 2003, S. 18ff.

Addition derselben Konstanten in beiden Nutzenfunktionen keine Veränderung der Wahlwahrscheinlichkeiten nach sich zieht.

Nun bleibt noch zu betrachten, welcher Verteilung die zufälligen Fehlerterme bzw. deren Differenzen folgen. Dies hängt eng mit der Spezifikation des deterministischen Nutzenanteils zusammen, also damit welche Einflussfaktoren dort betrachtet werden. Die Verteilungsannahme wird häufig aber auch danach getroffen, wie sich die daraus ergebenden Modelle mathematisch handhaben lassen. Es ist also festzuhalten, dass die Annahme über die Verteilung der Fehlerterme das Wahlmodell bestimmt. Zu diesen Modellen mit unterschiedlichen Verteilungsannahmen über die Fehlerterme zählen z. B. logit, probit, mixed logit und GEV.⁷ Im folgenden Abschnitt soll nun das im weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendete Logit-Modell für den Fall zweier Alternativen näher erläutert werden.

2.2.2 Binary Logit

Das Logit-Modell basiert auf der Annahme, dass die zufälligen Fehlerterme aus den Nutzenfunktionen für alle Alternativen unabhängig und identisch sind. Zudem müssen sie einer Gumbel-Verteilung folgen, woraus sich ergibt, dass ihre Differenz $\varepsilon_j - \varepsilon_i$ logistisch verteilt ist (Ben-Akiva / Lerman, 1985, S. 71). Aus dieser Annahme einer logistischen Verteilung und der Beschränkung auf nur zwei Wahlalternativen resultiert der Name dieses stochastischen Wahlmodells: Binary Logit. Gemäß der logistischen Verteilungsfunktion und Gleichung (2.6) ergeben sich die Auswahlwahrscheinlichkeiten der beiden Alternativen i und j zu:

$$P_i = \frac{e^{\gamma \cdot V_i}}{e^{\gamma \cdot V_i} + e^{\gamma \cdot V_j}} = \frac{1}{1 + e^{\gamma(V_j - V_i)}} \quad (2.7)$$

$$P_j = \frac{e^{\gamma \cdot V_j}}{e^{\gamma \cdot V_i} + e^{\gamma \cdot V_j}} = \frac{1}{1 + e^{\gamma(V_i - V_j)}} \quad (2.8)$$

Mittels des Sensitivitätsparameters γ lässt sich die Rationalität der Entscheidungen einstellen. Nimmt man an, dass alle abgefragten Einflussparameter auch im Wahlmodell abgebildet werden, wird dieser Parameter i. d. R. auf 1 fixiert. Folgende nützliche Eigenschaften des Logit-Modells lassen sich nun festhalten:

⁷ Für eine ausführliche Darstellung der verschiedenen Modelle vgl. Train (2003) und Ben-Akiva / Lerman (1985).

- $P_i, P_j \in [0;1]$: Die Wahlwahrscheinlichkeit beider Alternativen liegt zwischen 0 und 1.
- $P_i \rightarrow 1, P_j \rightarrow 0$ für $V_i \gg V_j$: Wenn der deterministische Nutzen V aus Alternative i sehr viel größer ist als der aus Alternative j , so geht die Auswahlwahrscheinlichkeit von Alternative i gegen 1 und die von Alternative j gegen 0.
- $P_i \rightarrow 0, P_j \rightarrow 1$ für $V_i \ll V_j$: Wenn der deterministische Nutzen V aus Alternative i sehr viel kleiner ist als der aus Alternative j , so geht die Auswahlwahrscheinlichkeit von Alternative i gegen 0 und die von Alternative j gegen 1.
- $P_i + P_j = 1$: Die Auswahlwahrscheinlichkeiten addieren sich immer zu 1.

Um die Auswahlwahrscheinlichkeiten für eine oder mehrere Person vorherzusagen, sind schließlich noch die Verhaltensparameter im deterministischen Teil der Nutzenfunktion nötig, welche man häufig aus Befragungsdaten schätzt. In dieser Arbeit wurde dies mit dem Softwaretool BIOGEME durchgeführt, dessen Funktionsweise und Methodik im folgenden Abschnitt erläutert wird.

2.3 Maximum Likelihood Schätzung mit BIOGEME

Zur Schätzung der in die Nutzenfunktionen eingehenden Verhaltensparameter wurde die Software BIOGEME in der Version 1.7 verwendet. Das Programm wurde an der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) am Lehrstuhl „Transport and Mobility Laboratory“ von Michael Bierlaire entwickelt (Bierlaire, 2003). Ziel ist es, die Erforschung von Modellen diskreter Entscheidungen voranzutreiben, besonders für Verteilungen des Typs Generalized Extreme Value (GEV). Die benötigten Parameter werden mittels Maximum-Likelihood-Schätzung (MLE) ermittelt. Dieses Verfahren beruht auf der Analyse von Datensätzen, die üblicherweise als aufbereitete Auswertung von Befragungen vorliegen.

Im Folgenden wird ein Überblick über die Funktionsweise und Bedienung von BIOGEME gegeben. Für weiterführende Informationen vgl. Bierlaire (2008). Das Programm lässt sich über die Kommandozeile aufrufen, verfügt aber unter Windows auch über ein graphisches Interface. Zur Schätzung sind zwei verschiedene Dateien erforderlich. Die Daten sollten im Dateiformat *.dat vorliegen. Diese besteht aus einer Kopfzeile und den Befragungsdaten. Trennzeichen sollten Tabulatoren oder Leerzeichen sein. Wie Tabelle 1 für ein einfaches Beispiel zeigt, werden in der ersten Zeile Kenngrößen definiert, die das Programm für die Schätzung ausliest. Dazu zählen hier eine Identifikation der befragten Person [ID], die Fahrzeit mit Auto bzw. ÖV [travel_time_car, travel_time_pt], die Fahrkosten für beide Modi [cost_car, cost_pt], die Distanz [distance], die Zugangszeit zur Haltestelle des ÖV

[access_pt], Parkgebühren [parking_cost], sowie die von der Person getätigte Wahl zwischen den vorhandenen Alternativen Auto bzw. ÖV [choice = 1 für Auto, choice = 2 für ÖV]. Die folgenden Zeilen enthalten jeweils genau die Anzahl an numerischen Daten, die mit der Zahl der Kenngrößen korrespondiert. Jede Zeile entspricht einer Beobachtung bzw. Befragung.

ID	choice	travel_time_car	travel_time_pt	cost_car	cost_pt	distance	access_pt	parking_cost	...
1	1	15	20	1.56	1.04	13	1	0	...
2	2	25	45	1.8	2.25	15	7	0	...
3	2	10	12	0.6	1.4	5	2	2	...
4	1	12	25	0.96	2.24	8	10	5	...
5	2	35	60	4.8	6	40	15	0	...
...

Tabelle 1: Beispielhafter Aufbau der von BIOGEME verwendeten Daten.⁸

Die zweite Datei, die von BIOGEME benötigt wird ist eine Datei im Format *.mod, in der das zu schätzende Modell spezifiziert wird. Diese kann mit einem gewöhnlichen Texteditor bearbeitet werden. Hier können wichtige Anpassungen des Modells durchgeführt werden. Im Folgenden werden einige grundlegende Befehle erläutert, eine ausführliche Übersicht der möglichen Spezifikationen für fortgeschrittene Benutzer kann bei Bierlaire (2008) nachgelesen werden. Zunächst muss unter [Choice] auf die Spalte in den Daten verwiesen werden, in der die Befragten sich für eine der zur Verfügung stehenden Alternativen entschieden haben. Wie aus Abbildung 1 zu erkennen, wird hier auf die Spalte „choice“ verwiesen. Es bestand in diesem Beispiel also nur die Wahl zwischen „1“, also Auto, und „2“, was dem ÖV entspricht.

⁸ Quelle: Eigene Darstellung.

```

[Choice]
choice

[Beta]
//Name      Value  UpperBound  LowerBound  Status [1 = Variable, 2 = fixed]
beta_travel_time_car  -0.5   -10         10          1
beta_travel_time_pt   -0.5   -10         10          1
beta_cost_car         -0.5   -10         10          1
beta_cost_pt         -0.5   -10         10          1
beta_access_pt       -0.5   -10         10          1
beta_parking_cost    -0.5   -10         10          1

[Utilities]
//ID      Name  Availability  linear-in-parameter expression
1         Auto  av_mob       beta_travel_time_car * travel_time_car + beta_cost_car * cost_car + beta_parking_cost * parking_cost
2         ÖV   av_mob       beta_access_pt * access_pt + beta_travel_time_pt * travel_time_pt + beta_cost_pt * cost_pt

[Expressions]
av_mob = 1

[Model]
$MNL
//$NL
//$CNL
//$NGEV
    
```

Abbildung 1: Beispielhafte Datei zur Modellspezifikation in BIOGEME.⁹

Unter [Beta] werden die zu schätzenden Verhaltensparameter der Nutzenfunktion definiert. Dabei werden zusätzlich noch Startwerte und Grenzen angegeben sowie eine Klassifizierung, ob es sich bei dem zu schätzenden Parameter um eine Variable oder einen festen Parameter handelt. Je näher der Startwert an dem letztendlich geschätzten Wert liegt, umso weniger Iterationen benötigt das Programm. Die Grenzen sollten so gewählt werden, dass sie durch die geschätzten Parameter nicht erreicht werden, da sonst unrealistische Werte auftreten. Kommentare zum leichteren Verständnis der Datei müssen mit den Zeichen „//“ versehen werden, da BIOGEME beim Auslesen der Datei alle Einträge, die nach diesen Zeichen folgen, einfach ignoriert. Im Abschnitt [Utilities] können die Nutzenfunktionen der jeweiligen Alternativen definiert werden. In diesem Beispiel sind zwei Nutzenfunktionen zu sehen, die mit der jeweiligen Alternative „Auto“ oder „ÖV“ korrespondieren. Dies wird in der Spalte „ID“ kenntlich gemacht, wobei jeder Alternative aus den Daten unter der Spalte [Choice] eine Nutzenfunktion zugeordnet werden muss. Neben dem Namen für die Alternative, wird durch die Variable „Availability“ ausgedrückt, ob diese Alternative für die befragte Personen überhaupt wählbar war; dabei steht „1“ für wählbar und „0“ für nicht wählbar. Dies kann dadurch gelöst werden, dass man die Daten um eine Spalte

⁹ Quelle: Eigene Darstellung.

„Availability“ ergänzt und dort die Werte „1“ einträgt. Oder man definiert eine Variable unter [Expressions], wenn eine solche Spalte nicht in den Daten vorhanden ist. Weiter rechts unter dem Punkt [Utilities] sieht man dann die Definitionen der eigentlichen Nutzenfunktionen. Die Namen der Werte, die mit den zugehörigen Parametern β_x multipliziert werden, müssen konsistent mit den Kenngrößen aus der ersten Zeile der Daten sein. In diesem Beispiel schätzt BIOGEME also auf Grundlage der verschiedenen Ausprägungen der Kenngrößen die Vorfaktoren eines Modells, das linear in diesen Parametern ist. Man beachte, dass BIOGEME auch in der Lage ist nicht-lineare Nutzenfunktionen zu schätzen. Abschließend wird in der Spezifikationsdatei unter [Model] das der Schätzung zugrunde liegende Modell definiert. Die Wahl des Modells orientiert sich an den Annahmen über die Verteilung der Fehlerterme, wie es in Abschnitt 2.2.1 erläutert wurde.

Als Output produziert BIOGEME mehrere Dateien. Sie haben denselben Namen wie die Spezifikationsdatei, allerdings mit unterschiedlichen Dateiendungen. In Abbildung 2 ist eine Output-Datei im html-Format dargestellt. Sie wird später zur Auswertung der Schätzungen verwendet und soll deshalb exemplarisch erläutert werden. Aus Übersichtsgründen wurde das Beispielmmodell etwas vereinfacht. Ebenso ist die Output-Datei leicht verkürzt dargestellt. Die wichtigsten Informationen finden sich unter der Überschrift „Utility Parameters“ in Abbildung 2. Es wurden die Parameter β_{fuel} , β_{tc_pt} , β_{tt_car} , β_{tt_pt} und für den ÖV eine Konstante „const“ geschätzt. Diese stellen also den Einfluss der Kenngrößen „Fahrtkosten“ für Auto bzw. ÖV und „Fahrzeit“ für den Weg mit den beiden Modi dar, der aus der Stichprobe abgeleitet werden konnte. Die Konstante ist in diesem Beispiel positiv. Dies deutet grundsätzlich darauf hin, dass für eine Fahrt mit dem ÖV im Vergleich zu einer Fahrt mit dem Auto keine sogenannten Rüstkosten für die Bereithaltung eines PKWs anfallen; der Nutzen einer ÖV-Reise ist also unabhängig von Reisezeit und Fahrtkosten zunächst höher als der einer Autoreise. Eine allgemeinere Interpretation ist folgende: werden Kenngrößen, die in den Daten vorhanden sind, in der Nutzenfunktion nicht betrachtet und ergibt sich daraus eine Präferenz der Befragten für ein Verkehrsmittel, kann dieser Effekt in der Konstante aufgefangen werden. BIOGEME untersucht mit einem t-Test die Signifikanz jedes Parameters β_x . Sollte für einen der Parameter die Hypothese „ $\beta_x = 0$ “ nicht auf einem Signifikanzniveau von 95 % verworfen werden können, markiert BIOGEME dies mit einem Stern am Ende der Zeile.¹⁰ Im Beispiel ist das nur für die Konstante des Modells der Fall, alle anderen Parameter sind auf einem Niveau von 95 % signifikant. Dies weist darauf

¹⁰ Die Nullhypothese „ $\beta_x = 0$ “ bedeutet, dass der Parameter x keinerlei Einfluss auf die Wahl zwischen den Alternativen hat.

hin, dass die Befragten bei genau gleicher Fahrzeit und exakt gleichen Kosten beider Modi, keine Präferenz für ein Verkehrsmittel aufweisen.

BIOGEME Version 1.7 [Sun Aug 3 10:42:33 GMT 2008]

Michel Bierlaire, EPFL

This file has automatically been generated. 12/02/08 18:38:44

Model: Multinomial Logit for panel data

Number of estimated parameters: 5
Number of observations: 4762
Number of individuals: 702

Final log-likelihood: -2921.068
Likelihood ratio test: 759.398
Adjusted rho-square: 0.114

Diagnostic: Convergence reached...
Iterations: 69
Run time: 00:06
Sample file: sp_data_sp4_final.dat

Utility parameters

Name	Value	Std err	t-test	p-value	
beta_fuel	-0.276	0.0323	-8.55	0.00	
beta_tc_pt	-0.0283	0.00885	-3.20	0.00	
beta_tt_car	-2.14	0.138	-15.57	0.00	
beta_tt_pt	-2.22	0.102	-21.68	0.00	
const	0.0575	0.0485	1.19	0.24	*

Abbildung 2: Beispiel einer Output-Datei aus BIOGEME.¹¹

Das Programm untersucht auch Korrelationen zwischen den verschiedenen Parametern. Dafür werden Kovarianzen berechnet und die fraglichen Parameter ggf. auf die gleiche Weise mit einem Stern markiert. Über der Tabelle können weitere Informationen entnommen werden: zur Modellschätzung wurde „Multinomial Logit“ verwendet, das ein erweitertes Modell des in Abschnitt 2.2.2 Erläuterten „Binary Logit“ Modells darstellt. Des Weiteren besagt die Output-Datei, dass den Daten 4762 Beobachtungen zu 702 Befragten zugrunde liegen. Darauf folgen Werte für Log-Likelihood und einen Likelihood-Ratio-Test, welche im

¹¹ Quelle: Eigene Darstellung angelehnt an eine BIOGEME 1.7 Output-Datei im html-Format.

Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet werden und deshalb hier nicht weiter erläutert sind. Ein wichtiger Parameter für eine rasche Orientierung über die Güte des Modells stellt das angepasste ρ^2 dar. Im Folgenden soll kurz die Funktionsweise einer Maximum-Likelihood-Schätzung dargestellt und im Anschluss auf das angepasste ρ^2 eingegangen werden.

BIOGEME schätzt die unbekanntes Verhaltensparameter über Maximum-Likelihood (Bierlaire, 2003, S. 6ff). Diese Methode wird standardmäßig für alle nichtlinearen Logit Modelle angewandt. Zwar muss man im Gegensatz zur Methode der kleinsten Quadrate (method of ordinary least squares) Annahmen über die Verteilung der Ausprägungen in der Grundgesamtheit treffen, ist aber im Gegenzug in der Lage nicht lineare Modelle zu behandeln. Die Grundidee der Maximum-Likelihood-Schätzung ist es, einen Parameterschätzer $\hat{\beta}$ für die unbekannte Einflussgröße β zu finden, der die zugehörige gemeinsame Wahrscheinlichkeitsfunktion maximiert. Die Wahrscheinlichkeit für das Modell, die beobachtete Wahl zu reproduzieren ist gegeben durch

$$P_{i,n}^k(\beta) = P_{i,n}(\beta, x_{i,n}^k) \quad (2.9)$$

wobei $x_{i,n}^k$ die Werte einer Beobachtung k für die betrachteten Kenngrößen aus dem Datensatz in Abhängigkeit von Alternative i und Individuum n ausdrückt. $P_{i,n}$ ist in diesem Fall die dem Logit-Modell zugrunde liegende Wahrscheinlichkeitsfunktion. Gilt die Annahme (1), dass K Einzelbeobachtungen der Stichprobe unabhängig voneinander sind, dann ergibt sich die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsfunktion dieser Stichprobe zu (Ben-Akiva / Lerman, 1985, S. 80):

$$L(\beta, \underline{x}) = \prod_{k=1}^K P_{i,n}(\beta, x_{i,n}^k) \stackrel{(1)}{=} \prod_{k=1}^K P_{i,n}^k(\beta) \quad (2.10)$$

Diese Likelihood-Funktion gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der das geschätzte Modell die gesamte Stichprobe erklärt. Im letzten Schritt muss nun ein Parameterschätzer $\hat{\beta}$ gefunden werden, der diese Funktion maximiert. Für eine einfachere Berechnung des Optimums wird die Likelihood-Funktion logarithmiert, was aus dem Produkt aus Gleichung (2.10) eine Summe erzeugt:

$$\ln L(\beta, \underline{x}) = \sum_{k=1}^K \ln P_{i,n}^k(\beta) \quad (2.11)$$

Man hat nun die Log-Likelihood-Funktion vorliegen, aus der ein Log-Likelihood-Wert bestimmt werden kann. Jeder Parameterschätzer $\hat{\beta}$, der (2.11) maximiert, muss ebenso (2.10) maximieren, da (2.11) eine monotone Transformation der Likelihood-Funktion darstellt. Die nötige Maximierung ist ein Standardverfahren. Zunächst wird die erste partielle

Ableitung nach $\underline{\beta}$ gleich Null gesetzt und dann die zweite partielle Ableitung auf Negativität für ein Maximum untersucht. Werden mehrere Einflussfaktoren untersucht, sind sowohl $\underline{\beta}$ als auch $\frac{\partial \ln L(\underline{\beta}, \underline{x})}{\partial \underline{\beta}}$ Vektoren. $\frac{\partial^2 \ln L(\underline{\beta}, \underline{x})}{\partial \underline{\beta} \partial \underline{\beta}'}$ stellt die sog. Hesse-Matrix dar. Die Maximierung verläuft nach einem ähnlichen Prinzip wie im Falle eines einzelnen geschätzten Parameters.

Aus diesen Log-Likelihood-Werten berechnet BIOGEME in der Standardeinstellung einen Wert für ein angepasstes ρ^2 aus, das sich wie folgt berechnet:

$$\rho^2 = 1 - \frac{\ln L(\underline{\beta}_U) - K}{\ln L(\underline{\beta}_R)} \quad (2.12)$$

Dabei wird das unbeschränkte Modell U , welches alle gewünschten Verhaltensparameter enthält, in Relation mit einem beschränkten Modell R gesetzt. In diesem beschränkten Modell sind in der Standardeinstellung alle Parameter gleich Null gesetzt. Es wird also das gewünschte Modell mit einem „leeren“ Modell verglichen. Je näher der Wert des angepassten ρ^2 an eins liegt, umso besser erklärt das geschätzte Modell die Daten; sofern man sich bei der Modellauswahl allerdings nur an dieser Größe orientiert, läuft man Gefahr tendenziell zu komplexe Modelle zu benutzen, weil jede zusätzliche Variable ρ^2 erhöht. Das angepasste ρ^2 schafft diesbezüglich insofern Abhilfe, als dass es vom Log-Likelihood-Wert des unbeschränkten Modells noch die Anzahl der geschätzten Parameter K abzieht. So können Modelle identifiziert werden, die mit vielen zusätzlichen Parametern nicht deutlich mehr der Daten erklären als einfachere Modelle. I. d. R. wird in solchen Fällen das komplexere Modell verworfen. In sozialwissenschaftlichen Analysen gelten ρ^2 -Werte von 0.3 bis 0.4 bereits als aussagekräftig. Bei der Integration von geschätzten Parametern in Simulationssoftware wie MATSim treten allerdings häufig Probleme der Abbildbarkeit auf, wie in Abschnitt 5.1 erläutert wird. Oft sind zahlreiche die Wahl zwischen Verkehrsmitteln beeinflussende Parameter wie bspw. die Kosten für das Parken an einem Aktivitätenort Bestandteil einer Befragung. Sind diese dann aber mangels Datengrundlage nicht in der Simulation abbildbar, dürfen sie in der Schätzung nicht betrachtet werden. Aus diesem Grund weisen die in dieser Arbeit geschätzten Modelle meist deutlich geringere ρ^2 -Werte auf. Sie liegen zwischen 0.10 und 0.14, was bedeutet, dass diese Schätzungen lediglich 10 % bis 14 % der Daten erklären können.

3 Die ökonomische Bewertung von Verkehrsmaßnahmen und deren Akzeptanz

Die ökonomische Bewertung von Verkehrsmaßnahmen spielt auf politischer Ebene, wo über deren Umsetzung entschieden wird, eine große Rolle. So sollen anhand dieser Bewertung meist verschiedene Varianten einer Maßnahme (einschließlich der Status-Quo-Variante) vergleichbar gemacht und gegeneinander abgewogen werden. Erst dadurch können Aussagen darüber getroffen werden, ob das Projekt ökonomisch sinnvoll erscheint und welche Variante aus volkswirtschaftlicher Sicht umgesetzt werden sollte. In diesem Rahmen wird i. d. R. eine Nutzen-Kosten-Betrachtung angewandt, welche die Veränderung der gesamtwirtschaftlichen Wohlfahrt im Zuge der geplanten Maßnahme abschätzen soll. Dabei gehen auf der Nutzenseite vor allem die über die Gesamtbevölkerung aggregierten monetarisierten Nutzenzuwächse ein. Auf der Kostenseite stehen die entgangenen Nutzen, die bspw. durch einen Rückgang der Nachfrage entstehen können. Darüber hinaus werden auch Kostenelemente der Vorbereitung, Entscheidung, Umsetzung sowie Folgekosten der Maßnahme berücksichtigt (Beckers et al., 2007, S. 8). Das nötige Abwägen dieser monetarisierten Größen ist theoretisch durch das Kaldor-Hicks-Kriterium begründet. Danach ist die Durchführung einer Maßnahme genau dann sinnvoll, wenn die aggregierten Nutzen, gemessen in Zahlungsbereitschaften der relevanten Personen, die Kosten der Maßnahme überwiegen, diese in Summe also wohlfahrtssteigernd ist (Kaldor, 1939 sowie Hicks, 1939).

In diesem Zusammenhang muss allerdings erwähnt werden, dass diese Vorgehensweise lediglich eine Beurteilung **des Saldos** der Wohlfahrtsveränderung zulässt. Versucht man durch eine verkehrspolitische Maßnahme bspw. die Kapazitätsauslastung der Straßen zu verbessern, strebt man nach der Steigerung der gesamtwirtschaftlichen Wohlfahrt. Dies ist durch die utilitaristische Theorie begründet, welche nach dem größten gemeinsamen Nutzen aller Beteiligten strebt (Mill, 1863). Dabei wird nicht betrachtet, welche Individuen der Gesellschaft zu welchen Teilen von der Wohlfahrtssteigerung profitieren und wo ggf. Wohlfahrtstransfer zwischen Individuen stattfindet. Anders ausgedrückt stellt sich die Frage, wer die Gewinner und wer die Verlierer einer verkehrspolitischen Maßnahme sind. Nach dem Kaldor-Hicks-Kriterium wäre eine Kompensation der schlechter gestellten Individuen durch die besser gestellten möglich, wobei die Maßnahme immer noch einen Wohlfahrtsgewinn bewirken würde. Die Kompensation muss allerdings nicht zwangsläufig gezahlt werden.¹²

¹² Würde die Kompensation durchgeführt, wäre nach der Maßnahme kein Individuum schlechter gestellt, einige aber besser gestellt. Eine derartige Situation entspräche einer Pareto-Verbesserung. Problematisch gestaltet sich in der Praxis allerdings die Identifikation der jeweiligen Individuen und die Monetarisierung der nötigen Kompensation.

Grund für diese Herangehensweise ist die von vielen Ökonomen geforderte Trennung zwischen **Wohlfahrtsmaximierung (Allokationspolitik)** und anschließender, nicht projektbezogener **Wohlfahrtsverteilung (Distributionspolitik)**. Überdies arbeiten die handelsüblichen Verkehrssimulationsprogramme wie z. B. VISUM oder OmniTRANS derzeit ausschließlich mit aggregierten Größen und sind dadurch zwar in der Lage, Nutzenänderungen je Quelle-Ziel-Beziehung, nicht jedoch für einzelne Individuen zu berechnen.¹³ Deshalb ist mit diesen Programmen eine projektbezogene Analyse der Wohlfahrtswirkungen auf individueller Ebene derzeit nicht realisierbar. Multiagentensimulationen können im Gegensatz Nutzenänderungen, die durch veränderte Reisezeiten oder Kostenschwankungen entstehen, auf individueller Ebene darstellen.

Im Bezug auf die Akzeptanz einer Maßnahme in der Bevölkerung, welche wiederum die politische Umsetzbarkeit beeinflusst, ist die genannte Trennung zwischen Allokations- und Distributionspolitik als kritisch zu bewerten. In der Literatur wird bspw. darauf hingewiesen, dass eine Maut tendenziell regressiv auf die Einkommensverteilung der Bevölkerung wirkt (Franklin, 2006, S.27 sowie Kickhöfer, 2007, S. 6). Wenn diese Maßnahme allerdings insgesamt die Wohlfahrt der Gesellschaft steigert, dann sollte sie auch umgesetzt werden. Je mehr Individuen dabei eine Verbesserung ihrer persönlichen Lage wahrnehmen, d.h. von der Wohlfahrtssteigerung profitieren, desto einfacher gestaltet sich grundsätzlich die Realisierung. Wenn die Mauteinnahmen zusätzlich nach einem offen kommunizierten Schema in Ausgleichsprojekten oder in Entlastungen der betroffenen Bevölkerung eingesetzt werden, wäre auch der im Modell implizit unterstellte gesamtwirtschaftlich positive Einsatz der generierten Finanzmittel gegeben. Dieser Effekt ist mit der derzeitigen Anwendung des Kaldor-Hicks-Kriteriums, welches auf aggregierten Größen basiert, nicht abbildbar. Multiagentensimulationen sind also in der Lage das aggregierte Standardmodell der Nutzenbewertung erweitern und dazu beitragen, dass Verkehrsprojekte durch eine daran gekoppelte Kompensationsmaßnahme auf größere gesellschaftliche Akzeptanz stossen, was wiederum die politische Umsetzbarkeit erleichtert. So wäre es z. B. möglich, eine bestimmte Kompensationsmaßnahme zu entwerfen, aufgrund derer das Verkehrsprojekt von einem vorher festgelegten Anteil der Bevölkerung unterstützt wird. Abschnitt 3.1 fasst dafür zunächst Forschungserkenntnisse zu Akzeptanzproblemen bei der Umsetzung verkehrspolitischer Maßnahmen zusammen. Abschnitt 3.2 diskutiert anschließend verschiedene Ansätze zur Bewertung von Nutzenänderungen, die einen Ausgangspunkt für mögliche Kompensationsmöglichkeiten bilden können.

¹³ Vgl. die Internetpräsenzen der PTV AG (VISUM) unter <http://www.ptv.de/> und von OmniTrans unter <http://www.omnitrans-international.com/>. Abgerufen am 25.05.2009

3.1 Akzeptanz- und Umsetzungsprobleme verkehrspolitischer Maßnahmen

Die öffentliche Meinung zu geplanten verkehrspolitischen Maßnahmen ist ein entscheidender Faktor für eine schnelle und reibungslose Umsetzung. In Deutschland werden daher in den meisten Planungsverfahren Bürgerbeteiligungen und -informationsveranstaltungen durchgeführt, um die Akzeptanz der Projekte zu steigern. Neben der Vermittlung der gesamtwirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit müssen dabei auch die Vor- und Nachteile erläutert werden, die für einzelne Individuen oder Lobbygruppen entstehen. Maßnahmen wie die Einführung von road-pricing zur Steuerung des Mobilitätsverhaltens finden aber trotz all dieser Bemühungen weder in Deutschland noch in anderen Ländern die Zustimmung einer Mehrheit in der Bevölkerung (Jaufmann, 1996 und Luk / Chung, 1997). Schade (1999) stellt die Ergebnisse mehrerer Untersuchungen zusammen und nennt vier Hauptgründe für diese ablehnende Haltung in der Bevölkerung:

- Verletzung der Privatsphäre
- Ungenügende Transparenz der Einnahmenverwendung
- Wahrnehmung als reine Preissteigerung
- Benachteiligung sozial schwacher Gruppen

Der erste Punkt, die Verletzung der Privatsphäre, ist besonders bei Projekten anzuführen, die eine Speicherung und Verarbeitung von Bewegungsdaten mit sich bringen. Dazu zählen road-pricing-Maßnahmen wie die Area-Maut in London, wo Nummernschilder von Kameras erfasst und auf bereits geleistete Zahlung hin überprüft werden. Es ist aber anzunehmen, dass ähnliche Vorbehalte auch bei elektronischen Tickets für öffentliche Verkehrsmittel zu erwarten sind, da eine An- und Abmeldung beim Zu- und Aussteigen nötig wird. Der zweite Punkt, die empfundene ungenügende Transparenz der Einnahmenverwendung, geht mit dem dritten Punkt einher. Ist nicht öffentlich und transparent kommuniziert, wofür das eingenommene Geld verwendet wird, so wird eine derartige Maßnahme als reine Preissteigerung empfunden. In Deutschland liegt das Problem dabei häufig an der rechtlich schwierig zu implementierende Zweckbindungen der Einnahmen. In der Regel fließen die eingenommenen Mittel in den Haushalt des Staates, der Stadt oder Gemeinde. Der letzte Punkt betrifft die Benachteiligung sozial schwacher Gruppen durch die zusätzliche Belastung bspw. einer Maut. Mobilität gilt in unserer Gesellschaft als Grundbedürfnis, um am sozialen Leben teilnehmen zu können. Werden einkommensschwache Bevölkerungsschichten durch eine Verkehrsmaßnahme benachteiligt und dabei keine Alternativen geschaffen, so ist das Projekt im gesellschaftlichen Diskurs schwer vermittelbar.

Schade (1999) folgert für den Fall einer road-pricing-Maßnahme, dass diese nicht mehrheitsfähig ist, obwohl die aus dem Verkehr resultierenden Probleme deutlich wahrgenommen werden. Die Akzeptanz von Straßenbenutzungsgebühren steigt aber erheblich an, wenn sie in ein Paket von Maßnahmen mit gleichzeitiger Berücksichtigung der Einnahmenverwendung eingebunden werden. Diese Erkenntnis lässt sich wohl auf die meisten Verkehrsmaßnahmen übertragen, die in der Bevölkerung wegen einem oder mehreren der letzten drei genannten Punkte auf geringe Befürwortung stoßen. Auch aus politischer Sicht wäre es von Vorteil, wenn die Mehrheit der Bevölkerung durch eine sinnvolle Koppelung von Verkehrsmaßnahme und offengelegter Verwendung der generierten Finanzmittel das Projekt unterstützen würde. Franklin (2006) analysiert derartige Zusammenhänge im Rahmen einer mautfinanzierten Brücke. Zur Steigerung der gesellschaftlichen Akzeptanz wird der Einfluss dreier Kompensationsszenarien auf die Wohlfahrt entlang der Einkommensverteilung untersucht:

- Zahlung eines Pauschalbetrags an alle Verkehrsteilnehmer
- Querfinanzierung des öffentlichen Nahverkehrs
- Steuerentlastung

Für ein tieferes Verständnis der Wirkungen solcher Kompensationen sollen im folgenden Abschnitt 3.2 die vorhandenen Möglichkeiten der ökonomischen Theorie erläutert werden. Ein Beispiel dafür, wie eine Kompensationsmaßnahme ausgestaltet sein könnte, findet sich für ein kleines fiktives Testnetzwerk in Kapitel 9.

3.2 Indikatoren der Kompensation

Ziel dieses Abschnitts ist es, drei der bedeutendsten in der Literatur diskutierten Größen zur Bewertung von Nutzenänderungen zu erläutern, die aus (verkehrs)politischen Maßnahmen resultieren. Das Grundproblem der Nutzenbewertung beinhaltet zwei Komponenten (Van Suntum, 1986, S. 41ff): einerseits stellt sich die Frage, wie auf individueller Ebene eine Steigerung oder eine Abnahme des Wohlbefindens festzustellen ist.¹⁴ Man spricht hierbei vom **Problem der Nutzenmessung**. Andererseits ist fraglich, wie man eine Änderung des Wohlbefindens verschiedener Individuen zusammenfasst, besonders wenn einige durch eine Maßnahme Nutzeneinbußen erleiden, während andere einen Nutzenzuwachs empfinden. Dabei handelt es sich um das sogenannte **Nutzenaggregationsproblem**. In der Literatur herrscht weitgehend Konsens darüber, dass ein Individuum bei seiner Wahlentscheidung keine kardinale Nutzenskala verwendet, sondern lediglich eine bestimmte Alternative einer anderen vorzieht, weil er sich von ihr das größtmögliche Wohlbefinden erwartet. Deshalb scheint es i. d. R. sinnvoll, jedem Individuum die Verwendung seiner knappen Mittel auf verschiedene Alternativen selbst zu überlassen (Van Suntum, 1986, S. 42). Problematischer gestaltet sich das Aufrechnen von Nutzenänderungen zwischen einzelnen Mitgliedern einer Gesellschaft, das aufgrund der genannten Abwesenheit einer individuellen oder gar allgemeingültigen Nutzenskala auf direktem Wege unmöglich ist. Eine gesamtwirtschaftliche Bewertung, die einen Indikator über die Vorteilhaftigkeit von (verkehrs)politischen Maßnahmen liefern soll, ist in einer Gesellschaft, in der andauernd Zielkonflikte zwischen Individuen auftreten, trotz der damit einhergehenden Schwierigkeiten unumgänglich. Um dieses Dilemma zu umgehen, ist also ein theoretisches Konstrukt nötig, das es zulässt die nötige Kompensation durch die Gewinner einer Maßnahme zu monetarisieren.

3.2.1 Konsumentenrente

Eine Möglichkeit, die nötigen Kompensationszahlungen abzuschätzen, bietet das Konzept der **Konsumentenrente (CS)**. Im ökonomischen Grundmodell des Preis-Mengen-Diagramms bezeichnet man die Fläche unter der Nachfragekurve nach Marshall (1920) unter bestimmten Umständen als aggregierte Zahlungsbereitschaft für ein bestimmtes Gut. Wie Abbildung 3 zu entnehmen ist, wird zum Preis von p^* genau die Menge x^* nachgefragt. Der Markt befindet sich also im Gleichgewicht. Da für die erste Einheit des Gutes die höchste Zahlungsbereitschaft gegeben ist, diese aber mit steigender Versorgungsmenge bis zum

¹⁴ Im weiteren wird der Begriff „Wohlbefinden“ gleichbedeutend mit „Nutzen“ verwendet, was einer Erweiterung des Nutzenbegriffs entspricht.

Preis p^* abnimmt, gibt es eine gewisse Menge Nachfrager, die weniger bezahlen müssen als sie bereit wären zu zahlen. Diese aggregierten Differenzen zwischen individuellen Zahlungsbereitschaften und tatsächlich entrichtetem Preis p^* wird als Konsumentenrente bezeichnet und entspricht der Fläche A in Abbildung 3.

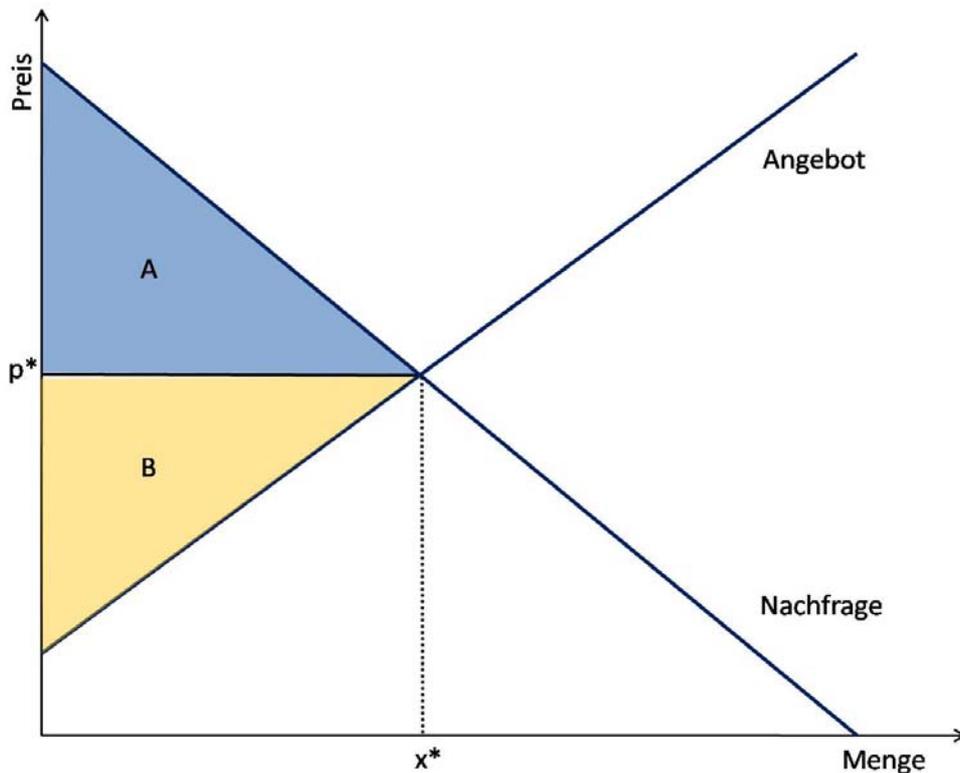


Abbildung 3: Preis-Mengen-Diagramm.¹⁵

Die Produzenten dieses Gutes sehen sich hingegen Gesamtkosten i.H. der Fläche unter der Angebotskurve gegenüber. Da sie ihre Güter aber zum Preis p^* verkaufen können, entsteht ihnen auch ein Überschuss, die sogenannte Produzentenrente, welche durch die Fläche B repräsentiert wird. Zusammen genommen werden diese beiden Renten als Sozialer Überschuss definiert. An dieser Stelle lässt sich nun wieder auf das eben erläuterte Kaldor-Hicks-Kriterium zurückgreifen. So kann man definieren, dass wenn nach Abzug aller Kosten eines Projekts immer noch ein Sozialer Überschuss verbleibt, die Durchführung für die

¹⁵ Quelle: Eigene Darstellung.

Gesellschaft als vorteilhaft zu beurteilen ist, weil die Nachfrager offensichtlich genügend Kompensationszahlungen leisten könnten.¹⁶

Die Bewertung der Zahlungsbereitschaft mittels Konsumentenrente bringt allerdings zwei Probleme mit sich, die im Anschluss an diese Auflistung genauer beleuchtet werden sollen:

- Wird die Konsumentenrente nicht tatsächlich bis zur Kostendeckung abgeschöpft, aber mehrere Projekte nach diesem Verfahren bewertet, kommt es zu einer Mehrfachzählung von Zahlungsbereitschaften (Van Suntum, 1986, S. 46 f).
- Es besteht die Annahme, dass bei einer Preisänderung kein Einkommenseffekt vorliegt; dies trifft nur bei quasi-linearen Präferenzen zu (Willig, 1976, S. 592).

Das erste Problem ist wie folgt zu betrachten: bei der Ermittlung der Zahlungsbereitschaft wird bei jeder Bewertung das gleiche Einkommen zugrunde gelegt. Eigentlich müsste sich dieses aber mit jedem durchgeführten Projekt verringern und mit ihm die Zahlungsbereitschaft für folgende Projekte. Sofern man diese parallele Bewertung nicht für die gesamte Infrastrukturplanung einsetzt, erscheint dies unproblematisch. Würde man die gesamte Zahlungsbereitschaft bis zur Kostendeckung tatsächlich abschöpfen (können), schmälerte sich dadurch auch automatisch das Einkommen und dieses Problem wäre gelöst.

Das zweite Problem stellt sich wie folgt dar: der Substitutionseffekt beschreibt die Tatsache, dass bspw. bei einem Preisanstieg von Gut 1 ein Teil der ursprünglich konsumierten Menge durch andere Güter substituiert wird.¹⁷ Dennoch verringert sich auch die Kaufkraft des Einkommens, da immer noch Einheiten von Gut 1 zu einem teureren Preis konsumiert werden. Wenn diese Verringerung des Einkommens allerdings keinen weiteren Einfluss auf die konsumierte Menge von Gut 1 hat, sondern sich nur auf den Konsum aller anderen Güter auswirkt, liegt kein Einkommenseffekt vor. Dies entspricht allerdings nicht der Realität in Form der am Markt beobachtbaren Nachfragekurve (nach Marshall). Im Bezug auf Verkehr ist diese Annahme dennoch approximativ solange haltbar, wie die tatsächlichen Kostenänderungen durch eine Maßnahme im Verhältnis zum Gesamtbudget der Nachfrager relativ gering sind und die relative Preisänderung vernachlässigbar klein bleibt. Bates (2006) weist auf die praktische Relevanz dieser Einschränkung hin: wenn ein erheblicher Teil des

¹⁶ Bezüglich der Angebotsfunktion ergibt sich in der Verkehrswissenschaft ein weiteres Problem: diese Funktion entspricht in der volkswirtschaftlichen Theorie den Grenzkosten eines Gutes. Da im Verkehr allerdings i. d. R. externe Kosten in Form von Stau, Unfällen, Lärm-, Abgasbelastungen auftreten, die nicht in die individuelle Entscheidungsfindung einbezogen werden, verlaufen die Gesamtkosten für die Gesellschaft über den Grenzkosten des Gutes. Diesem Phänomen versucht man in der Theorie mit „Marginal Social Cost Pricing“ zu begegnen, um die externen Kosten zu internalisieren. Vgl. hierzu bspw. Lindsey / Verhoef (2000).

¹⁷ Der hier genannte Preisanstieg (alternativ auch Preisrückgang) könnte bspw. auf eine verkehrspolitische Maßnahme zurückgehen. Im Folgenden soll also untersucht werden, welche Wirkungen eine Preisänderung im Zuge einer derartigen Maßnahme auf die individuellen Nutzenniveaus und deren Aggregation ausübt.

individuellen Budgets für den Weg zur Arbeit benötigt wird, wie es in einigen Dritte-Welt-Ländern der Fall ist, so wird die Bewertung der Zahlungsbereitschaft und damit der Nutzenänderungen einem nicht mehr zu vernachlässigbaren Fehler unterliegen (Bates, 2006, S. 292 und S. 339f sowie Van Suntum, 1986, S. 52).

3.2.2 Kompensations- und Äquivalenzvariation

Diese zweite Einschränkung führt zu einer Überlegung, die auf Hicks (1939) zurückgeht. Wirkt sich der Verlust der Kaufkraft auch auf das betrachtete Gut 1 aus, so liegt ein Einkommenseffekt vor. Die Frage ist nun, wie die Nutzenänderungen in diesem Fall zu bewerten sind. Die **Kompensationsvariation (CV)** einer Preisänderung gibt die nötige ex post Einkommensänderung für ein Individuum an, um bei neuen Preisen denselben Nutzen zu erreichen wie im Ausgangszustand. Dahingegen gibt die **Äquivalenzvariation (EV)** den Betrag der ex ante Einkommensänderung an, die nötig wäre, damit das Individuum bereits bei alten Preisen dasselbe Nutzenniveau erreicht wie nach der Preisänderung bei ursprünglichem Einkommen (Franklin, 2006, S. 20). Handelt es sich also um eine Preissteigerung (entspricht einer nutzenmindernden Maßnahme), so wird die CV ein positives Vorzeichen haben, weil man den Nutzer im nachhinein entschädigen will, während die EV ein negatives Vorzeichen besitzt, da man den Nutzer bereits vor der Maßnahme auf das niedrigere Nutzenniveau zwingen müsste.

Die drei erläuterten Größen zur Abschätzung der nötigen Kompensation können graphisch aus Abbildung 4 entnommen werden. Aus Gründen der Übersicht wurde von linearen Nachfragefunktionen ausgegangen. Beispielhalber wird im Folgenden beschrieben, wie im Zuge einer verkehrspolitischen Maßnahme die Fahrpreise für ein Verkehrsmittel von p_0 auf p_1 steigen. Wie in Abschnitt 3.2.1 erläutert, gibt die Fläche unter der Nachfragefunktion M (nach Marshall) unter genannten Bedingungen die aggregierte Zahlungsbereitschaft für die Nutzung des Verkehrsmittels an. Der Verlust an Konsumentenrente, der durch die Gewinner dieser Maßnahme kompensiert werden müsste, resultiert aus dem Rückgang der Nachfrage von x_0 auf x_1 und entspricht den Flächen $A+B$. Nun könnte man aber davon ausgehen, dass bei der Nachfrage nach einem Verkehrsmittel der Einkommenseffekt eine Rolle spielt, d.h. die Preisänderung tatsächlich zu einer Verringerung des übrigen Budgets führt **und** so auch auf die Menge der nachgefragten Fahrten rückwirkt. In diesem Fall müsste man (je nach Nutzenreferenzniveau) CV oder EV berechnen, um die „wahre“ Kompensation zu erhalten.

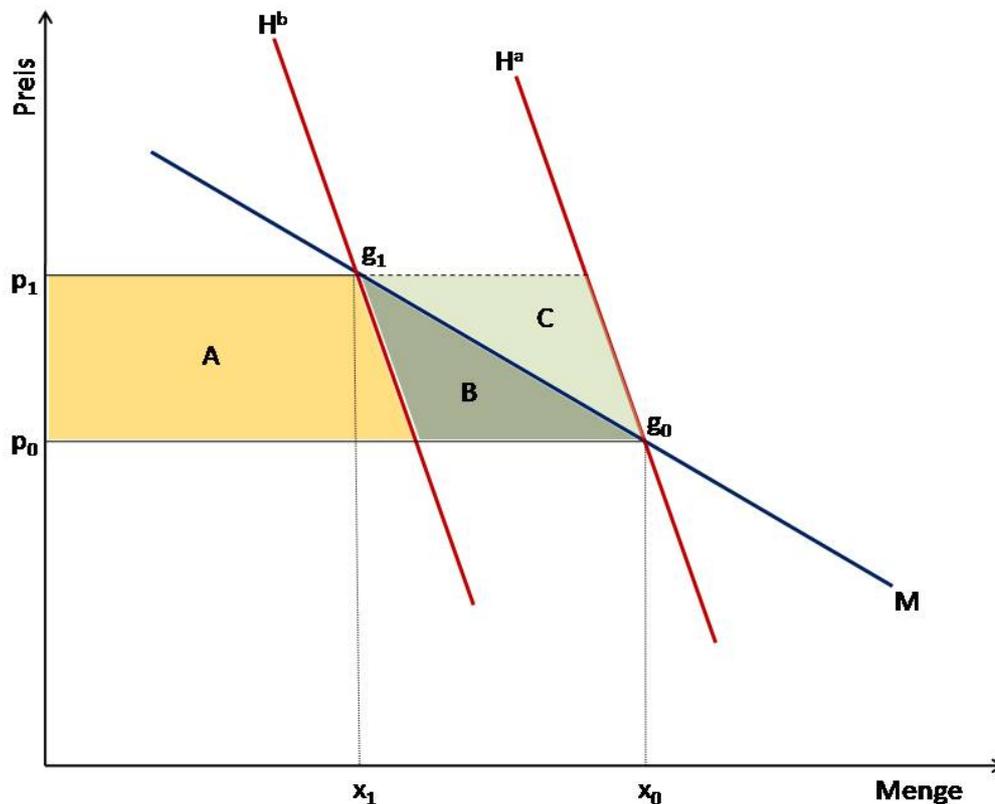


Abbildung 4: Konsumentenrente, Kompensations- und Äquivalenzvariation.¹⁸

Dafür ist der Verlauf der Nachfragefunktionen (nach Hicks) zu betrachten. In Abbildung 4 entsprechen sowohl H^a als auch H^b der hicks'schen Nachfrage auf zwei unterschiedlichen Nutzenniveaus, wobei „a“ höher liegt als „b“. Geht man vom höheren Nutzenniveau aus, so schneidet H^a die Nachfragefunktion M in g_0 , weil bei gegebenem Preis p_0 mit dem M unterliegenden Einkommen genau das Nutzenniveau a erreicht werden kann. Steigt nun der Preis, so bewegt man sich bei konstantem Einkommen auf M von g_0 nach g_1 . Dabei fällt der Nutzen von Niveau a auf b . Will man jedoch den Nutzen H^a entlang konstant halten, muss zwangsläufig das Einkommen steigen. Und zwar genau um den Betrag, der durch die Fläche links von H^a zwischen altem und neuem Preis bestimmt wird. Diese Fläche entspricht den Teilflächen $A+B+C$ (Camm, 1986, S. 26). In Analogie beschreibt die Fläche A die EV, wenn das neue Nutzenniveau bereits vor der Maßnahme erreicht werden soll.

¹⁸ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Camm (1983, S. 25).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Kompensationsfähigkeit der Gewinner einer verkehrspolitischen Maßnahme sich mittels der Konsumentenrente ermitteln lässt, sofern der Einkommenseffekt vernachlässigbar klein bleibt. Auch wenn dies im Bezug auf Verkehr in westlichen Gesellschaften der Fall zu sein scheint, lässt sich diese Approximation auf Länder mit anderer Einkommensverteilung nicht zwangsläufig übertragen. In solchen Fällen müsste die nötige Kompensation nach CV oder EV berechnet werden. Nach den Arbeiten von Small / Rosen (1981) ist dies für diskrete Entscheidungsmodelle, wie sie in der Verkehrswissenschaft häufig angewandt werden, unter bestimmten Annahmen auch möglich.

Eine dieser Annahmen wurde in der Literatur allerdings häufig kritisiert: bei der Berechnung von CV oder EV wird dabei von **konstantem marginalen Nutzen des Einkommens** ausgegangen (Franklin, 2006 sowie Jara-Díaz, 1989). Dies impliziert, dass eine zusätzliche Einheit Einkommen für alle Individuen denselben Nutzen stiftet, unabhängig vom Einkommen der jeweils betrachteten Person. Eine derartige Vereinfachung erscheint in Ländern mit einer sehr großen Einkommensspanne äußerst fragwürdig. Daraus folgt, dass die Genauigkeit der CV, genau wenn man sie eigentlich bräuchte, gegenüber einer einfachen CS-Abschätzung nahezu unbedeutend wird. Karlström / Morey (2001) entwickelten deshalb eine Formel zur Berechnung der CV in diskreten Entscheidungsmodellen, bei denen Einkommen nicht-linear eingeht. Franklin (2006) benutzt diese Forschungsarbeiten, um für ein sehr einfaches Szenario, in dem die Verkehrsmittelwahl zwischen Auto und Bus untersucht wird, einkommensabhängige Wohlfahrtswirkungen auf individueller Ebene mittels CV zu berechnen. Dabei stellt er fest, dass diese Methode einerseits sehr viele Eingangsdaten braucht und andererseits sehr rechenaufwendig ist. Es sind **für jedes Individuum** in einem iterativen Prozess zunächst die Kompensationsniveaus zu bestimmen und anschließend das entsprechende Integral als Fläche unter der Nachfragefunktion, welches nur numerisch berechnet werden kann (Franklin, 2006, S. 25). Diese aufwendige Vorgehensweise schränkt die Praktikabilität des Modells besonders für Multi-Agenten-Simulationen, bei denen die Verkehrsteilnehmer nicht nur Entscheidungen bzgl. der Verkehrsmittelwahl sondern auch bzgl. der Routen- und Abfahrtszeitwahl zu treffen haben deutlich ein. Deshalb wird in Kapitel 9 eine pragmatischere Herangehensweise zur Berechnung der CV verwendet. Dort wird versucht, die Nutzenunterschiede der Individuen direkt über eine Erhöhung oder Senkung ihres Einkommens auszugleichen.

4 Vorstellung der Modellierungssoftware MATSim

Zur Simulation und Auswertung des Verkehrs wird in dieser Arbeit die Software MATSim (Multi-Agent Transport Simulation Toolkit) verwendet. Sie wird in Zusammenarbeit zwischen dem Fachgebiet für Verkehrssystemplanung und Verkehrstelematik der Technischen Universität Berlin, dem Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich und dem Laboratoire d'Économie des Transports der Universität Lyon stetig weiter entwickelt. MATSim kann unter <http://www.matsim.org> kostenlos heruntergeladen werden und bietet momentan folgende Module an, die bei Bedarf angepasst oder erweitert werden können:

- Modellierung der Verkehrsnachfrage
- Agentenbasierte Mikrosimulation
- Iterative Bewertung der Tagespläne (scoring)
- Variation der Tagespläne (replanning)
- Methoden zur Auswertung der Ergebnisse

Der konzeptionelle Ansatz von MATSim unterscheidet sich grundsätzlich von bekannter kommerzieller Verkehrssimulationssoftware wie VISUM / VISEVA oder OmniTRANS. Während letztere lediglich eine aggregierte Nachfrage auf das jeweilige Verkehrsnetz der verschiedenen Verkehrssysteme umlegen und sich so statische Flüsse auf den Strecken in vordefinierten Zeitintervallen darstellen lassen, erlaubt der mikroskopische, verhaltensbasierte Ansatz von MATSim eine deutlich kleinräumigere personenbezogene und tageszeitabhängige Analyse. Diese Entwicklung von der Verwendung aggregierter zu detaillierteren, personenbezogenen Daten lässt sich historisch erklären. Lange Zeit waren die Möglichkeiten der Datenerhebung und –verarbeitung sehr begrenzt. Mit der stetig wachsenden Leistungsfähigkeit der Computer ist es mittlerweile allerdings möglich, die durch moderne Technologien gewonnenen Daten in mikroskopischen Modellen zu verarbeiten und so Analysen auch großer Ballungsräume durchzuführen (vgl. Rieser / Grether / Nagel, 2008). Der Begriff „Mikrosimulation“ bedeutet in diesem Kontext, dass jede Person als eigenständiger Agent mit beliebig vielen individuellen Eigenschaften simuliert wird. So wird davon ausgegangen, dass er seine Verkehrsnachfrage im Bezug auf Abfahrtszeiten, Verkehrsmittel und Routen anhand einer Auswahl zwischen verschiedenen Tagesplänen mit variierenden Aktivitätenketten individuell optimiert. Im Folgenden soll die grundsätzliche Struktur von MATSim näher erklärt werden und dabei besonders auf die in dieser Arbeit verwendeten Module genauer eingegangen werden.

4.1 Struktur von MATSim

Die Prozess-Struktur von MATSim lässt sich in vier unterschiedliche Module einteilen, die für jedes Szenario nacheinander durchgeführt werden:

- Erstellung des Szenarios
- Modellierung der individuellen initialen Verkehrsnachfrage (Tagespläne)
- Iterative Optimierung der Verkehrsnachfrage
- Analyse und Bewertung der Ergebnisse

Wie aus Abbildung 5 entnommen werden kann, werden in einem ersten Schritt Daten des Verkehrsnetzes, der Landnutzung und der Bevölkerung benötigt. Diese bilden den Grundstein des Szenarios.

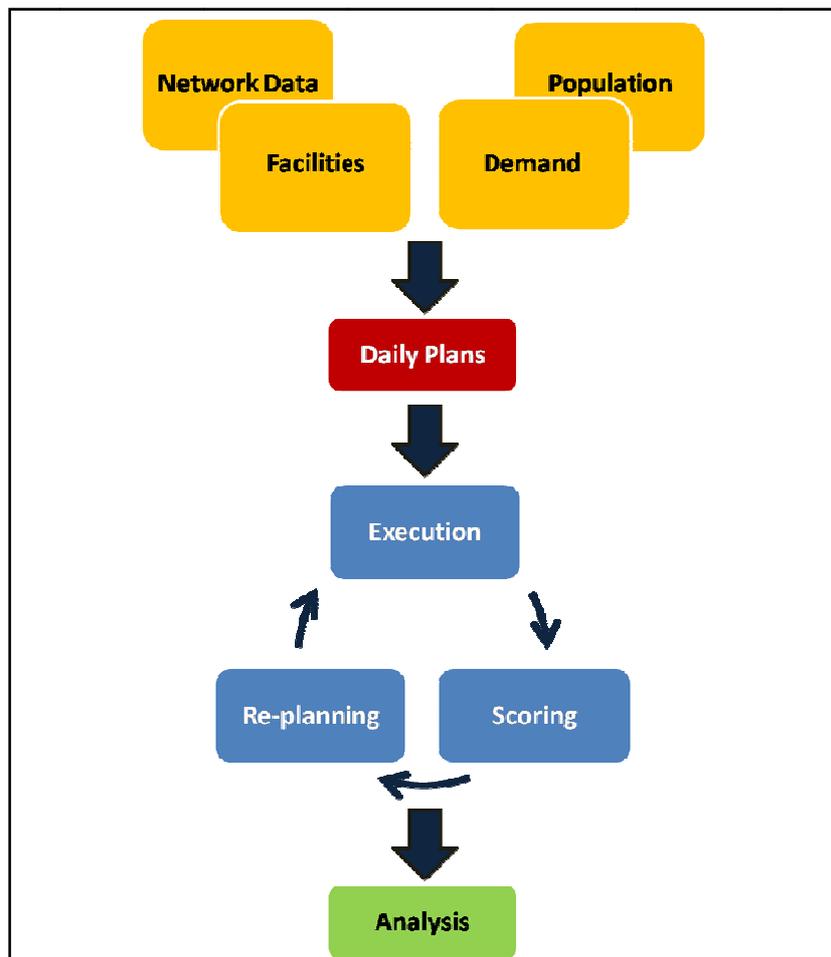


Abbildung 5: Die Prozess-Struktur von MATSim.¹⁹

¹⁹ Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung Grether (2007).

Dabei enthalten die Daten des Verkehrsnetzes Informationen über die Kapazitäten, maximale Geschwindigkeiten, Längen und erlaubte Verkehrsmittel auf den einzelnen Strecken. Anhand der Landnutzungsdaten können Lage, Öffnungszeiten, Anzahl der Arbeitsplätze und somit die Attraktivität der verschiedenen Aktivitätenorte bestimmt werden. Die Datensätze über die Bevölkerung können unterschiedlichste sozio-ökonomische Charakteristika wie Wohnort, Einkommen, Arbeitsplatz etc. enthalten. Je nach Verfügbarkeit und Auflösung der Daten unterscheidet sich dieses Modul deutlich von einem Szenario zu einem anderen. Insbesondere Daten über die Bevölkerung gelten i. d. R. als sensibel und müssen teilweise aus aggregierten Daten umgerechnet werden. Deshalb werden die generierten Personen als „synthetische Bevölkerung“ bezeichnet. Die vorliegenden Daten werden nun in einem *.xml-basierten Datenformat zusammengefasst. In diesen Dateien sind alle relevanten Informationen zum Verkehrsnetz, zu den Aktivitätenorten und zu den initialen individuellen Verkehrsnachfragen gespeichert (Balmer et al., 2008). Auf dieser Basis kann nun in einem zweiten Schritt diese individuelle Verkehrsnachfrage in personenbezogene Tagespläne überführt werden. Die folgende Betrachtungsweise bildet die konzeptionelle Grundidee von MATSim: jeder Person sind verschiedene Aktivitäten zugeordnet, die sie innerhalb eines Tages an bestimmten Orten ausführen will oder muss. Zu diesen zählen Arbeiten, Einkaufen, Freizeit, Zeit zu Hause verbringen etc. Die Agenten nehmen sich also an einem bestimmten Tag verschiedenste Aktivitäten vor, die sie sequentiell aneinander reihen. Dazwischen liegen damit verbundene Ortswechsel, welche auf dem Verkehrsnetz sichtbar werden. Entscheidungen über die Zeit eines Aktivitätenwechsels, über die Route und über die Dauer einer Aktivität sind dabei den Agenten selbst überlassen.²⁰ Mit diesem Ansatz orientiert sich die Verkehrsnachfrage direkt an der Ausübung von Aktivitäten, wie es von Ben-Akiva / Lerman (1985, S. 362) gefordert wurde. Es wird also für jeden Agenten ein initialer Tagesplan erstellt, in dem sich die Aktivitäten mit Lage und zeitlicher Dauer befinden. Darüber hinaus kann auch das verwendete Verkehrsmittel und die gefahrene Route entnommen werden, wie Abbildung 6 zeigt.

²⁰ Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass sich die absoluten Werte der initialen Verkehrsnachfrage nicht durch eine Verkehrsmaßnahme ändern. Es können also bislang keine Aktivitäten entfernt werden oder deren Orte durch die Agenten verändert werden. Somit kann es bspw. bei der Einführung einer Maut nicht zur Unterlassung von Fahrten kommen, sondern lediglich zu einer veränderten Routen-, Abfahrtszeit- oder Verkehrsmittelwahl. Dies widerspricht teilweise der ökonomischen Sichtweise des Verkehrsmarktes, in der eine Preissteigerung i. d. R. zum Wegfall von Fahrten bzw. zum Unterlassen einzelner Aktivitäten führen würde.

```
<person id="1">
  <plan selected="yes">
    <act type="home" link="1" end_time="06:00:00" />

    <leg mode="car">
      <route dist="12500.0">
        2 3 4
      </route>
    </leg>

    <act type="work" link="4" start_time="07:00:00"
      dur="08:00:00" end_time="15:00:00" />

    <leg mode="car">
      <route dist="30000.0">
        5 6 7 1
      </route>
    </leg>

    <act type="home" link="1" />
  </plan>
</person>
```

Abbildung 6: Beispielhafte Beschreibung der initialen Verkehrsnachfrage einer synthetischen Person für einen gesamten Tag.²¹

Den dritten Schritt des MATSim-Prozesses stellt die Mikrosimulation dar. Dazu muss sichergestellt sein, dass sowohl eine vollständige Beschreibung der physikalischen Umgebung (Straßennetz, Kapazitäten, Geschwindigkeiten, Aktivitätenorte, Öffnungszeiten etc.) als auch der initialen individuellen Verkehrsnachfrage in Form von Tagesplänen vorliegt. Die Aufgabe der Mikrosimulation ist es nun, die Aktivitätenpläne in eben dieser physikalischen Umgebung auszuführen. Für den Autoverkehr wird jede Straße als eine Warteschlange simuliert, in der die Fahrzeuge mindestens solange warten müssen, wie sie für das Durchfahren der Straße bei leerem Netz benötigen würden (Gawron, 1998). Auf jeder Straße ist sowohl der Verkehrsfluss als auch die Kapazität beschränkt. Dies führt dazu, dass einerseits Stauereffekte auf dieser Strecke abgebildet werden können, andererseits auch Rückstau auf vorgelagerten Strecken auftreten kann sobald die betrachtete Straße ihre Kapazitätsgrenze erreicht hat. Für die Simulation des öffentlichen Verkehrs ist in MATSim derzeit noch kein Verkehrsnetz implementiert. Deshalb erfolgt die Fortbewegung bei Wahl

²¹ Quelle: Eigene Darstellung. Der Agent mit der ID 1 verlässt sein Zuhause, das auf Strecke 1 des Verkehrsnetzes verortet ist um 06:00 Uhr früh, um dann mit dem Auto zur Arbeit zu fahren. Dabei überfährt er die Knoten 2,3 und 4 und legt 12,5 km zurück. Um 07:00 fängt er an zu arbeiten, um dann gegen 15:00 Uhr wiederum mit dem Auto zurück nach Hause zu fahren. Dabei fährt er über die Knoten 5,6,7 und 1 und legt 30 km zurück.

des öffentlichen Verkehrs durch einen Teleport der Personen von einem Aktivitätenort zum anderen. Diese findet aber nicht ohne Zeitverlust statt, sondern unterliegt der Annahme, dass sie immer die **doppelte Reisezeit** des Autos bei leerem Netz in Anspruch nimmt. Die Basis dieser Annahme bildet eine Untersuchung von Reinhold (2006): dort konnte gezeigt werden, dass Personen, die nicht auf den öffentlichen Nahverkehr angewiesen sind, damit beginnen auf den ÖV zu wechseln, sobald dessen Fahrtzeit unterhalb der genannten Schwelle liegt. Letztendlich gibt die Mikrosimulation zeitlich und räumlich hochaufgelöste Ereignisse (events) aus, die beschreiben, wo jeder Agent sich zu einer bestimmten Tageszeit befindet und was er an diesem Ort für eine Tätigkeit ausübt (Balmer et al., 2008, S. 8). Durch die Ausführung der Tagespläne ergeben sich auf den einzelnen Strecken des Netzes neue Reisezeiten, was wiederum eine Änderung der Tagespläne einiger Agenten nach sich zieht. Diese Nachfrageänderungen wirken sich nun jedoch wieder auf das gesamte System aus. So muss innerhalb der Mikrosimulation solange iteriert werden, bis sich eine relaxierte, optimierte Nachfrage ergibt und nur noch wenige Agenten durch die Änderung ihres Tagesplans einen Nutzengewinn verspüren. Dabei spielen insbesondere die Bewertung der Tagespläne durch die Agenten (scoring) sowie die Variation derselben (replanning) eine entscheidende Rolle. Diese beiden Bestandteile des iterativen Prozesses werden in den Abschnitten 0 und 4.3 genauer erläutert.

Der letzte Schritt der Analyse und Bewertung der Ergebnisse soll hier nicht gesondert dargestellt werden. Grundsätzlich sind verschiedenste Auswertungen anhand der von MATSim generierten Daten möglich. Dazu zählen u. a. die Übersicht des simulierten Verkehrsaufkommens mit Vergleich zu realen Zählstellen, eine zeitabhängige Visualisierung der Fahrzeuge im Verkehrsnetz oder eine Darstellung der Effekte einer Verkehrsmaßnahme auf die einzelnen Agenten. Derartige Auswertungen werden in den Abschnitten 6 und 7 vorgenommen.

4.2 Bewertung der Tagespläne (scoring)

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erklärt wurde, ist der Nutzen respektive die Attraktivität eines Tagesplanes abhängig vom Verhalten aller anderen Agenten, die sich im selben Netz bewegen. Die jeweiligen Tagespläne beeinflussen also in gewisser Weise die Planung der Tagespläne anderer Agenten, weil diese zwangsläufig interagieren. Es ist also wahrscheinlich, dass einige Agenten ihren Tagesplan aufgrund ihrer Erfahrungen mit ihrer initialen Planung ändern und herausfinden wollen, ob sie dadurch besser durch den Tag kommen – also ihren Nutzen erhöhen können. Diese Herangehensweise wird als „day-to-day replanning“ bezeichnet und im folgenden Abschnitt 4.3 genauer dargestellt. Die Vergleichbarkeit zweier Tagespläne wird in MATSim durch eine (individuelle) Nutzenfunktion ermöglicht: sie drückt die Präferenzen der einzelnen Agenten aus und beschreibt wie diese bspw. das Ausüben einer Aktivität, das verspätete Eintreffen am Aktivitätenort oder die Zeit des Reisens in ihrem persönlichen Kalkül bewerten.²² Grundsätzlich können beliebige Nutzenfunktionen zur Bewertung der Tagespläne herangezogen werden, in der aktuellen Version von MATSim wird für alle Agenten folgende in Charypar / Nagel (2005) beschriebene Nutzenfunktion verwendet:

$$U_{Plan_total} = \sum_{i=1}^n U_{perf,i} + \sum_{i=1}^n U_{late,i} + \sum_{i=1}^n U_{travel,i} \quad (4.1)$$

Dabei bezeichnet i eine einzelne Aktivität wie Arbeiten, Einkaufen oder Zeit zu Hause verbringen. Der aggregierte Nutzen eines Tagesplanes mit n Aktivitäten setzt sich demnach aus den im Folgenden ausgeführten Teilnutzen zusammen:

1. Positiver Nutzen durch die Ausübung von Aktivitäten

Der positive Nutzen durch die Ausübung von Aktivitäten hat die folgende logarithmische Form:

$$U_{perf,i}(t_{perf,i}) = \beta_{perf} \cdot t_i^* \cdot \ln\left(\frac{t_{perf,i}}{t_{0,i}}\right) \quad (4.2)$$

Hier korrespondiert t_{perf} mit der tatsächlich, t^* mit der typischerweise verwendeten Zeit für Aktivität i . β_{perf} stellt den marginalen Nutzen einer Aktivität dar, wenn diese über ihre typische Zeit ausgeübt wird. Dieser wichtige Verhaltensparameter hat für

²² Dieses Bewerten der einzelnen Teile der Tagespläne wird als „scoring“ bezeichnet. Es wird durch sog. „scoring functions“ vorgenommen, die als Synonyme zu den hier verwendeten Nutzenfunktionen gebraucht werden können.

alle Aktivitäten denselben Wert, da jeder Agent für alle Aktivitäten ihre typische Dauer anstrebt. Würden die Aktivitäten nicht in ihrer typischen Dauer ausgeübt, könnte der Agent durch das Verkürzen der einen und das Verlängern einer anderen Aktivität an Nutzen gewinnen. t_0 skaliert die Nutzenfunktion und bestimmt einerseits die minimale Dauer und andererseits die Wichtigkeit einer Aktivität (Rieser / Grether / Nagel, 2008, S. 5). Wenn t_{perf} unter die minimale Dauer fällt, dann würde der aus der Aktivität gewonnene Nutzen negativ, so dass deren Durchführung für den Agenten keinen Sinn mehr machen würde. In dieser Arbeit wird Rieser / Grether / Nagel (2008) gefolgt und t_0 wie folgt definiert:

$$t_{0,i} = t_i^* \cdot e^{\left(\frac{-\zeta}{t_i^*}\right)} \quad (4.3)$$

ζ ist ein Skalierungsfaktor, der auf 10 Stunden festgesetzt wurde.

2. Negativer Nutzen durch zu spätes Eintreffen an Aktivitätenorten

In den Testszenarien, die in Kapitel 6 beschrieben werden, musste zusätzlich noch ein negativer Nutzen betrachtet werden, der durch verspätetes Eintreffen am Aktivitätenort entsteht. Dieser wird wie folgt definiert:

$$U_{late,i} = \beta_{late} \cdot t_{late,i} \quad (4.4)$$

β_{late} beschreibt dabei den marginalen negativen Nutzen des verspäteten Eintreffens und $t_{late,i}$ die Verspätung zur Aktivität in Stunden. In den realen Szenarien des Großraumes Zürich muss diese Bestrafung für das verspätete Eintreffen am Aktivitätenort nicht in die Nutzenfunktion aufgenommen werden. Zum einen fehlen dazu relevante Daten, bspw. welcher Agent pünktlich zur Arbeit erscheinen muss und welcher vielleicht in Gleitzeit arbeitet. Zum anderen wird bei der Betrachtung eines mit verschiedenen Aktivitäten gefüllten Tagesplans indirekt eine Bestrafung für das zu späte Eintreffen über die Opportunitätskosten der Zeit erteilt.

3. Negativer Nutzen durch das Reisen

Der letzte Teilnutzen, der von den Agenten gemäß der in Gleichung (4.1) aufgeführten Funktion bewertet wird, ist das Reisen. In der aktuellen Version von MATSim hängt der negative Nutzen, der dadurch entsteht lediglich von der Reisezeit ab und hat die folgende funktionelle Form:

$$U_{travel,i} = \beta_{travel} \cdot t_{travel,i} \quad (4.5)$$

Dabei ist β_{travel} der marginale negative Nutzen des Reisens und $t_{travel,i}$ die Reisezeit in Stunden, die nötig ist, um zu Aktivität i zu gelangen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der vom Reisen abhängige Teil der Nutzenfunktion um monetäre Einflussfaktoren erweitert werden. Darüber hinaus werden die relevanten Verhaltensparameter für alle verwendeten Verkehrsmittel aus vorliegenden Befragungsdaten geschätzt. Das genaue Vorgehen sowie die Ergebnisse und Konsequenzen dieser Veränderungen sind in Kapitel 5 dokumentiert.

Schließlich ergibt sich durch die Aufsummierung der jeweiligen Teilnutzen aller Aktivitäten eines Tagesplanes für jeden Agenten eine Bewertung desselben. Diese Bewertung ist eine absolute Zahl in der Einheit „Nutzen“ und ermöglicht es dem Agenten verschiedene Tagespläne im Laufe einer im Folgenden beschriebenen Variation der Tagespläne auf einer ordinalen Skala zu vergleichen.

4.3 Variation und Auswahl der Tagespläne (replanning)

Die Grundidee der Verkehrssimulationssoftware MATSim stellt sich wie folgt dar: Die Agenten versuchen ihre initialen Tagespläne so zu optimieren, dass sie einen möglichst großen Nutzen daraus beziehen. Dieser hängt von ihren Präferenzen, respektive ihrer Nutzenfunktion ab und lässt sich anhand dreier Entscheidungen verändern: erstens, die **Wahl der Abfahrtszeit**, zu der sie eine Aktivität beenden. Zweitens, die **Wahl der Route** auf der sie sich von einer Aktivität zu einer anderen begeben. Und schließlich drittens, die **Wahl des Verkehrsmittels**. Es wird angenommen, dass ein Teil der Agenten ihren Tagesplan vor einer Iteration auf der Basis der vorangegangenen verändern und diesen dann am folgenden Tag (bzw. in der folgenden Iteration) ausführen. Dieser Prozess wird als „day-to-day replanning“ bezeichnet.²³ Um sicherzustellen, dass jeder Agent seinen Nutzen im Rahmen seiner Präferenzen optimiert, wird in jeder Iteration bei einem Teil der Agenten eine Kopie eines existierenden Tagesplans angelegt, entsprechend einer der drei Wahlmöglichkeiten zufällig verändert und schließlich in der folgenden Iteration ausgeführt sowie bewertet. Zuständig dafür sind die folgenden drei Module, die jeweils pro Iteration 10 % der vorhandenen Tagespläne verändern:

²³ Das „day-to-day replanning“ ist zu unterscheiden vom „within-day replanning“. Letzteres gäbe den Agenten die Möglichkeit während eines Tages (bzw. innerhalb einer Iteration) ihren Tagesplan spontan zu verändern. Diese Option ist momentan nur als Prototyp implementiert (Balmer et al., 2008).

1. Time Allocation Mutator Module

Innerhalb dieses Moduls werden die Abfahrtszeiten und Ausübungszeiten von Aktivitäten im Tagesplan zufällig verändert (Balmer et al., 2008).

2. Route Choice Module

Sind die Abfahrtszeiten und die Reisezeiten aller Stecken im Netz aus der letzten Iteration gegeben, werden hier die besten Routen für alle Tagespläne berechnet. Als beste Routen sind diejenigen mit minimalem Nutzenverlust definiert (ebd.).

3. Mode Choice Module

Dieses Modul stellt sicher, dass alle Agenten immer mindestens über einen Tagesplan mit dem Auto und über einen Tagesplan mit dem öffentlichen Verkehr verfügen und damit immer die Wahl eines Verkehrsmittelwechsels haben. Im Moment können die Agenten während eines Tages das Verkehrsmittel noch nicht wechseln, d. h. es existieren keine Tagespläne, die sowohl Auto und ÖV enthalten.²⁴ Die Integration der Verkehrsmittelwahl in den replanning Prozess hat im Vergleich zur Verkehrsmittelwahl im Vier-Stufen-Prozess der Verkehrsplanung einen deutlichen Vorteil: die Verkehrsmittelwahl ist nun interdependent mit der Routenwahl und muss nicht mehr vor Verkehrsumlegung festgelegt werden (Rieser / Grether / Nagel, 2008).

Bei Bedarf können weitere Module eingebunden werden, innerhalb derer bspw. die Wahl über den aufgesuchten Aktivitätenstandort getroffen werden kann. Alle Agenten, deren Tagespläne nicht durch eines der drei Module verändert wurden, benutzen in der folgenden Iteration einen der bereits für sie existierenden Pläne. Zur Reduzierung der Hauptspeicherauslastung beim Durchführen der Simulationen ist für jeden Agenten eine maximale Anzahl an vier Tagesplänen definiert. Sollte diese Anzahl überschritten werden, wird der Plan mit dem niedrigsten Nutzen gelöscht.

Im Zuge des sich wiederholenden Prozesses aus Ausführung, Bewertung und Variation der Pläne in den Iterationen, müssen sich die Agenten entscheiden, ob sie den gerade ausgeführten Plan oder einen zufällig ausgewählten anderen ihrer Pläne durchführen wollen.

²⁴ Außerdem wird in diesem Ansatz noch nicht berücksichtigt, dass manche Agenten ggf. nicht über ein Auto verfügen. Wenn allerdings Daten über die Autoverfügbarkeit vorhanden sind, so ist die Implementierung in MATSim als wenig aufwendig einzuschätzen: für diese sog. „captive“ würden keine Tagespläne mit dem Auto generiert werden.

Die Wahrscheinlichkeit, vom gerade ausgeführten Plan auf den zufällig ausgewählten zu wechseln wird in MATSim folgendermaßen berechnet:

$$P_{change} = P_{current \rightarrow random} = \min\left(1; \alpha \cdot e^{0.5\gamma \cdot (V_{random} - V_{current})}\right) \quad (4.6)$$

Dabei fixiert der Skalierungsparameter α die Wahrscheinlichkeit eines Wechsels zu 1 %, falls der zufällig ausgewählte (random) und der zuvor ausgeführte (current) Plan denselben beobachteten Nutzen erzeugen ($V_{random} = V_{current}$). Der Sensitivitätsparameter γ beschreibt die Rationalität nach der sich die Agenten zwischen den beiden Tagesplänen entscheiden. Ein hohes γ beschreibt Agenten, die tendenziell die Nutzen maximierende Alternative wählen, während ein kleines γ ein zufälligeres Entscheiden impliziert. Über mehrere Iterationen konvergiert diese funktionale Auswahlwahrscheinlichkeit zu dem in Abschnitt 2.2.2 erläuterten Binary Logit Modell:

$$P_{random} = \frac{e^{\gamma \cdot V_{random}}}{e^{\gamma \cdot V_{current}} + e^{\gamma \cdot V_{random}}} = \frac{1}{1 + e^{\gamma \cdot (V_{current} - V_{random})}} \quad (4.7)$$

Aus Konvergenz- und Implementierungsgründen wurde in MATSim der Ansatz aus Gleichung (4.6) verwendet, der sich aus den Übergangswahrscheinlichkeiten der beiden Alternativen ergibt:

$$P_{random \rightarrow current} \cdot P_{random} = P_{current \rightarrow random} \cdot P_{current} \quad (4.8)$$

Es wird angenommen, dass die Wahrscheinlichkeit vom zuvor ausgeführten auf einen zufällig ausgewählten Plan zu wechseln multipliziert mit der Auswahlwahrscheinlichkeit des zuvor ausgewählten Plans $P_{current}$ gleich ist mit der Wahrscheinlichkeit eines Wechsels von einem zufällig ausgewählten auf den zuvor ausgeführten Plan multipliziert mit seiner Wahrscheinlichkeit P_{random} . Setzt man nun die Wechselwahrscheinlichkeiten aus Gleichung (4.6) ein, erhält man:

$$e^{0.5\gamma \cdot (V_{current} - V_{random})} \cdot P_{random} = e^{0.5\gamma \cdot (V_{random} - V_{current})} \cdot P_{current} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow \frac{P_{random}}{P_{current}} &= \frac{e^{0.5\gamma \cdot (V_{random} - V_{current})}}{e^{0.5\gamma \cdot (V_{current} - V_{random})}} \\ &= e^{0.5\gamma \cdot (V_{random} - V_{current}) - 0.5\gamma \cdot (V_{current} - V_{random})} \\ &= e^{\gamma \cdot (V_{random} - V_{current})} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Der Quotient $P_{random}/P_{current}$ besagt, um welchen Faktor sich die Wahrscheinlichkeit einen zufälligen Plan zu wählen von der Wahrscheinlichkeit den bisherigen Plan zu wählen unterscheidet. Begrenzt man diesen Faktor wie in Gleichung (4.6) nach oben bei 1, so erhält

man eine Wahrscheinlichkeit für den Wechsel. Das klassische Binary Choice Modell aus Gleichung (4.7) ergibt offensichtlich dasselbe Ergebnis wie Gleichung (4.10):²⁵

$$\frac{P_{random}}{P_{current}} = \frac{e^{\gamma \cdot V_{random}}}{e^{\gamma \cdot V_{current}}} = e^{\gamma \cdot (V_{random} - V_{current})} \quad (4.11)$$

Es bleibt also festzuhalten, dass die Agenten anhand dieser Methodik in der Lage sind, ihre Tagespläne gemäß ihrer Präferenzen, respektive ihrer Nutzenfunktion zu optimieren. Sie funktioniert unabhängig von der Wahl der Funktionen und darin enthaltenen Einflussfaktoren auf den Nutzen. Bei der bisherigen Bewertung der Nutzen wird allerdings einigen in der Verkehrswissenschaft als relevant angesehenen Einflussfaktoren auf das Verkehrsverhalten noch nicht Rechnung getragen. Mit einer deshalb nötigen Erweiterung der Nutzenfunktionen beschäftigt sich aus diesem Grund das folgende Kapitel 5.

²⁵ Die Skalierung von γ um den Faktor 0.5 bei dem in MATSim verwendeten Ansatz wird lediglich dafür benötigt, damit beide Ansätze dasselbe Ergebnis liefern.

5 Erweiterung der MATSim-Nutzenfunktion um monetäre Einflussfaktoren

Ein Hauptziel dieser Arbeit ist neben der ökonomischen Bewertung von Verkehrsmaßnahmen die Erweiterung der bisher in MATSim verwendeten Nutzenfunktion. Auch sollen die zugehörigen Verhaltensparameter verlässlich aus vorhandenen Umfragedaten geschätzt werden.

Wie bereits in Kapitel 4 erläutert wurde, hat die momentan in MATSim verwendete Nutzenfunktion zur Bewertung der Tagespläne folgende zusammengesetzte Form:

$$U_{Plan_total} = \sum_{i=1}^n U_{perf,i} + \sum_{i=1}^n U_{late,i} + \sum_{i=1}^n U_{travel,i} \quad (5.1)$$

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Erweiterung des reisebezogenen Teils der Nutzenfunktion. Die aktuelle Form

$$U_{travel,i}(t_{travel,i}) = \beta_{travel} \cdot t_{travel,i} \quad (5.2)$$

ermöglicht lediglich die Abhängigkeit des negativen Nutzens durch Reisen von der Reisezeit darzustellen. Anders gesagt bedeutet dies, dass in diesem Teil der Nutzenfunktion aktuell ausschließlich die Reisezeiten einen Einfluss auf die Verkehrsmittel-, Routen- und Abfahrtszeitwahl der Verkehrsteilnehmer haben. Zudem wurden in den vergangenen Simulationen Werte aus der Literatur und keine eigens bestimmten empirischen Schätzwerte für den Verhaltensparameter β_{travel} verwendet (z. B. Rieser / Grether / Nagel, 2008).

Die Ergebnisse anderer Publikationen, in denen ausführlichere Nutzenfunktionen verwendet wurden, legen eine Erweiterung der MATSim-Nutzenfunktionen nahe (z. B. Beckers et al., 2007 oder Franklin, 2006). Neben den Reisezeitkosten gelten demnach vor allem die Distanzkosten und ggf. eine Maut oder Parkgebühren als weitere wichtige Einflussfaktoren auf das Reiseverhalten. Dabei ist zwischen den verschiedenen in die Simulation implementierten Verkehrsmitteln zu unterscheiden: Zeitkosten fallen in allen Verkehrsmitteln an, werden allerdings unterschiedlich empfunden. So stellt eine Stunde Reisen im Auto eine Person sicher nicht vor dieselben Schwierigkeiten wie wenn sie eine Stunde zur Arbeit laufen müsste. Dies spiegelt sich in den unterschiedlichen verkehrsmittelabhängigen Verhaltensparametern der Reisezeit wieder. Bei den rein monetären Kosten können je nach Verkehrsmittel unterschiedliche Aspekte betrachtet werden, was wiederum zu unterschiedlichen Verhaltensparametern führt. Beim Auto reicht die Betrachtung der monetären Größen von der Abbildung der distanzabhängigen Kosten für Treibstoff bis hin zur Integration von Fixkosten wie Anschaffung oder Versicherung. Im öffentlichen

Nahverkehr nehmen diese Kosten zwar mit der zurückgelegten Distanz zu, sind aber meist nicht linear sondern haben einen stufenförmigen Verlauf (Tarifzonen). Es existieren also unterschiedliche Betrachtungsweisen bzgl. der Distanzkosten, die bei der Erhebung von Daten und dem Aufstellen eines Modells beachtet werden müssen.

Aufgrund dieser Überlegungen wurde das folgende verkehrsmittelabhängige Modell für den reisebezogenen Teil der MATSim-Nutzenfunktion formuliert, welches einerseits eine Integration bisher nicht betrachteter Faktoren ermöglicht, andererseits aber zur einfacheren Handhabung eine gewisse Detailgenauigkeit nicht überschreitet:

$$U_{car} = \beta_0 + \beta_{tt_car} \cdot t_{car} + \beta_{cost_car} \cdot c_{car} + \beta_{toll} \cdot c_{toll} \quad (5.3)$$

$$U_{pt} = \beta_1 + \beta_{tt_pt} \cdot t_{pt} + \beta_{fare_pt} \cdot c_{pt} \quad (5.4)$$

$$U_{wlk} = \beta_{tt_wlk} \cdot t_{wlk} \quad (5.5)$$

Diese drei Nutzenfunktionen, welche sowohl linear in den Parametern als auch linear in den Variablen sind, korrespondieren mit den drei Verkehrsmitteln Auto (*car*), öffentlicher Verkehr (*pt*) und Fußverkehr (*wlk*). Wie man Gleichung (5.3) entnehmen kann, sind die Kosten einer Reise mit dem Auto nicht mehr nur abhängig von der Reisezeit mit dem Auto t_{car} , sondern auch von den variablen Distanzkosten c_{car} und einer ggf. zu zahlenden Maut c_{toll} . Selbes gilt für den öffentlichen Verkehr, wobei eine Maut hier nicht in Frage kommt und dieser Term deshalb wegfällt. Lediglich für den Fußverkehr bleibt die alte Form erhalten, da bei diesem Verkehrsmittel keinerlei monetäre Kosten zu erwarten sind.

Zur Implementation in ein Testszenario, bei dem die Unterschiede der aktuellen und der neuen Nutzenfunktionen untersucht werden sollen (vgl. Kapitel 6), sind mehrere Schritte erforderlich. Zum einen müssen die Verhaltensparameter auf Grundlage von Umfragedaten geschätzt werden (Abschnitt 5.1) und zum anderen dann so interpretiert werden, dass sie in die von MATSim verwendeten Größen übertragen werden können (Abschnitt 5.2).

5.1 Schätzung der Verhaltensparameter

Nachdem im vorhergehenden Abschnitt die Nutzenfunktionen der drei betrachteten Verkehrsmittel definiert wurden, sollen nun die dort enthaltenen Verhaltensparameter für die Anwendung in den Simulationen bestimmt werden.

5.1.1 Eingangsdaten

Ausgangspunkt hierfür sind Befragungsdaten, die im Rahmen einer Studie zu „Mobility Pricing“ vom Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich erhoben und bereitgestellt wurden (Vrtic et al., 2007). Ziel dieser Studie war es, die möglichen Auswirkungen von Mobility Pricing auf das Verkehrsverhalten abzuschätzen. Dafür wurden verschiedene Bereiche untersucht. Auf der einen Seite wurden kurzfristige, taktische Verhaltensänderungen bzgl. der Verkehrsmittel-, Routen-, und Abfahrtszeitenwahl analysiert. Auf der anderen Seite konnten längerfristige, strategische Entscheidungen in die Analyse mit einbezogen werden, so z. B. die Anschaffung eines PKW oder eines ÖV-Abonnements sowie die Wahl des Wohnorts. Für eine Abschätzung der taktischen Verhaltensänderungen, die für die vorliegende Arbeit relevant sind, wurden vier verschiedene Stated Preference (SP) Befragungen durchgeführt, bei denen die Probanden sich zwischen verschiedenen vorgegebenen Alternativen entscheiden mussten. Im ersten Fragebogen wurde die politische Einstellung der Befragten zu Mobility Pricing im Allgemeinen abgefragt, so dass diese in den anschließenden Experimenten nicht mehr zum Ausdruck gebracht werden musste. In den drei übrigen Fragebögen wurden jeweils unterschiedliche taktische Wahlverhalten abgefragt:

- Wahl der Abfahrtszeit und Routenwahl im Strassenverkehr für Auto-Nutzer (SP2)
- Wahl der Abfahrtszeit und des Verkehrsmittels (SP3)
- Wahl des Verkehrsmittels und der Route (SP4)

Die aus den SP-Befragungen geschätzten Verhaltensparameter wurden anschließend mit den Ergebnissen von Revealed Preference (RP) Modellierungen überprüft, welche auf tatsächlich beobachtetem Verhalten basieren. So konnten im Endergebnis statistisch begründete Nachfrageelastizitäten und Zahlungsbereitschaften abgeleitet werden.

Die nachfolgenden Schätzungen wurden mit der Software BIOGEME durchgeführt, deren Funktionsweise in den Grundlagen unter Abschnitt 2.3 erläutert wurde. Dazu wurden die Daten der drei verschiedenen Befragungen SP2, SP3 und SP4, welche sich in einem gemeinsamen Datensatz befanden, getrennt und übersichtlicher gestaltet. Für die vorliegende Arbeit wurde der Fokus auf die Daten der Befragungen SP4 und SP2 gelegt. Aus diesen ließen sich alle Verhaltensparameter schätzen, die für die im weiteren Verlauf verwendeten Nutzenfunktionen relevant waren. Als Anschauungsbeispiel für das Zustandekommen der Befragungsdaten dient ein Fragebogen aus SP4, welcher in Abbildung 7 zu sehen ist: zunächst wurden die Probanden nach einem Weg gefragt, den sie an einem bestimmten Werktag zurückgelegt hatten. Für diesen Weg wurde von der PTV AG anhand der Angaben der Befragten eine Routensuche auf dem Straßennetz sowie auf dem

öffentlichen Nahverkehrsnetz der Schweiz durchgeführt, um die Fahrzeiten und die variablen Kosten der Fahrt zu berechnen. So entstand aus den Angaben der Befragten und den Berechnungen der Basisfall. Anschließend wurden für jede befragte Person auf Grundlage dieses Basisfalls sieben verschiedene Situationen generiert, indem die vorhandenen Werte variiert und zufällig miteinander kombiniert wurden (Vrtic et al., 2007, S. 119). Diese Variationen sollen anhand eines Beispiels bzgl. der Zugangszeit zur ÖV-Haltestelle erläutert werden: aus Abbildung 7 lässt sich entnehmen, dass die betrachtete Zeit auf 10 Minuten berechnet wurde. Dieser Wert wurde nun zufällig um -15 %, +15 % und +30 % variiert, so dass in diesem Fall letztendlich drei Werte für die Zugangszeit zu Verfügung standen: 8.5 Minuten, 11.5 Minuten und 13 Minuten. Ähnlich wurde bei den übrigen Einflussgrößen vorgegangen. So erhielt man pro Person sieben verschiedene Wahlentscheidungen, die allerdings teilweise auf zufällig variierten Werten beruhen.

Situation 1		
	 Auto	 Zug, Bus Tram
Fahrtzeit (min)	10 min	25 min
Variable Fahrtkosten	0,40 CHF	1,60 CHF
Umsteigehäufigkeit		2
Zugangszeit zur ÖV Haltestelle		10 min
Intervall		10 min
Höhe der Strassengebühr	0,40 CHF	
Parkgebühren	2,00 CHF	
<input type="checkbox"/> ← Ihre Wahl → <input type="checkbox"/>		

Abbildung 7: Beispiel für einen Fragebogen der Befragung SP4.²⁶

Anzumerken ist, dass bei allen Situationen in SP4 von der Existenz einer Straßengebühr ausgegangen wurde, die im Basisfall zu 0.06 CHF/km angenommen wurde. Da diese Maut als wohlfahrts- und somit kostenneutral für die Verkehrsteilnehmer betrachtet wurde, ging

²⁶ Quelle: Vrtic et al. (2007, S. 303).

man in dieser Befragung davon aus, dass die Mineralölsteuer, die aktuell etwa die Hälfte des Treibstoffpreises ausmacht, im Basisfall um den als Maut zu entrichtenden Betrag zurückgeht.²⁷ Somit wurden die variablen Kosten der Autofahrt für den Basisfall mit 0.06 CHF/km angenommen und nicht mit den tatsächlichen Kosten von 0.12 CHF/km (Vrtic et al., 2007, S. 114).

5.1.2 Extraktion des Fußverkehrs

Um aus den gewonnenen Daten nun Verhaltensparameter schätzen zu können, musste neben den bereits genannten geringfügigen Modifikationen im Datensatz die Modellspezifikationsdatei (*.mod) angepasst werden. Es war vor allem nötig, die von Vrtic et al. (2007) verwendeten Nutzenfunktionen der jeweiligen Modi Auto und ÖV so zu reduzieren, dass die geschätzten Kenngrößen in der Simulation mit MATSim auch abbildbar waren. Als Erläuterung hierzu soll folgendes Beispiel dienen: in den Befragungen wurden bspw. in einigen Fragen Gebühren für das Parken in der Innenstadt angenommen. Wenn man diese Kenngröße miteinbezieht und einen Verhaltensparameter dafür schätzt, erhält man ein Modell, welches das Verkehrsmittelwahlverhalten deutlich besser beschreibt als ein Modell, in dem diese Kenngröße außen vor gelassen wird. Ein Anzeichen hierfür ist z. B. ein höherer Wert für die Modellgüte ρ^2 . Problematisch wird es allerdings, wenn Parkgebühren in der Realität existieren, man sie in der Simulation aber nicht abbilden kann, weil das Netz nicht fein genug aufgelöst ist und Informationen zu dieser Kenngrößen fehlen. Ähnliches gilt u. a. für die PKW-Verfügbarkeit, Zugangszeiten zur ÖV-Haltestelle oder den Besitz eines ÖV-Abonnements; all diese Einflussfaktoren sind momentan nicht in MATSim abbildbar. Zusammenfassend bedeutet dies also, dass die Schätzung auf die im Simulationsmodell verfügbaren Kenngrößen reduziert werden muss. Dies führt auch zu geringen ρ^2 -Werten der Schätzungen im Bereich zwischen 0.10 und 0.14. Im Beispiel der Parkgebühren sollten diese also nicht mitgeschätzt werden. Der Effekt, den Parkgebühren auf die Verkehrsmittelwahl haben, wird nurmehr teilweise abgebildet, nämlich in der geschätzten Konstante der Nutzenfunktion und in anderen Kenngrößen, die mit Parkgebühren korrelieren (z. B. Treibstoffkosten). Nicht so problematisch stellt es sich dar, wenn Verhaltensparameter von

²⁷ Wird eine Maut als wohlfahrtsneutral angesehen, so stellt sie einen reinen Transfer von den Straßenverkehrsnutzern zum Staat dar. Man geht davon aus, dass im Gegenzug bspw. die Mineralölsteuer gesenkt wird oder die Einnahmen den Straßenverkehrsnutzern auf einem anderen Wege wieder zugutekommen. Vgl. für eine ähnliche Interpretation Beckers et al. (2007, S. 294). Diese Sichtweise ist insofern auch kritisch zu betrachten, weil in einem Haushaltssystem i. d. R. keine Zweckbindung von Einnahmen stattfinden darf. Insofern ist der Rückfluss der durch die Maut generierten Finanzmittel an die Straßenverkehrsteilnehmer nicht zwangsläufig gegeben, denn es können auch andere öffentliche Projekte damit finanziert werden, die nicht nur für die Straßenverkehrsteilnehmer wohlfahrtssteigernd sind.

Kenngrößen in der Schätzung mit betrachtet werden, die in der Umfrage zwar abgefragt, in der Realität aber (noch) nicht existieren. So können bspw. Mautkosten einfach mitgeschätzt und dann in der Simulation auf Null gesetzt werden.

Mit diesen Voraussetzungen könnte nun das mit den Gleichungen (5.3) bis (5.5) formulierte Modell geschätzt werden. Da allerdings aus den Daten keine separaten Werte für den Fußverkehr verfügbar waren, wird zunächst ein Modell geschätzt, das die Zugangszeit zum öffentlichen Nahverkehr beinhaltet. Aus den sich ergebenden Verhaltensparametern $\hat{\beta}_{tt_access}$ und $\hat{\beta}_{fare_pt}$ wird im folgenden dann der Fußverkehr als eigenes Verkehrsmittel extrahiert. Begonnen wird die Schätzung also mit folgendem Modell:

$$U_{car} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_{tt_car} \cdot t_{car} + \hat{\beta}_{cost_car} \cdot c_{car} + \hat{\beta}_{toll} \cdot c_{toll} \quad (5.6)$$

$$U_{pt} = \hat{\beta}_{tt_access} \cdot t_{access} + \hat{\beta}_{tt_pt} \cdot t_{pt} + \hat{\beta}_{fare_pt} \cdot c_{pt} \quad (5.7)$$

Es ist zu beachten, dass die Verhaltensparameter $\hat{\beta}$ nun mit einem Dach gekennzeichnet sind, da es sich nicht um die wahren Parameter, sondern um geschätzte Größen handelt. Bei derartigen Schätzungen der Nutzenfunktionen verschiedener Verkehrsmittel mit BIOGEME muss immer mindestens eine der Funktionen ohne Konstante definiert werden. Dieses Verkehrsmittel bildet ein Referenznutzenniveau zu dem die übrigen Verkehrsmittel aufgrund ihrer Eigenschaften einen positiven bzw. negativen Nutzen aufweisen. In diesem Fall beinhaltet der öffentliche Verkehr keine Konstante. Wenn die Befragten das Reisen mit dem Auto grundsätzlich als angenehmer wahrnehmen als das Reisen mit dem öffentlichen Verkehr, so müsste die Konstante in der Nutzenfunktion für das Auto mit positivem Vorzeichen geschätzt werden (höherer Offset-Nutzen). Sollte diese Empfindung umgekehrt sein, müsste deren Vorzeichen negativ werden.

Tabelle 2 stellt die mit BIOGEME geschätzten Verhaltensparameter aus dem in den Gleichungen (5.6) und (5.7) formulierten Modell zusammen. Sowohl hier als auch im weiteren Verlauf dieser Arbeit ist zu beachten, dass Nutzen grundsätzlich einheitenlos (bzw. in der fiktiven Einheit „utils“) angenommen wird. Als Konsequenz dessen sind die Verhaltensparameter in der inversen Einheit der zugehörigen Größe notiert. So ist sichergestellt, dass der Nutzen beim Einfügen der tatsächlichen Größen für Reisezeit, variable Kosten und ggf. Mautkosten dimensionslos bleibt.

Verhaltensparameter	Einheit	Schätzwert
$\hat{\beta}_0$	-	-1.58
$\hat{\beta}_{tt_car}$	[1/h]	-2.08
$\hat{\beta}_{tt_pt}$	[1/h]	-2.20
$\hat{\beta}_{wtk} := \hat{\beta}_{tt_access}$	[1/h]	-6.01
$\hat{\beta}_{cost_car}$	[1/CHF]	-0.176
$\hat{\beta}_{fare_pt}$	[1/CHF]	-0.0556
$\hat{\beta}_{toll}$	[1/CHF]	-0.123

Tabelle 2: Geschätzte Verhaltensparameter des Modells zur Extraktion des Fußverkehrs.²⁸

Zur nun nötigen Extraktion des Fußverkehrs als eigenständiges Verkehrsmittel, das zunächst in den Simulationen noch nicht betrachtet wurde, wurde wie folgt vorgegangen:

In der Funktion des öffentlichen Verkehrs wurde der Verhaltensparameter $\hat{\beta}_{tt_access}$ auf $-6.01/h$ geschätzt und der Parameter $\hat{\beta}_{fare_pt}$ auf $-0.0556/CHF$. Durch Division dieser beiden Parameter ergibt sich eine durchschnittliche Zahlungsbereitschaft von 108.09 CHF/h. Dies bedeutet, dass die Befragten im Durchschnitt für eine einstündige Verringerung der Zugangszeit zu einer Haltestelle des öffentlichen Verkehrs bereit wären 108.09 CHF zusätzlich zum Ticketpreis zu bezahlen. Damit lässt sich die generierte Größe als „Value of Time“ (VoT) von Ticketkosten bezüglich der Zugangszeit interpretieren.²⁹ Festzuhalten ist, dass sich der VoT immer nur auf das Verhältnis einer Zeitgröße (z. B. Zugangszeit, Reisezeit, etc.) zu einer Kostengröße (z. B. Treibstoffkosten, Ticketkosten oder Mautkosten) bezieht und dementsprechend variiert. Diese Tatsache wird in Abschnitt 5.1.4 genauer beleuchtet. Mit dem berechneten VoT für die Zugangszeit kann nun in einer separaten

²⁸ Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis der Daten von Vrtic et al, 2007. Angepasstes $\rho^2=0.135$.

²⁹ Vgl. für eine ausführliche Darstellung des Value of Time Ortúzar / Willumsen, 2001, S. 457ff oder für eine Zusammenstellung verschiedener Schätzwerte des VoT Beckers et al., 2007, S. 279.

Schätzung ein eigenes Verkehrsmittel Fußverkehr eingeführt werden. Dieser Vorgang beruht aber mangels besserer Daten auf der Annahme, dass die Zugangszeit zu einer Haltestelle des öffentlichen Verkehrs von den Nutzern ähnlich bewertet wird, als wenn sie einen Weg komplett zu Fuß zurücklegten.

5.1.3 Bestimmung der Verhaltensparameter aller drei Verkehrsmittel

Nun muss zur Bestimmung aller in MATSim implementierbaren Verhaltensparameter aus denselben Daten noch einmal eine Schätzung durchgeführt werden, diesmal allerdings **ohne** die Zugangszeit zur Haltestelle des öffentlichen Verkehrs. Das Modell hat demnach die folgende Form:

$$U_{car} = \hat{\beta}_{tt_car} \cdot t_{car} + \hat{\beta}_{cost_car} \cdot c_{car} + \hat{\beta}_{toll} \cdot c_{toll} \quad (5.8)$$

$$U_{pt} = \hat{\beta}_{tt_pt} \cdot t_{pt} + \hat{\beta}_{fare_pt} \cdot c_{pt} \quad (5.9)$$

Dabei ist zu beachten, dass der beschriebene Offset-Nutzen $\hat{\beta}_0$ in dieser zweiten Schätzung nicht signifikant von Null verschieden ist. Dies kann so interpretiert werden, dass die durchschnittliche Zugangszeit zum öffentlichen Verkehr (welche hier explizit nicht betrachtet wurde) in dieser Umfrage ähnlich negativ bewertet wird wie bspw. die Zeit zum Suchen eines Parkplatzes für das Auto. Die Nutzenfunktion des Verkehrsmittels Fußverkehr wird unter Zuhilfenahme des eben berechneten VoT wie folgt bestimmt:

$$U_{wlk} = \hat{\beta}_{tt_wlk} \cdot t_{wlk} = \left(VoT_{access/fare_pt} \cdot \hat{\beta}_{fare_pt} \right) \cdot t_{wlk} \quad (5.10)$$

Hier wird lediglich der aus der ersten Schätzung berechnete VoT der Zugangszeit auf den Verhaltensparameter $\hat{\beta}_{fare_pt}$ der zweiten Schätzung skaliert. Die Ergebnisse dieser zweiten Schätzung sind in Tabelle 3 aufgeführt und wurden den Resultaten der Schätzungen von Vrtic et al. (2007) gegenübergestellt. Der direkte Vergleich der absoluten Werte der Verhaltensparameter ist allerdings wenig aussagekräftig; diese müssen für eine Analyse der Ergebnisse ins Verhältnis gesetzt werden, es müssen also die verschiedenen VoT bestimmt werden. Dies soll im folgenden Abschnitt stattfinden.

Verhaltensparameter	Einheit	Schätzwert IVT (lineares Modell)	Schätzwert dieser Arbeit
$\hat{\beta}_{tt_car}$	[1/h]	-1.73	-2.26
$\hat{\beta}_{tt_pt}$	[1/h]	-1.51	-2.36
$\hat{\beta}_{wlk} := \hat{\beta}_{tt_access}$	[1/h]	-2.74	-5.78
$\hat{\beta}_{cost_car}$	[1/CHF]	-0.06	-0.2
$\hat{\beta}_{fare_pt}$	[1/CHF]	-0.05	-0.0535
$\hat{\beta}_{toll}$	[1/CHF]	-0.13	-0.12

Tabelle 3: Gegenüberstellung der geschätzten Verhaltensparameter: Ausgangsstudie Vrtic et al. (2007) und eigene Schätzungen.³⁰

5.1.4 Vergleich der Zahlungsbereitschaften

Ausgangsbasis für die Ergebnisse der verschiedenen VoT in Tabelle 4 bilden die geschätzten Verhaltensparameter aus Tabelle 3 im vorangegangenen Abschnitt. So wurde zur Berechnung des $VoT_{tt_car/cost_car}$ der Verhaltensparameter $\hat{\beta}_{tt_car}$ ins Verhältnis zu $\hat{\beta}_{cost_car}$ gesetzt. Dieser drückt beispielsweise aus, wieviel Geld die Befragten durchschnittlich für Treibstoff zu zahlen bereit sind, um die Reisezeit um eine Stunde zu verkürzen. Er kann somit als Zahlungsbereitschaft oder marginaler Nutzen interpretiert werden. Ein weiteres Beispiel soll anhand des $VoT_{tt_pt/fare_pt}$ gegeben werden: sein Wert wurde in der Schätzung, die dieser Arbeit zugrunde liegt, zu 44.11 CHF/h bestimmt. Damit sind die Befragten bereit pro eingesparter Stunde Reisezeit in den öffentlichen Verkehrsmitteln durchschnittlich 44.11 CHF mehr für ihre Fahrkarte auszugeben.

Diese Betrachtungsweise erfolgt analog zu der Herleitung des $VoT_{tt_access/fare_pt}$ in Abschnitt 5.1.2. Es ist wichtig anzumerken, dass diese vereinfachte Betrachtungsweise nur dann möglich ist, wenn die Nutzenfunktion sowohl linear in den Parametern als auch linear in den Variablen ist. Ist diese Annahme nicht mehr gegeben, müssen die VoT auf eine andere Weise berechnet werden; denn sie sind nicht mehr an jeder Stelle der Funktion gleich.

³⁰ Quelle: Vrtic et al., 2007 und eigene Berechnungen auf Basis der Daten von Vrtic et al., 2007. Angepasstes $\rho^2=0.132$.

Anders gesagt ist bei nicht linear definierten Nutzenfunktionen die Steigung nicht überall identisch. Die Steigung repräsentiert den marginalen Nutzen, also die Nutzenänderung, die sich bei einer marginalen Änderung einer Eingangsgröße ergäbe.

Values of Time [CHF/h]	IVT (lineares Modell)	Schätzwert dieser Arbeit
$VoT_{tt_car / cost_car}$	28.83	11.30
$VoT_{tt_car / toll}$	13.31	18.83
$VoT_{tt_pt / fare_pt}$	30.20	44.11
$VoT_{tt_access / fare_pt}$	54.80	108.04

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Values of Time in [CHF/h]: Ausgangsstudie Vrtic et al. (2007) und eigene Ergebnisse.³¹

Als Ergebnis des Vergleichs der Schätzungen vom IVT in Zürich (Vrtic et al. 2007) und den Schätzwerten dieser Arbeit, ist an dieser Stelle folgendes hervorzuheben:

- die Größenordnungen unterscheiden sich teilweise deutlich voneinander
- das Verhältnis von $VoT_{tt_car/cost_car}$ und $VoT_{tt_car/cost_toll}$ verhält sich bei den eigenen Schätzungen umgekehrt zu den Schätzungen des IVT

Ersteres lässt sich dadurch erklären, dass bei den eigenen Schätzungen einige Variablen im Modell der Nutzenfunktionen nicht betrachtet werden konnten, die vom IVT mitgeschätzt wurden. Dies ist insoweit als unkritisch einzustufen, da dies bei der Parameterschätzung von beschränkten Modellen unvermeidbar ist. Das Modell für diese Arbeit konnte und sollte nicht dem IVT-Modell folgen, da bei einer Simulation in MATSim zuviel mitgeschätzte Entscheidungsfaktoren eventuell gar nicht abgebildet werden konnten (vgl. hierzu das Beispiel zur Mitschätzung von Parkgebühren unter Abschnitt 5.1.2). Der zweite Punkt lässt sich zunächst nur beschreiben: nach den Berechnungen des IVT sind die Befragten im Durchschnitt bereit, deutlich mehr für zusätzlichen Treibstoff als für eine Mautgebühr auszugeben, um die Reisezeit eine Stunde zu verkürzen. Vrtic et al. (2007) begründen dies damit, „dass Verkehrsteilnehmer bei kurzfristigen, taktischen Entscheidungen weniger stark auf Kosten reagieren, die ihnen unausweichlich erscheinen als auf vermeidbare Kosten wie

³¹ Quelle: Vrtic et al., 2007 und eigene Berechnungen auf Basis der Daten von Vrtic et al., 2007.

Maut oder Parkkosten, welche durch Umwege oder andere Parkplatzwahl verhindert werden können.“ (Vrtic et al., 2007, S. 17). Diese einleuchtende Erklärung kann durch die Schätzungen in der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt werden. Grundsätzlich erscheint diese Interpretation des IVT allerdings als sinnvoll, weshalb dieser Effekt im Auge behalten werden sollte. Im Hinblick auf die Anwendung der Verhaltensparameter im Testszenario scheint es dennoch unproblematisch, da zunächst keine Maut simuliert wird.

5.2 Interpretation und Überführung in die MATSim-Nutzenfunktion

Die in Abschnitt 5.1.3 geschätzten Verhaltenparameter der Fahrzeit im Auto, im öffentlichen Verkehr und im Fußverkehr müssen nun so interpretiert werden, dass eine Überführung in eine in MATSim verwendbare Nutzenfunktion möglich ist. Zusätzlich soll noch ein Verhaltensparameter für verspätetes Erscheinen am Aktivitätenort bestimmt werden.

5.2.1 Interpretation der geschätzten Verhaltensparameter

Die Ursache dafür, dass die geschätzten Verhaltensparameter nicht direkt in der MATSim-Nutzenfunktion verwendet werden können, liegt in deren Definition zur Bewertung der Tagespläne begründet, welche hier noch einmal aufgeführt ist:

$$U_{Plan_total} = \sum_{i=1}^n U_{perf,i} + \sum_{i=1}^n U_{late,i} + \sum_{i=1}^n U_{travel,i} \quad (5.11)$$

Zunächst ist zu beachten, dass die Parameter bisher lediglich für den reisebezogenen Teil der Nutzenfunktion geschätzt wurden, also nur für den letzten Summanden in Gleichung (5.11). Allerdings sind die im Modell geschätzten Reisezeitparameter $\hat{\beta}_{tt_car}$, $\hat{\beta}_{tt_pt}$ und $\hat{\beta}_{tt_wlk}$ interdependent mit dem i. d. R.. positiven Verhaltensparameter zur Ausübung einer Aktivität β_{perf} ; genauer gesagt, sie beinhalten diesen. Um diesen Effekt anschaulicher zu gestalten soll folgendes Beispiel dienen: Nimmt man an, dass eine Person aufgrund von Verkehrsstaus, Zugverspätungen oder Ähnlichem für eine bekannte Strecke eine Stunde länger als gewöhnlich benötigt, dann schmälert sich ihr Nutzen aufgrund von zwei Effekten:

- sie muss eine Stunde länger im Verkehrsmittel verbringen
- sie verliert Zeit zum Ausüben der geplanten Aktivität(en) – Opportunitätskosten

Der erste Effekt wird hier mit dem negativen marginalen Nutzen des Reisens definiert und entspricht den verkehrsmittelabhängigen Verhaltensparametern, die in den reisezeitbezogenen Teil der MATSim-Nutzenfunktion eingehen müssten. Der zweite Effekt

beschreibt die marginalen Opportunitätskosten der Zeit und müsste als positiver Verhaltensparameter (also mit umgekehrtem Vorzeichen) in den aktivitätenbezogenen Teil der Nutzenfunktion eingehen. Die geschätzten Parameter beinhalten jedoch **beide** Effekte, weshalb sie nicht ohne weiteres nur in den reisebezogenen Teil eingehen dürfen. Da die Aufteilung der beiden genannten Effekte innerhalb der geschätzten Verhaltensparameter (z. B. $\hat{\beta}_{tt_car} = \beta_{tt_car} + \beta_{perf}$) nicht aus den Befragungsdaten separiert werden kann, muss folgende Annahme getroffen werden: beim Reisen im Auto entgeht der Person lediglich Zeit zum Ausüben einer geplanten Aktivität, die im Auto verbrachte Zeit wird nicht zusätzlich negativ bewertet. Dies bedeutet, dass der erste Effekt beim Reisen im Auto als **nicht** existent betrachtet wird ($\beta_{tt_car} = 0$). Somit macht es für die Person keinen Unterschied mehr, ob sie bspw. zu früh am Arbeitsort eintrifft und warten muss, weil die Arbeitsstelle noch nicht geöffnet hat oder ob sie dieselbe Zeit im Stau verbringt. Diese weitreichende Annahme fixiert den negativen marginalen Nutzen des Reisens im Auto also auf Null, womit dieses Verkehrsmittel das Referenzniveau für alle anderen Verkehrsmittel bildet. Auf die Auswirkungen, die sich aus dieser Annahme ergeben, wird in Kapitel 6 eingegangen. Die sich daraus ergebende Interpretation lässt sich allerdings bereits jetzt wie folgt festhalten:

$$\beta_{perf} := -\hat{\beta}_{tt_car} \Leftrightarrow \beta_{tt_car} = 0 \quad (5.12)$$

$$\beta_{tt_pt} = \hat{\beta}_{tt_pt} - \hat{\beta}_{tt_car} \quad (5.13)$$

$$\beta_{wlk} = \hat{\beta}_{wlk} - \hat{\beta}_{tt_car} \quad (5.14)$$

In Gleichung (5.12) wird der i. d. R.. positive marginale Nutzen der Ausübung einer Aktivität gleich dem negativen geschätzten Verhaltensparameter gesetzt, der die Reisezeit im Auto beschreibt. Dies bedeutet gemeinsam mit der oben getroffenen Annahme, dass der in die MATSim-Nutzenfunktion eingehende Verhaltensparameter zur Beschreibung der Reisezeit **im Auto** gleich Null ist und das Referenzniveau für die anderen beiden Verkehrsmittel bildet. Die Verhaltensparameter zur Beschreibung der Reisezeit in den Verkehrsmitteln pt und Fuß können dann gemäß den Gleichungen (5.13) und (5.14) definiert werden. Nach dieser Definition können diese Parameter positiv, negativ und null werden. Ein positiver Wert besagt, dass das Reisen im pt bzw. zu Fuß als angenehmer empfunden wird als das Reisen im Auto. Ein negativer Wert deutet analog auf ein unangenehmeres Empfinden der Reisezeit in den genannten Modi hin. Sollte der Wert null werden, so kann man davon ausgehen, dass die Reisezeiten in den verschiedenen Modi etwa gleich bewertet werden.

5.2.2 Verhaltensparameter für verspätetes Eintreffen am Aktivitätenort

Des Weiteren ist für das Testszenario, in dem die erweiterte MATSim-Nutzenfunktion zur Anwendung kommen soll, noch die Bestimmung eines Verhaltensparameters bei verspätetem Eintreffen am Aktivitätenort nötig.³² Der Verhaltensparameter für das verspätete Eintreffen kann jedoch nicht aus den Daten der Befragung SP4 abgeleitet werden. In der Befragung SP2 wurde jedoch explizit der Einfluss der Zuverlässigkeit einer Verbindung abgefragt. Genauer gesagt gab es Situationen, in denen die Befragten auf einer der beiden Routen mit einer Wahrscheinlichkeit von 5 %, 20 % oder 33 % eine Verspätung von mindestens zehn Minuten in Kauf nehmen mussten. Aus diesen Wahrscheinlichkeiten ließen sich die Erwartungswerte der Verspätung berechnen, unter der Annahme, dass diese **genau** 10 Minuten beträgt. So konnte ein Verhaltensparameter für das zehn Minuten spätere Eintreffen am Aktivitätenort mit den Daten aus SP2 geschätzt werden. Analog zur Bestimmung der Zahlungsbereitschaft für die Reduktion der Zugangszeit zur Haltestelle des öffentlichen Verkehrs im Abschnitt 5.1.2, konnte so die mittlere Zahlungsbereitschaft für Treibstoffkosten abgeleitet werden, um das spätere Eintreffen um eine Stunde zu verkürzen. Dieser $VoT_{t_late/cost_car}$ für die Befragung SP2 stellt sich wie folgt dar:

$$VoT_{t_late/cost_car,SP2} = \frac{\hat{\beta}_{late,SP2}}{\hat{\beta}_{cost_car,SP2}} \quad (5.15)$$

Durch Reskalieren auf den Verhaltensparameter $\hat{\beta}_{cost_car,SP4}$, der aus den Daten der Befragung SP4 bestimmt wurde, ergibt sich der Verhaltensparameter für zu spätes Eintreffen am Aktivitätenort für die Schätzung aus SP4 zu:

$$\hat{\beta}_{late,SP4} = VoT_{t_late/cost_car,SP2} \cdot \hat{\beta}_{cost_car,SP4} = \frac{-11.40}{h} \quad (5.16)$$

Dies entspricht innerhalb der Daten aus SP4 einer Zahlungsbereitschaft von 57.00 CHF/h für Treibstoff, um das spätere Eintreffen um eine Stunde zu reduzieren. Der so geschätzte Verhaltensparameter wurde lediglich im Testszenario verwendet und konnte deshalb aus Vereinfachungsgründen auch auf die übrigen Verkehrsmittel übertragen werden.

³² Im Gegensatz zu dem unter Kapitel 7 betrachteten Real-World-Szenario stellte sich heraus, dass es in einem Testszenario mit nur zwei Aktivitäten „Home“ und „Work“ nötig ist, eine Bestrafung für das verspätete Eintreffen am Aktivitätenort einzuführen. Grund hierfür ist die Tatsache, dass im realen Szenario die Aktivitäten einzelner Agenten sehr eng aneinander gereiht sind und so über Öffnungszeitenbeschränkungen und die Opportunitätskosten der Zeit indirekt bereits eine Bestrafung für das zu späte Eintreffen besteht. Auf diese Weise werden die Agenten im realen Szenario ohne eine zusätzliche Bestrafung dazu angeregt, pünktlich einzutreffen. Eine Implementation erscheint somit im realen Szenario nicht unbedingt nötig, zumal hierfür auch keinerlei Daten verfügbar sind.

5.2.3 Überblick der geschätzten Nutzenfunktionen

Somit können nun die im folgenden Testszenario verwendeten Gesamtnutzenfunktionen aller drei Verkehrsmittel Auto, öffentlicher Verkehr und Fuß für **eine** betrachtete Aktivität zusammengestellt werden:

$$U_{car} = \left(\hat{\beta}_{tt_car} - \hat{\beta}_{tt_car} \right) \cdot t_{car} + \hat{\beta}_{cost_car} \cdot c_{car} + \hat{\beta}_{toll} \cdot c_{toll} + \beta_{perf} \cdot t^* \cdot \ln \left(\frac{t_{perf}}{t_0} \right) + \hat{\beta}_{late} \cdot t_{late} \quad (5.17)$$

$$U_{pt} = \left(\hat{\beta}_{tt_pt} - \hat{\beta}_{tt_car} \right) \cdot t_{pt} + \hat{\beta}_{fare_pt} \cdot c_{pt} + \beta_{perf} \cdot t^* \cdot \ln \left(\frac{t_{perf}}{t_0} \right) + \hat{\beta}_{late} \cdot t_{late} \quad (5.18)$$

$$U_{wlk} = \left(\hat{\beta}_{tt_wlk} - \hat{\beta}_{tt_car} \right) \cdot t_{wlk} + \beta_{perf} \cdot t^* \cdot \ln \left(\frac{t_{perf}}{t_0} \right) + \hat{\beta}_{late} \cdot t_{late} \quad (5.19)$$

Man sieht hier, dass der Reisezeitanteil beim Verkehrsmittel Auto aufgrund der getroffenen Annahme verschwindet und die Reisezeitanteile der übrigen Modi immer nur im Vergleich zum Referenzverkehrsmittel Auto betrachtet werden. Das Modul, welches in MATSim die Tagespläne bewertet, summiert schließlich die Ergebnisse dieser Funktionen über alle Aktivitäten, also den gesamten Tagesplan, auf. Im Folgenden sind die Funktionen nochmals mit den berechneten Parametern aufgeführt:

$$U_{car} = -\frac{0.2}{CHF} \cdot 0.12 \frac{CHF}{km} \cdot l_{leg} + \frac{2.26}{h} \cdot t^* \cdot \ln \left(\frac{t_{perf}}{t_0} \right) - \frac{11.04}{h} \cdot t_{late} \quad (5.20)$$

$$U_{pt} = -\frac{0.1}{h} \cdot t_{pt} - \frac{0.0535}{CHF} \cdot 0.28 \frac{CHF}{km} \cdot l_{leg} + \frac{2.26}{h} \cdot t^* \cdot \ln \left(\frac{t_{perf}}{t_0} \right) - \frac{11.04}{h} \cdot t_{late} \quad (5.21)$$

$$U_{wlk} = -\frac{3.523}{h} \cdot t_{wlk} + \frac{2.26}{h} \cdot t^* \cdot \ln \left(\frac{t_{perf}}{t_0} \right) - \frac{11.04}{h} \cdot t_{late} \quad (5.22)$$

Wie in den Gleichungen (5.20) und (5.21) zu sehen, musste noch eine Tarifierungsstruktur angenommen werden, welche die variablen Kosten für das Auto und den öffentlichen Verkehr in Abhängigkeit einer in MATSim verfügbaren Größe berechnen kann. Aus Gründen der Vereinfachung wurden Kostengrößen verwendet, die sich in direkter Abhängigkeit zur Distanz eines Weges von einer Aktivität zu anderen (l_{leg}) ergeben. Die Werte wurden der Studie des IVT entnommen. Demnach sind die variablen Kosten für die Fahrt im Auto auf 0.12 CHF/km und für den öffentlichen Verkehr auf 0.28 CHF/km fixiert

(Vrtic et al., 2007, S. 119).³³ Da zunächst keine Maut simuliert wird, ist der mautabhängige Term in der Nutzenfunktion des Autoverkehrs hier nicht mehr vorhanden.

Nochmals anzumerken ist, dass der Fußverkehr zunächst nicht in den Simulationen verwendet wird, für eine spätere Implementation in MATSim in der Schätzung aber mitbetrachtet wurde.

³³ Der Distanzkostensatz im öffentlichen Verkehr liegt mit 0.28 CHF/km mehr als doppelt so hoch wie der des Autoverkehrs. Dies liegt daran, dass der Distanzkostensatz für Personen ohne Abbonement verwendet wurde. Vrtic et al. (2007) unterscheiden die Kostensätze im öffentlichen Verkehr in drei Kategorien: 0.08 CHF/km für Personen mit einem Generalabbonement (entspricht der BahnCard100), 0.15 CHF/km für Personen mit einem HalbTax-Abbonement (entspricht der BahnCard50) und 0.28 CHF/km für Personen ohne Vergünstigung. Der Durchschnittswert, den die Befragten demnach pro gefahrenem Kilometer zahlen beläuft sich auf 0.21 CHF/km und könnte statt des Maximalsatzes in der Simulation betrachtet werden und würde zu einem höheren Modal-Split-Anteil des öffentlichen Verkehrs führen.

Allerdings erscheint es eher sinnvoll, den Distanzkostensatz gemäß des Untersuchungsgebiets anzupassen. Dabei sollte, wenn in MATSim abbildbar, für den öffentlichen Verkehr eine Tarifierungsstruktur implementiert werden, welche die häufig stufenförmig verlaufende Kostenstruktur der Ticketpreise aufgrund der in Städten üblichen Tarifzonen widerspiegelt.

6 Simulation eines Testszenarios

Nachdem in Kapitel 5 die nötigen Verhaltensparameter geschätzt und in eine für MATSim interpretierbare Form überführt wurden, kann nun ein Testszenario simuliert werden. Dafür wird in Abschnitt 6.1 die Modellkonfiguration erläutert. Die Analyse der Testergebnisse in Abschnitt 6.2 ermöglichen ein tieferes Verständnis der Veränderungen, die sich durch die Erweiterung der MATSim-Nutzenfunktion ergeben. Anzumerken ist, dass in den folgenden Simulationen noch kein Fußverkehr betrachtet wurde. Eine Implementation wird aber in naher Zukunft angestrebt. Besonders interessant ist die Frage, wie sich die Annahme, dass das Reisen im Auto nicht negativer bewertet wird als das Warten am Aktivitätenort, auf das Verkehrsverhalten der Nutzer auswirkt.

6.1 Modellkonfiguration

Für die Konfiguration des Modells in MATSim war zunächst die Konstruktion eines Straßennetzwerkes nötig. Das Layout des Testnetzwerkes, welches in Abbildung 8 zu sehen ist, orientiert sich an der Formulierung des bekannten Flaschenhalsszenarios von Vickrey (1969), Arnott et al. (1990) sowie dem von Rieser / Grether / Nagel (2008) verwendeten Netzwerk.

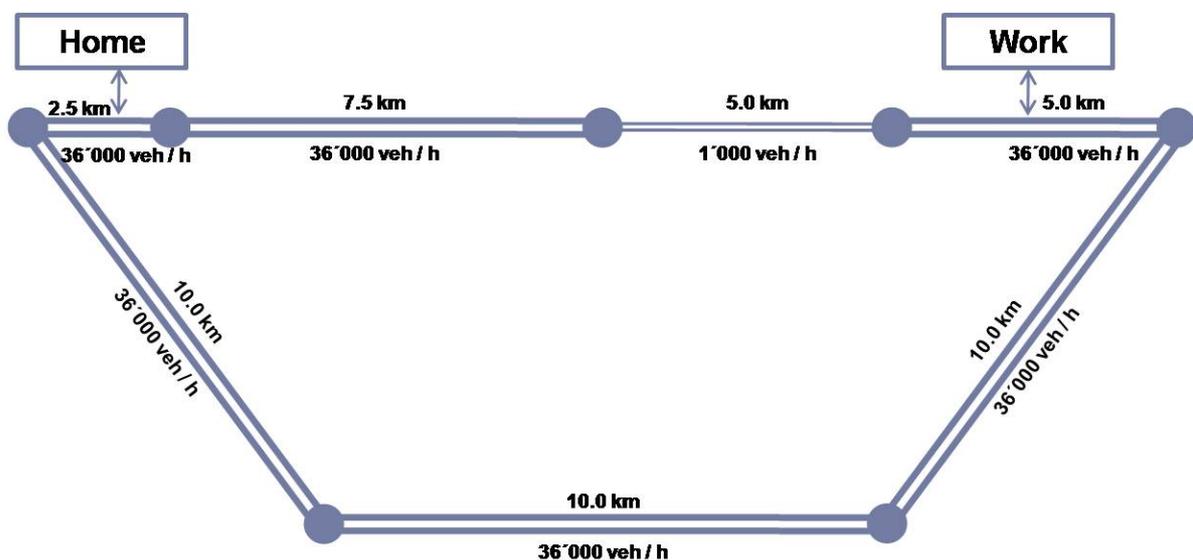


Abbildung 8: Layout des Testnetzwerkes mit Kapazitäten und Aktivitätenorten.³⁴

³⁴ Quelle: Eigene Darstellung.

6.1.1 Testscenario mit Abfahrtszeitwahl

In einem ersten Test fuhren 1000 Personen mit dem Auto von ihrem Heimatort „Home“ im Uhrzeigersinn zum Arbeitsort „Work“. Auf diesem Weg, der eine Länge von 17.5 km hat, wurde die Kapazität der Straße auf einem fünf Kilometer langen Abschnitt auf 1000 Autos pro Stunde reduziert. Nach der Arbeit konnten die Personen ebenfalls im Uhrzeigersinn nach Hause fahren. Auf diesem 32.5 km langen Heimweg war die Kapazität, ebenso wie im übrigen Netzwerk mit Ausnahme des Flaschenhalses, mit 36000 Autos pro Stunde weit über der maximal möglichen Belastung definiert. Dies dient dazu, eine fokussierte Analyse der Effekte des Flaschenhalses zu ermöglichen, ohne dass weitere Kapazitätsrestriktionen die Testergebnisse beeinflussen. Die maximale Geschwindigkeit wurde auf 50 km/h festgelegt. Die Reisezeit im leeren Netz beträgt somit 21 Minuten für den Hinweg zur Arbeit und 39 Minuten für den Rückweg. In diesem ersten Test konnten die Personen nur ihre Abfahrtszeit frei wählen, es konnte kein anderes Verkehrsmittel und keine andere Route gewählt werden.

6.1.2 Testscenario mit Abfahrtszeit- und Verkehrsmittelwahl

Im zweiten Testscenario hatten nun 2000 Personen die Wahl zwischen Auto und öffentlichem Verkehr. Ebenso war die Wahl der Abfahrtszeit individuell möglich. Tabelle 5 zeigt eine Übersicht der in den Testscenarien verwendeten Parameter. Neben einer Zusammenstellung der berechneten Verhaltensparameter, ist der Tabelle insbesondere die typische Ausübungszeit der Aktivitäten „Home“ und „Work“ zu entnehmen. Diese wurde auf 12 Stunden für „Home“ und auf 8 Stunden für „Work“ eingestellt. Wie in Abschnitt 0 beschrieben, erzeugen beide Aktivitäten denselben marginalen Nutzen, wenn sie genau solange ausgeübt werden wie ihre typische Ausübungszeit definiert wurde. Des Weiteren wurde noch die Öffnungszeit der Arbeit auf 07:00 Uhr festgelegt, wobei zu beachten ist, dass ein späteres Eintreffen am Arbeitsort direkt eine Minderung des Nutzens nach sich zieht. Zudem wurde eingestellt, dass die Arbeit um 18:00 Uhr schließt, danach also kein Nutzen mehr durch die Ausübung dieser Aktivität entstehen kann. Der in Abschnitt 4.1 beschriebene iterative Nachfrageanpassungsprozess wird über 1000 Iterationen berechnet.

Parameter	Einheit	Wert	Beschreibung
β_{perf}	[1/h]	+2.26	Marginaler positiver Nutzen des Ausübens einer Aktivität bei ihrer typischen Ausübungszeit t^*
β_{late}	[1/h]	-11.04	Marginaler negativer Nutzen des späten Eintreffens
β_{tt_car}	[1/h]	+0.00	Marginaler negativer Nutzen des Reisens in „car“
β_{tt_pt}	[1/h]	-0.10	Marginaler negativer Nutzen des Reisens in pt
β_{cost_car}	[1/CHF]	-0.20	Marginaler negativer Nutzen der Treibstoffkosten
Distanzkosten car	[CHF/km]	+0.12	-
β_{fare_pt}	[1/CHF]	-0.0535	Marginaler negativer Nutzen des Ticketpreises
Distanzkosten pt	[CHF/km]	+0.28	-
t_h^*	[h]	12.00	Typische Ausübungszeit der Aktivität „Home“
t_w^*	[h]	8.00	Typische Ausübungszeit der Aktivität „Work“
Beginn der Arbeitszeit	-	Genau 07:00 Uhr	-
Ende der Arbeitszeit	-	Spätestens 18:00 Uhr	-
γ	-	2	Skalierungsparameter im Binary Logit Modell

Tabelle 5: Übersicht der in den Testszenarien verwendeten Parameter.³⁵

³⁵ Quelle: Eigene Darstellung.

6.2 Ergebnisse

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der in den vorangegangenen Abschnitten definierten Testszenarien dargestellt und erläutert werden. Die Resultate beziehen sich immer auf die relaxierte Verkehrsnachfrage der Iteration 1000 und wurden unter Verwendung der in Tabelle 5 definierten Parameter berechnet, soweit dies im Text nicht anders beschrieben ist.

6.2.1 Testszenario mit Abfahrtszeitwahl

Ziel dieses ersten Tests ist festzustellen, welche Ergebnisse die neue, aus den Befragungsdaten geschätzte Nutzenfunktion in einem einfachen und bekannten Szenario liefert. Insbesondere ist interessant, wie sich die in Abschnitt 5.2.1 getroffene Annahme, dass das Reisen im Auto nicht negativer bewertet wird als das Warten am Aktivitätenort, auf das Verkehrsverhalten der Nutzer auswirkt. Dafür wurde das Testszenario einmal mit der geschätzten Nutzenfunktion und ein zweites Mal mit der von Rieser / Grether / Nagel (2008) verwendeten Funktion berechnet. Der Übersicht halber sind diese beiden Funktionen für das in diesem Falle einzige Verkehrsmittel Auto hier noch einmal aufgeführt, wobei erstere im weiteren Verlauf als „neue“ und letztere als „alte“ Nutzenfunktion verwendet wird:

$$U_{car_new} = +\frac{2.26}{h} \cdot t^* \cdot \ln\left(\frac{t_{perf}}{t_0}\right) - \frac{11.04}{h} \cdot t_{late} \quad (6.1)$$

$$U_{car_old} = -6\frac{EUR}{h} \cdot t_{car} + 6\frac{EUR}{h} \cdot t^* \cdot \ln\left(\frac{t_{perf}}{t_0}\right) - 18\frac{EUR}{h} \cdot t_{late} \quad (6.2)$$

Dabei ist zu beachten, dass die Erweiterung der Nutzenfunktion um monetäre Einflussfaktoren in diesem Beispiel keine Rolle spielt, da die Distanzkosten für alle Verkehrsteilnehmer gleich hoch sind. Aus diesem Grund wurde hier der entsprechende Teil in der Nutzenfunktion vernachlässigt. In Abbildung 9 wurde jeweils die Anzahl der Abfahrten und Ankünfte geplottet. Die mit Gleichung (6.1) übereinstimmenden Kurven sind mit „departures_new“ und „arrivals_new“ gekennzeichnet und korrespondieren folglich mit der eigens ermittelten neuen Nutzenfunktion. Analog sind die Kurven „departures_old“ und „arrivals_old“ auf Gleichung (6.2) bezogen.

Wie der Abbildung zu entnehmen ist, entwickeln sich bei beiden Nutzenfunktionen jeweils eine Vormittags- und eine Nachmittagsspitze. Die Vormittagsspitze unterscheidet sich vor allem bei den Abfahrten, während die Ankünfte einen ähnlichen Verlauf aufzeigen. Bei der Simulation mit der neuen Nutzenfunktion fahren alle Agenten nahezu zum gleichen Zeitpunkt von Zuhause los. Bei Verwendung der alten Nutzenfunktion verteilen sich die Abfahrten

hingegen über einen deutlich größeren Zeitraum. Dieser Effekt lässt sich leicht anhand der getroffenen Annahme erklären, die besagt, dass das Reisen im Auto (also auch das im Stau stehen) von den Agenten im Beispiel mit der neuen Nutzenfunktion nicht schlechter bewertet wird als das Warten am Arbeitsort. Vor dem Stau losfahren und am Arbeitsort warten oder später losfahren und im Stau stehen sind aufgrund des Flaschenhalses die einzigen beiden Alternativen. Wie in Abschnitt 5.2.1 erläutert, erfahren die Agenten durch das Reisen im Auto und durch das Warten denselben negativen Nutzen durch die Opportunitätskosten der Zeit. Es gibt für sie also keinen Grund, ihre Abfahrtszeit an das Staubild anzupassen, um weniger im Stau zu stehen. Anders stellt sich dieser Zusammenhang bei Verwendung der alten Nutzenfunktion dar: die Agenten erfahren zusätzlich zu den Opportunitätskosten der Zeit noch einen negativen Nutzen i.H.v. 6 Euro pro Stunde und verteilen ihre Abfahrten deshalb gleichmäßiger über die Zeit. Bemerkenswert ist, dass der Verlauf der Ankunftscurven beider Funktionen nahezu identisch ist. Dies ist auf die Konstruktion des Flaschenhalses und das zugrunde liegende Verkehrsflussmodell zurückzuführen.

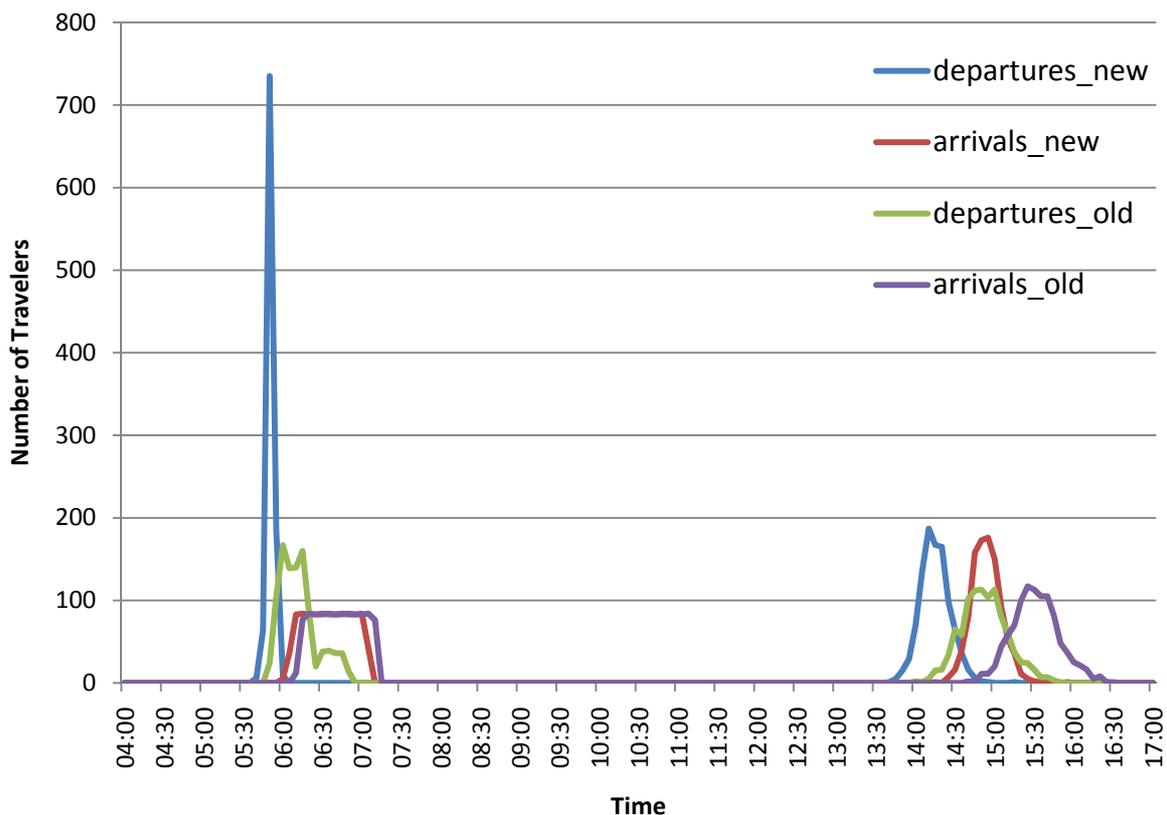


Abbildung 9: Ergebnisse des Testszenarios mit Abfahrtszeitwahl.³⁶

³⁶ Quelle: Eigene Darstellung.

Der Vergleich der Nachmittagsspitzen ist deutlich weniger aussagekräftig. Da auf der Heimfahrt keine Kapazitätsengpässe und somit keine Staus vorhanden sind und zusätzlich keine Bestrafung für das späte Eintreffen am Aktivitätenort „Home“ existiert, ist die Verteilung der Abfahrten über die Zeit deutlich breiter als in der Frühspitze. Auffallend ist aber, dass die Abfahrtszeiten in der Simulation mit der neuen Nutzenfunktion deutlich früher einsetzen als bei der alten Nutzenfunktion. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Agenten zu Beginn der Simulation kalkulieren, dass sie ab dem Zeitpunkt, an dem sie zu Hause losfahren, acht Stunden arbeiten werden. Die effektive Reisezeit wird im Modell nicht betrachtet. Erst im Laufe der Iterationen passen sie ihre Tagespläne dementsprechend an. Da die Agenten in der Simulation mit der alten Nutzenfunktion später zu Hause losfahren, setzt sich diese Verschiebung über den Tag hin weiter fort. Ein Test, in dem die neue Nutzenfunktion über 2000 Iterationen gerechnet wurde, deutet jedoch darauf hin, dass dieser Effekt mit zunehmender Iterationsanzahl minimiert und das Maximum der Abfahrten von der Arbeit nach Hause in Richtung 15:00 verschoben wird.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die getroffene Annahme einerseits im Modell tendenziell mehr Stau produziert und andererseits auch einer Plausibilitätskontrolle nicht standhält. So ist es unwahrscheinlich, dass Straßenverkehrsnutzer auf dem Weg zur Arbeit ihre Abfahrtszeit nicht von der zu erwartenden Staumenge auf ihrem Weg abhängig machen und wie im betrachteten Szenario unempfindlich gegenüber einem Zeitverlust in den Morgenstunden sind. Es sollte daher in Zukunft versucht werden, die Opportunitätskosten der Zeit und den empfundenen negativen Nutzen des Reisens getrennt aus Befragungsdaten zu ermitteln, um so stabile Parameter für eine Simulation zu erhalten.

6.2.2 TestszENARIO mit Abfahrtszeit- und Verkehrsmittelwahl

In diesem zweiten TestszENARIO sollen nun die Auswirkungen auf das Verkehrsverhalten der Nutzer untersucht werden, die sich durch das Hinzunehmen des öffentlichen Verkehrs ergeben. Dabei wurden sowohl für das Verkehrsmittel Auto (= car) als auch für den öffentlichen Verkehr (= pt) die aus den Befragungsdaten unter Abschnitt 5.2.3 hergeleiteten Nutzenfunktionen verwendet. Aus Abbildung 10 sind wiederum die Abfahrten und Ankünfte der Agenten im Tagesverlauf zu entnehmen. Diese korrespondieren für den öffentlichen Verkehr mit „departures_pt“ und „arrivals_pt“ und für das Verkehrsmittel Auto mit „departures_car“ und „arrivals_car“. Der Modal Split beläuft sich in diesem TestszENARIO auf 44.75 % Autofahrer und 55.25 % Nutzer des öffentlichen Verkehrs. Der Verlauf der Abfahrts- und Ankunftshäufigkeiten beim Verkehrsmittel Auto entspricht in etwa dem der Simulation mit der neuen Nutzenfunktion aus Abbildung 9. Die Autonutzer fahren in der Frühspitze alle

etwa zur gleichen Zeit von zuhause aus los, ihre Ankunft am Arbeitsort verteilt sich aufgrund des Flaschenhalses relativ gleichmäßig über eine Stunde. Die pt-Nutzer hingegen müssen erst etwas später zuhause losfahren, um alle gleichzeitig pünktlich um 7:00 Uhr in der Arbeit einzutreffen. Dieser Effekt ist damit zu erklären, dass der öffentliche Verkehr im aktuellen Modell keinerlei Kapazitätsbeschränkungen unterliegt, die Reisezeit für die Nutzer also immer konstant bleibt egal wie viele Agenten sich für den öffentlichen Verkehr entscheiden.

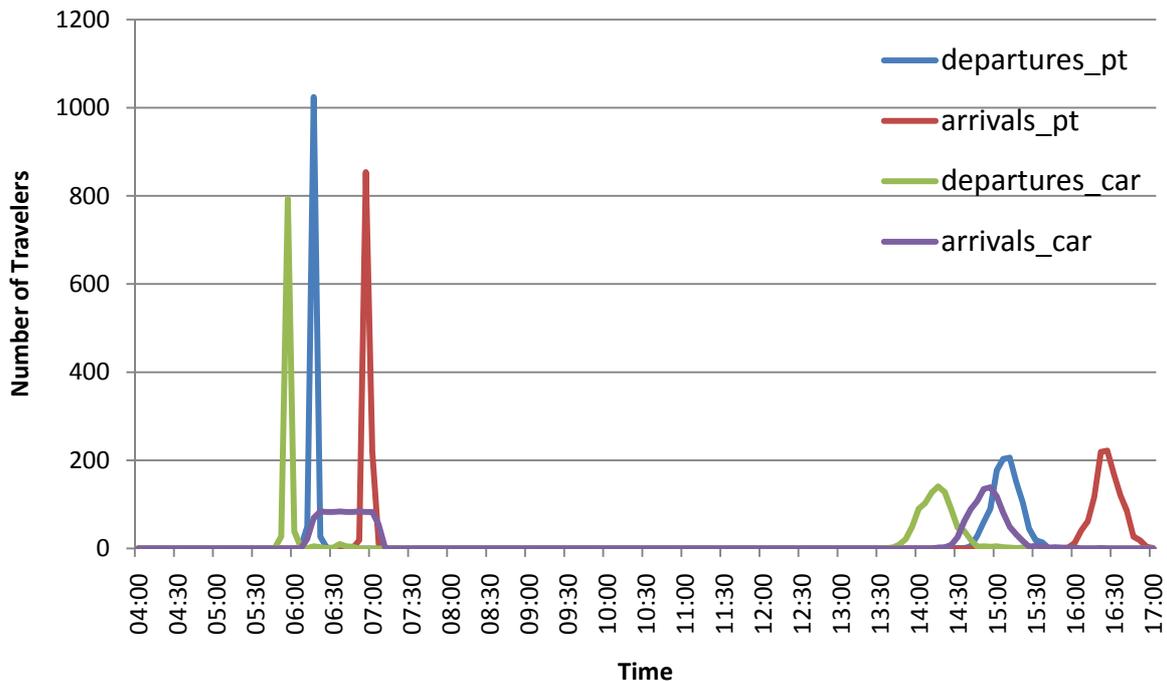


Abbildung 10: Ergebnisse des Testszenarios mit Abfahrtszeit- und Verkehrsmittelwahl.³⁷

Am Nachmittag ergibt sich ähnlich des ersten Testszenarios eine deutlich breitere Spitze für beide Verkehrsmittel. Allerdings beginnen die Autonutzer deutlich früher mit der Heimfahrt als die Nutzer des öffentlichen Verkehrs. Es ist sehr wahrscheinlich, dass dies ähnliche Gründe hat wie im ersten Testszenario: da die Autofahrer deutlich früher als die pt-Nutzer von zuhause aus losfahren, beide aber mit einer achtstündigen Arbeitszeit ab der Endzeit der Aktivität „Home“ rechnen, kommt es zu diesem Versatz der Abfahrtskurven. Ansonsten ist in diesem Testszenario nichts Unerwartetes zu beobachten, was die Einschätzung zulässt, dass die geschätzten Nutzenfunktionen an einem realen Szenario getestet werden sollten.

³⁷ Quelle: Eigene Darstellung.

7 Anwendung auf ein reelles Szenario: Großraum Zürich

Nachdem die kostenabhängige MATSim-Nutzenfunktion in Kapitel 6 erfolgreich getestet wurde, soll sie nun in diesem Kapitel bei einer Simulation des Tagesverkehrs im Großraum Zürich angewendet werden. Das Ziel dabei ist insbesondere, ähnlich gute Ergebnisse wie Rieser / Grether / Nagel (2008) zu erreichen, die aber nunmehr nicht auf modelltheoretischen sondern auf tatsächlich aus Umfragedaten gewonnenen Verhaltensparametern basieren und zusätzlich die Distanzkosten der Verkehrsmittel berücksichtigen. Damit wäre eine gute Ausgangslage geschaffen, um bspw. die Wirkungen einer Verkehrsmaßnahme auf Basis reeller Daten vorhersagen zu können. Während der tägliche Ist-Verkehrszustand auch anhand von modelltheoretisch gewonnenen Parametern abbildbar ist, scheint fraglich, ob der Verkehrszustand nach einer Verkehrsmaßnahme ohne die Anwendung von geschätzten Parametern dann immer noch Aussagekraft besitzt. Im Folgenden werden die Simulationen von Rieser / Grether / Nagel (2008) als **Vergleichsfall** bezeichnet, die Simulationen im Rahmen dieser Arbeit als **Testfall**.³⁸ In Abschnitt 7.1 wird die Modellkonfiguration der beiden Fälle erläutert und dabei insbesondere auf Unterschiede hingewiesen. Darauf folgt Abschnitt 7.2, in dem die Ergebnisse von Vergleichs- und Testfall ausgewertet und miteinander verglichen werden.

7.1 Modellkonfiguration

Die Szenarien werden für den Großraum Zürich in der Schweiz simuliert, welcher einen Radius von ca. 30 km hat und etwa 1 Million Einwohner beheimatet. Das Straßennetzwerk basiert auf einem gesamtschweizer Regionalplanungsnetzwerk, das alle großen Korridore für Transitverkehr beinhaltet. Es besteht aus 24 180 Knoten und 60 492 Strecken mit den zugehörigen Attributen wie Kapazität, Maximalgeschwindigkeit oder Anzahl der Spuren (Chen / Rieser / Grether / Nagel, 2008). Die initiale Verkehrsnachfrage wurde für alle Reisenden in der Schweiz erzeugt, wobei für alle dieser Agenten Informationen über ihre täglichen Aktivitäten enthalten sind (SFSSO, 2006). Diese beinhalten häusliche Aktivitäten, Arbeit, Ausbildung, Einkaufen und Freizeit. Die typischen Ausübungszeiten wurden aus Mikrozensusdaten abgeleitet und können von den Agenten im Verlauf der Simulation individuell angepasst werden. Da zunächst nur der Großraum Zürich betrachtet werden soll, fand nur die initiale Verkehrsnachfrage derjenigen Personen Eingang in die Simulationen, deren Route innerhalb eines Tages durch den oben beschriebenen 30-km-Radius um Zürich

³⁸ Sowohl der Vergleichsfall als auch der Testfall wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit auf derselben MATSim-Revision 5785 simuliert.

führt. Zur Beschleunigung der Simulation werden lediglich 10 %, also 181 725 dieser Agenten betrachtet. Die Eigenschaften des Verkehrsnetzes wurden dementsprechend angepasst. Die Abfahrtszeit-, Routen- und Verkehrsmittelwahl wird wie in Abschnitt 4.3 beschrieben innerhalb des iterativen Anpassungsprozesses simuliert. Dieser wurde über 1000 Iterationen berechnet, um eine relaxierte optimierte Verkehrsnachfrage zu erhalten. Den Aktivitäten wurden Öffnungszeiten zugeordnet, um unrealistisches Verhalten wie einen Schulbesuch mitten in der Nacht zu verhindern. Tabelle 6 zeigt einen Überblick der Öffnungszeiten nach Aktivitätentyp.

Aktivität	Öffnungszeit	Schließzeit
Häusliche Aktivität	00:00	24:00
Arbeiten	06:00	20:00
Ausbildung	06:00	20:00
Einkaufen	08:00	20:00
Freizeit	00:00	24:00

Tabelle 6: Öffnungszeiten nach Aktivitätentyp.³⁹

Zur Abgrenzung von Vergleichs- und Testfall sind in Tabelle 7 die wichtigsten Verhaltensparameter der beiden Simulationen noch einmal gegenübergestellt. Eine verbale Beschreibung dieser Parameter findet sich in Tabelle 5.

Zusätzlich zu den in Kapitel 6 beschriebenen Änderungen im Modul für die Bewertung der Tagespläne, um die verkehrsmittelabhängigen Distanzkosten beim Vergleich der Tagespläne mitzubetrachten, ist für den Testfall noch eine Anpassung des Routing-Moduls notwendig. Das Modul berechnet diejenigen Routen durch das Netz, die einen minimalen Nutzenverlust durch Reisen mit sich bringen. Diese sind nach der Erweiterung der Nutzenfunktion um monetäre Einflussfaktoren nunmehr ebenfalls abhängig von den Distanzkosten. Deshalb ist es nötig, dass diese Tatsache in die Berechnung der besten Routen einfließt. Die notwendigen Anpassungen wurden implementiert, so dass der Vergleichs- und der Testfall

³⁹ Quelle: Eigene Darstellung.

jeweils auf derselben Version von MATSim gerechnet werden konnten. Im Vergleichsfall sind die distanzabhängigen Faktoren lediglich auf den Wert Null gesetzt, wie aus Tabelle 7 entnommen werden kann.

Parameter	Testfall	Vergleichsfall
β_{perf}	+2.26 [1/h]	+6.00 [Euro/h]
β_{tt_car}	+0.00 [1/h]	-6.00 [Euro/h]
β_{tt_pt}	-0.10 [1/h]	-3.00 [Euro/h]
β_{cost_car}	-0.20 [1/CHF]	+0.00
Distanzkosten car	+0.12 [CHF/km]	+0.00
β_{fare_pt}	-0.0535 [1/CHF]	+0.00
Distanzkosten pt	+0.28 [CHF/km]	+0.00
γ	2	2

**Tabelle 7: Vergleich der verwendeten Verhaltensparameter:
Rieser / Grether / Nagel (2008) und eigene Werte.⁴⁰**

⁴⁰ Quelle: Eigene Darstellung.

7.2 Ergebnisse

Dieser Abschnitt dient der Auswertung und dem Vergleich der Ergebnisse beider Simulationen. Dafür werden mehrere Kenngrößen, die MATSim für jede Simulation standardmäßig ausgibt, einander gegenüber gestellt. Ein erster Indikator für eventuelle Abweichungen, die sich durch den Einbezug von Distanzkosten in die Nutzenfunktionen ergeben, sind Tagesganglinien. In Abbildung 11 ist für Test- und Vergleichsfall die Anzahl der von einer Aktivität abfahrenden Agenten gegen die Tageszeit aufgetragen. „departures_new“ bezieht sich dabei auf den Testfall, „departures_old“ auf den Vergleichsfall. Tagesganglinien sind in der Regel durch eine vormittägliche und eine nachmittägliche Spitze gekennzeichnet, die häufig auch als Spitzenstunde oder im allgemeinen Sprachgebrauch als Rush Hour bezeichnet wird. Zu diesen Zeiten beginnt bzw. endet für sehr viele Personen ihre Arbeitszeit, weshalb sie gezwungen sind sich im Verkehrsnetz zu bewegen. Beide Kurven weisen einen unauffälligen Verlauf auf. Auch ihr Vergleich lässt nicht darauf schließen, dass sich durch die Veränderungen in der Nutzenfunktion starke Änderungen im großräumigen Verkehrsbild ergeben würden. Insofern ist festzuhalten, dass die distanzkostenabhängige Nutzenfunktion im Bezug auf Tagesganglinien zu keinen merklichen Änderungen im Verkehrsbild führt.

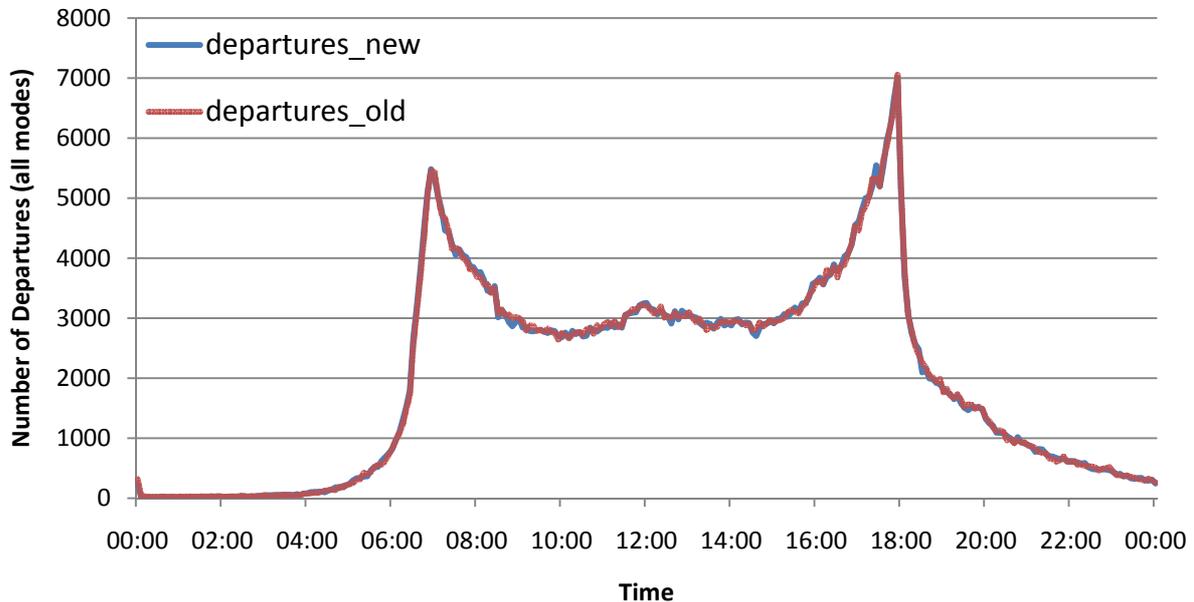
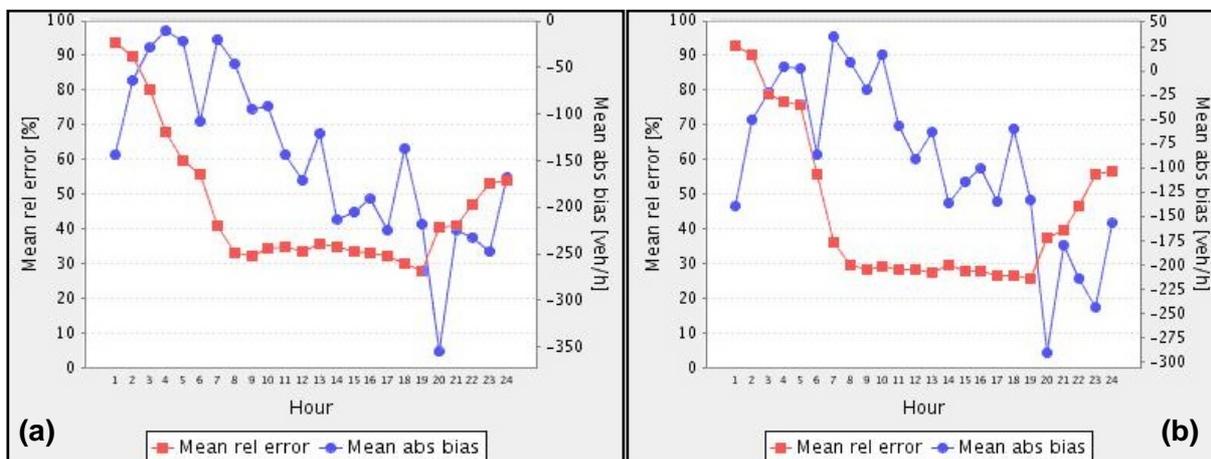


Abbildung 11: Vergleich der beiden Simulationen: Tagesganglinien der abfahrenden Agenten über den Tag.⁴¹

⁴¹ Quelle: Eigene Darstellung.

Der Vergleich zweier Tagesganglinien von unterschiedlichen Simulationsläufen lässt allerdings noch keinen Rückschluss auf die Qualität in Bezug auf das tatsächliche Verkehrsbild zu. Eine Möglichkeit die Unterschiede von Simulation und Realität zu erkennen ist der Zählstellenvergleich. Dafür werden stundengenaue Daten von 159 Verkehrszählstellen in Zürich mit den jeweiligen Verkehrsflüssen in der Simulation abgeglichen. Als aggregierte Größe kann dann der mittlere relative Fehler (mean relative error) aller Zählstellenvergleiche dienen, welcher in

Abbildung 12 über den gesamten Tag erkennbar ist. Die rote Kurve ist auf der linken Seite für den Testfall und auf der rechten Seite für den Vergleichsfall geplottet. In den für die Simulation relevanten Zeiträumen zwischen 08:00 Uhr und 20:00 Uhr liegt er im Vergleichsfall relativ konstant bei ca. 30 %, im Testfall leicht darüber. Die durchschnittliche Abweichung zwischen den von den Zählstellen erfassten Verkehrsflüssen und denen der Simulation beträgt demnach etwa 30 %. Damit erscheint der Fehler relativ hoch, allerdings können die täglichen Schwankungen der Zählstellen ebenfalls diese Größenordnung erreichen (Rieser / Grether / Nagel, 2008). Vergleicht man die beiden Simulationsläufe miteinander, so lässt sich festhalten, dass die Einführung einer distanzkostenabhängigen Nutzenfunktion mit geschätzten Verhaltensparametern zu einer geringfügigen Verschlechterung des mittleren relativen Fehlers.



**Abbildung 12: Vergleich mit Verkehrszählstellen in Zürich:
Mittlerer relativer Fehler des Testfalls (a) und des Vergleichsfalls (b).⁴²**

⁴² Quelle: Eigene Darstellung.

Des Weiteren könnte es sein, dass das Modell des Testfalls zu Abweichungen bei der Wahl des Verkehrsmittels führt. Aus diesem Grund wurde der Modal Split beider Simulationen in Abbildung 13 gegenüber gestellt.

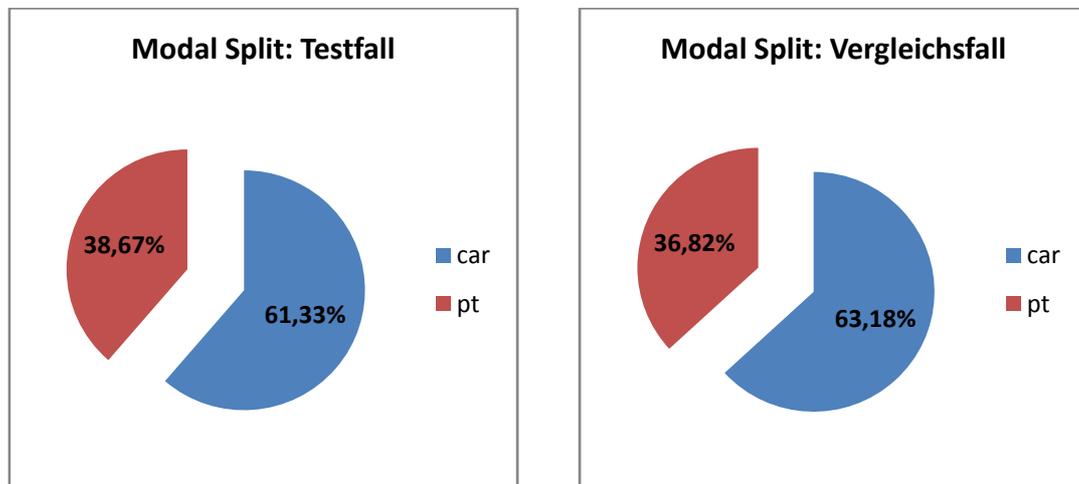


Abbildung 13: Vergleich des Modal Split von Test- und Vergleichsfall.⁴³

Es lässt sich festhalten, dass es durch die Hinzunahme der Distanzkosten zu einem leichten Anstieg der Fahrten mit dem öffentlichen Verkehr kommt. Dieser beträgt 1.85 %. Auch hier weicht der Testfall also nicht stark vom Vergleichsfall ab.

Zuletzt soll nun überprüft werden, wie sich die in Abschnitt 5.2.1 getroffene Annahme über die Gleichsetzung von Wartezeit und Reisezeit im Auto bei der Bewertung des Nutzens auswirkt. Die Ergebnisse der Testszenarien aus Kapitel 6 deuten an, dass es für die Agenten aufgrund dieser Annahme keine Motivation mehr gibt, ihre Abfahrtszeit an das Staubild anzupassen. Deshalb könnten die Reisezeiten im Testfall deutlich über denen des Vergleichsfalls liegen. Außerdem scheint die Untersuchung der mittleren Fahrtweite der Agenten relevant zu sein, um feststellen zu können, ob sich signifikante Unterschiede durch die Anpassung des Routing-Moduls ergeben. Wie aus Tabelle 8 zu erkennen ist, nimmt die mittlere Fahrtweite im Testfall um etwa 400 Meter ab. Dies lässt darauf schließen, dass aufgrund der anfallenden Distanzkosten kürzere Routen bevorzugt werden. Allerdings ist diese Abnahme der mittleren Reiseweite um etwa 3 % ebenfalls nicht besonders stark.

⁴³ Quelle: Eigene Darstellung.

	Testfall	Vergleichsfall	Vergleich
Mittlere Fahrtweite der ausgeführten Tagespläne	13336.51 [m]	13744.61 [m]	- 3.06 [%]
Mittlere Reisezeit der ausgeführten Tagespläne	00:14:09 [h]	00:13:19 [h]	+ 6.26 [%]

**Tabelle 8: Vergleich verkehrsrelevanter Kenngrößen:
Mittlere Fahrtweite und mittlere Reisezeit einer Fahrt.⁴⁴**

Die mittlere Reisezeit erhöht sich im Testfall um 50 Sekunden auf 14:09 Minuten. Dies entspricht einem Anstieg von ca. 6.3 %. Verbindet man dieses Ergebnis mit der kürzeren Fahrtweite bestätigen sich also die Ergebnisse der Testszenarios und die Agenten verbringen tendenziell mehr Zeit in den jeweiligen Verkehrsmitteln. Insgesamt sind diese Abweichungen allerdings als eher gering einzustufen und beeinflussen das Verkehrsbild nur marginal.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Simulation des Testfalls insgesamt ähnlich gute Ergebnisse liefert wie die Auswertungen von Rieser / Grether / Nagel (2008). Insofern kann die in Kapitel 5 um monetäre Einflussfaktoren erweiterte Nutzenfunktion auch für zukünftige Simulationen herangezogen werden. Sie hat im Vergleich zu der des Vergleichsfalls den Vorteil, dass Vorhersagen über Verkehrszustände nach einer geplanten Verkehrsmaßnahme nun auf reelle Daten gestützt und damit ggf. aussagekräftiger sind.

⁴⁴ Quelle: Eigene Darstellung.

8 Integration des Einkommens in die MATSim-Nutzenfunktion

8.1 Theoretische Überlegungen

Aus den Schätzungen der Verhaltensparameter im Kapitel 5 lässt sich entnehmen, dass die befragten Personen für die Fahrt mit dem Auto eine deutlich höhere Nutzeneinbuße wahrnehmen als für die Fahrt mit dem öffentlichen Verkehr, wenn die Preise für beide Modi gleichermaßen steigen. Dies lässt sich an den individuellen Nutzenänderungen der beiden Verkehrsmittel erkennen, die sich bspw. bei einer Preissteigerung von 1 CHF und ansonsten ceteris paribus Bedingungen ergeben. Diese Nutzenänderungen stellen sich gemäß der Gleichungen (5.8) und (5.9) wie folgt dar:

$$\Delta U_{car} = \hat{\beta}_{cost_car} \cdot \Delta c_{car} = -0.2 \cdot \frac{1}{CHF} \cdot 1CHF = -0.2 \quad (8.1)$$

$$\Delta U_{pt} = \hat{\beta}_{fare_pt} \cdot \Delta c_{pt} = -0.0535 \cdot \frac{1}{CHF} \cdot 1CHF = -0.0535 \quad (8.2)$$

Die befragten Personen müssen, sofern sie mit dem Auto fahren, bei einer identischen Preissteigerung einen Nutzenverlust von 0.2 Nutzeinheiten hinnehmen. Dahingegen beträgt dieser Verlust nur 0.0535 Einheiten, wenn sie den öffentlichen Verkehr benutzen. Dies deutet darauf hin, dass der Nutzen, den die Personen aus einer Änderung ihres Einkommens erfahren davon abhängt, **wofür** sie das Geld verwenden (bzw. **woher** sie es erhalten). Wenn die Nutzenunterschiede aber derart stark je nach Verwendung des Einkommens variieren, gestaltet sich eine Kompensation generell problematisch, egal ob sie im Zuge der Verkehrsmaßnahme oder über den allgemeinen Haushalt in Form von Transferleistungen stattfindet. Denn es wäre dann fraglich, ob die Personen eine Kompensation in Geldeinheiten innerhalb ihres persönlichen Nutzenkalküls genauso bewerten wie die vorher angehobenen Preise der Verkehrsmittel. Damit wäre es ohne weitere Datenerhebungen unmöglich zu berechnen, welcher Geldbetrag an einen Verlierer der Verkehrsmaßnahme gezahlt oder von einem Gewinner der Maßnahme eingezogen werden müsste, um für ihn sein Nutzenniveau konstant zu halten (vgl. Kompensationsvariation in Abschnitt 3.2.2). Ist man darauf angewiesen, die Nutzenänderungen bspw. zur Berechnung eines Kompensationsschemas zu bewerten, liegt es nahe in den Schätzungen alle Verhaltensparameter vor monetären Einflussfaktoren auf

denselben Parameter zu fixieren. Dieser wäre dann über alle Verkehrsmittel identisch und würde den marginalen Nutzen aus einer Einkommensänderung widerspiegeln.⁴⁵

Vielmehr als eine verkehrsmittelabhängige Unterscheidung könnte eine personenspezifische Betrachtung der marginalen Nutzen von Einkommensänderungen relevant sein, welche die Nutzen von Mobilität in Abhängigkeit der Kosten und des verfügbaren Einkommens darstellt. Ähnliche Überlegungen finden sich in der Literatur bspw. bei Herriges / Kling (1999), Kockelman (2001), Bates (1987) sowie Franklin (2006). Auf dieser Basis werden im folgenden Abschnitt verschiedene Möglichkeiten zur Integration des Einkommens in die Nutzenfunktion betrachtet. Dabei wird eine sinnvolle funktionale Form für weitere Simulationen und Analysen ausgewählt, die den vorliegenden Daten und den Möglichkeiten einer Implementation in MATSim Rechnung trägt.

8.2 Auswahl des einkommensabhängigen Modells

Wie in Abbildung 14 zu sehen, bildet die von Franklin (2006) verwendete funktionale Form einer einkommensabhängigen Nutzenfunktion die Grundlage weiterer Untersuchungen in dieser Arbeit. Diese beziehen sich generell auf Franklins (2006) „linear-in-income“ Nutzenfunktion (Franklin, 2006, S. 75 ff). Sie ist linear in den Verhaltensparametern und das logarithmierte Einkommen geht in Ausdrücken erster Ordnung ein:

$$U_{i,car} = \hat{\beta}_{cost} \cdot \log(y_i - c_{i,car}) - \hat{\beta}_{tt} \cdot t_{i,car} \quad (8.3)$$

$$U_{i,pt} = \hat{\beta}_{income} \cdot \log(y_i) + \hat{\beta}_{cost} \cdot \log(y_i - c_{i,pt}) - \hat{\beta}_{tt} \cdot t_{i,pt} \quad (8.4)$$

Dabei bezeichnet $U_{i,car}$ bzw. $U_{i,pt}$ den individuellen Nutzen einer Person i aus der Benutzung der beiden Verkehrsmitteln car bzw. pt. y_i stellt das personenbezogene verfügbare Einkommen pro Fahrt dar, $c_{i,car}$ und $c_{i,pt}$ die verkehrsmittelabhängigen Kosten der Fahrt sowie $t_{i,car}$ und $t_{i,pt}$ die korrespondierenden Reisezeiten. Der einkommensabhängige Fehlerterm $\hat{\beta}_{income} \cdot \log(y_i)$ in der pt-Nutzenfunktion bildet die Tatsache ab, dass die dem Modell zugrundeliegenden Befragten das Auto dem öffentlichen Verkehr vorzuziehen, wenn Reisezeiten und Kosten beider Verkehrsmittel identisch sind. In dieser Formulierung wird angenommen, dass dieser Effekt mit steigendem Einkommen an

⁴⁵ Neben dieser praktischen Überlegung zur Einführung eines identischen Verhaltensparameters vor den monetären Einflussfaktoren zeigen auch die Ergebnisse der Studie des IVT eine ähnliche Größenordnung der beiden Verhaltensparameter an. Vgl. hierzu Vrtic et al. (2007) und Tabelle 3. Die deutlichen Abweichungen bei den Schätzungen dieser Arbeit lassen sich vermutlich durch die nicht betrachteten Variablen erklären.

Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl gewinnt (Franklin, 2006 sowie Small, 1983). Damit haben geringer Verdienende nur eine geringe Neigung das Auto dem öffentlichen Verkehr vorzuziehen, während dieses Verhalten bei besser Verdienenden verstärkt zu beobachten ist. Dieser Zusammenhang wird von Franklin (2006) linear zum logarithmierten Einkommen angenommen.

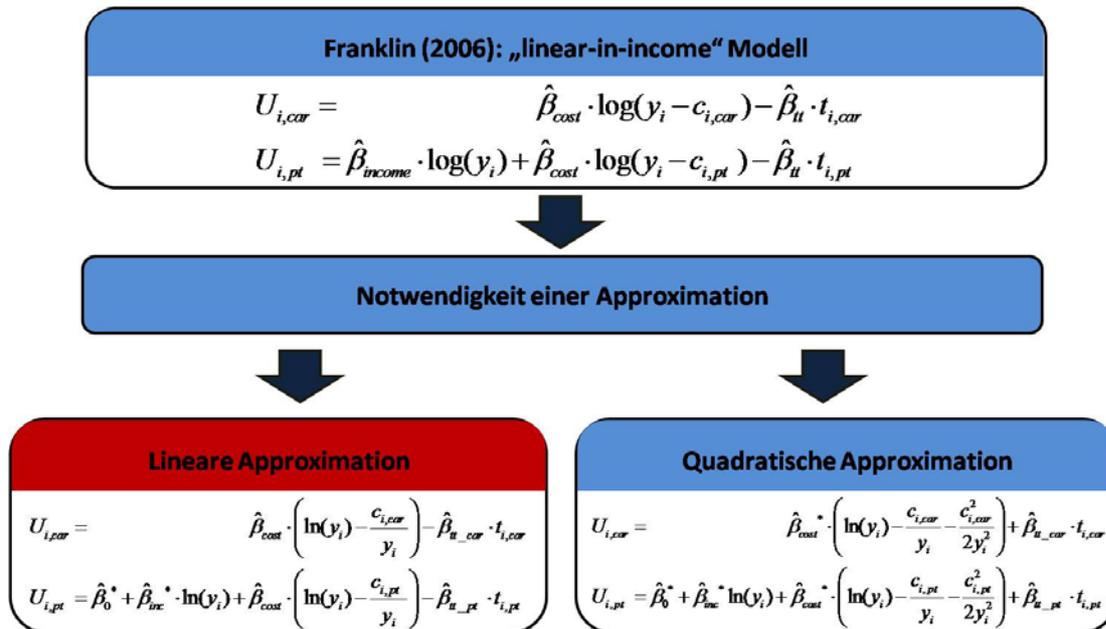


Abbildung 14: Auswahl einer einkommensabhängigen Nutzenfunktion.⁴⁶

Die beiden Terme $\hat{\beta}_{cost} \cdot \log(y_i - c_{i,car})$ und $\hat{\beta}_{cost} \cdot \log(y_i - c_{i,pt})$ beschreiben den Zusammenhang zwischen dem Gesamtnutzen und den Kosten einer Fahrt. Diese monetären Einflussfaktoren $c_{i,car}$ und $c_{i,pt}$ werden nun jedoch nicht mehr nur als eigenständige Größe betrachtet (vgl. Kapitel 5) sondern in Relation zum verfügbaren Einkommen y_i gesetzt. Zudem wurden in den folgenden Schätzungen die beiden Kostenbestandteile $c_{i,car}$ und $c_{i,toll}$, die in Kapitel 5 noch separat betrachtet wurden, zu einer Größe zusammengefasst. Dies ist damit zu begründen, dass diese beiden Faktoren sich in der Befragung grundsätzlich zu den momentan zu zahlenden variablen Kosten für die Fahrt mit dem Auto addieren. Sieht man diese Kosten als gegeben an, so erfahren besser Verdienende bei identischen

⁴⁶ Quelle: Eigene Darstellung. Alle mit (*) markierten Verhaltensparameter wurden in den Schätzungen einzeln getestet. Sie verfehlten den Signifikanztest auf einem Niveau von 5 %. Deshalb kann nicht ausgeschlossen werden, dass sie identisch mit Null sind, weshalb sie in weiteren Schätzungen dann nicht mehr mitbetrachtet wurden.

Reisezeiten nach diesem Modell also eine geringere Nutzeneinbuße durch Mobilität als schlechter Verdienende. Auch hier wird kein linearer sondern ein logarithmischer Zusammenhang postuliert. Dies entspricht der Idee eines abnehmenden Grenznutzens von Geld in der Wirtschaftswissenschaft: der marginale Nutzen von Geld nimmt mit steigendem Einkommen ab. Intuitiv lässt sich dies leicht begründen: eine Person mit geringem Einkommen erfährt demnach durch die Verringerung ihres Einkommens eine größere Nutzeneinbuße als eine Person mit höherem Einkommen bei identischer Veränderung. Der letzte Teil der von Franklin (2006) verwendeten Nutzenfunktionen beschreibt den negativen Zusammenhang von Nutzen und der für eine Fahrt aufzubringenden Reisezeit. Diese Formulierung geht weitestgehend analog zu den bereits in Kapitel 5 verwendeten Funktionen und soll deshalb an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden.⁴⁷

Aufgrund einiger Besonderheiten der dieser Arbeit zugrunde liegenden Daten, ist es leider nicht möglich die funktionale Form der einkommensabhängigen Nutzenfunktion von Franklin (2006) direkt zu übernehmen. Insbesondere tauchen in den Daten Fahrten auf, deren Kosten über dem durchschnittlich verfügbaren Einkommen pro Fahrt liegt. Dabei wird das individuelle verfügbare Einkommen pro Fahrt definiert als:

$$y_i = \frac{y_{HH}}{n_{HH} \cdot 240 \cdot 3.5} \quad (8.5)$$

Wobei y_{HH} das jährliche Einkommen des Haushalts bezeichnet und n_{HH} die Anzahl der Haushaltsmitglieder. Des Weiteren wird angenommen, dass sich dieses Pro-Kopf-Einkommen auf 240 Arbeitstage verteilt und im Durchschnitt 3.5 Fahrten pro Tag durchgeführt werden. All dies deutet darauf hin, dass ein Teil der erfassten Fahrten nicht täglich zurückgelegt wird. Denn der Term $y_i - c_{i,car}$ bzw. $y_i - c_{i,pt}$ wird für einige Personen negativ. In diesem Definitionsbereich ist der Logarithmus nicht definiert. Es kommt in der Realität aber häufig, dass für manche Fahrten mehr ausgegeben wird als im Durchschnitt für sie an Einkommen zu Verfügung stünde. Will man diese Fahrten aber nicht einfach aus den Daten entfernen, so muss nach einer neuen funktionalen Form der Nutzenfunktion gesucht werden. Die übrigen Eigenschaften wie die einer streng monoton steigenden Funktion oder des abnehmenden Grenznutzens von Einkommen sollten dabei aber erhalten bleiben. Eine solche Möglichkeit stellt die Approximation des Logarithmus durch eine Taylorentwicklung dar, wie in den folgenden beiden Abschnitten erläutert wird.

⁴⁷ Franklin (2006) setzt den marginalen negativen Nutzen des Reisens in beiden Verkehrsmitteln auf denselben Wert. Diese stark restriktive Beschränkung scheint generell fragwürdig, besonders im Hinblick auf die in dieser Arbeit geschätzten Modelle. Aus diesem Grund wird sie im weiteren Verlauf nicht übernommen.

8.2.1 Lineare Approximation des Logarithmus

Auf der Suche nach einer einkommensabhängigen Nutzenfunktion, die einerseits einen abnehmenden Grenznutzen von Einkommen abbilden kann und andererseits im negativen Wertebereich definiert ist, wurde zunächst versucht, den Term $\log(y_i - c_i)$ aus den Gleichungen (8.3) und (8.4) durch eine Taylorapproximation ersten Grades zu ersetzen (Kaballo, 2000).⁴⁸ Im Gegensatz zu Franklin (2006) wurde hier der natürliche Logarithmus verwendet:

$$\ln(y_i - c_i) \approx \ln(y_i) - c_i \cdot \frac{\partial \ln(y_i)}{\partial y_i} = \ln(y_i) - \frac{c_i}{y_i} \quad (8.6)$$

Setzt man dies in die Gleichungen (8.3) und (8.4) ein, erhält man mit den Gleichungen (8.7) und (8.8) ein linear approximiertes Modell. Die Restriktion von Franklin (2006), dass die Reisezeit im Auto und im ÖV per se gleich bewertet wird, wurde dabei aufgeweicht, weshalb zwei verschiedene Verhaltensparameter vor den Reisezeiten t_{car} und t_{pt} stehen.

$$U_{i,car} = \hat{\beta}_{cost} \cdot \left(\ln(y_i) - \frac{c_{i,car}}{y_i} \right) - \hat{\beta}_{tt_car} \cdot t_{i,car} \quad (8.7)$$

$$U_{i,pt} = \hat{\beta}_0^* + \hat{\beta}_{inc}^* \cdot \ln(y_i) + \hat{\beta}_{cost} \cdot \left(\ln(y_i) - \frac{c_{i,pt}}{y_i} \right) - \hat{\beta}_{tt_pt} \cdot t_{i,pt} \quad (8.8)$$

Die beiden in (8.8) mit (*) gekennzeichneten alternativenspezifischen Verhaltensparameter $\hat{\beta}_0$ und $\hat{\beta}_{inc}$ waren nach der Schätzung nicht signifikant von Null verschieden. Sie drücken eine Präferenz der befragten Personen für eines der beiden Verkehrsmittel aus, falls Preise und Reisezeiten identisch sind. In den schweizer Daten findet sich kein Anhaltspunkt, dass die Personen das Auto grundsätzlich oder mit steigendem Einkommen vorziehen. Das Modell wurde erneut ohne alternativenspezifische Konstanten geschätzt. Durch Einsetzen der geschätzten Werte und Umformung ergibt sich das folgende Modell:⁴⁹

$$U_{i,car} = 1.31 \cdot \left(\ln(y_i) - \frac{c_{i,car}}{y_i} \right) - 2.83 \cdot t_{i,car} = 1.31 \cdot \ln(y_i) - \frac{1.31}{y_i} \cdot c_{i,car} - 2.83 \cdot t_{i,car} \quad (8.9)$$

$$U_{i,pt} = 1.31 \cdot \left(\ln(y_i) - \frac{c_{i,pt}}{y_i} \right) - 1.86 \cdot t_{i,pt} = 1.31 \cdot \ln(y_i) - \frac{1.31}{y_i} \cdot c_{i,pt} - 1.86 \cdot t_{i,car} \quad (8.10)$$

⁴⁸ Als Arbeitspunkt der linearen Approximation wird das verfügbare Einkommen pro Fahrt y_i angenommen, die Kosten c_i sollen eine kleine Abweichung um den Arbeitspunkt darstellen. Das Restglied der Taylorentwicklung wird hier und im weiteren Verlauf ignoriert.

⁴⁹ Angepasstes $\rho^2=0.112$ bei dem Modell ohne alternativenspezifische Konstanten.

8.2.2 Quadratische Approximation des Logarithmus

Ähnlich der linearen Approximation, lässt sich der Logarithmus auch durch ein Polynom zweiten Grades ersetzen. Insgesamt gilt, dass sich die Approximation mit steigendem Grad des Polynoms im Arbeitspunkt immer mehr der tatsächlichen Funktion annähert. Allerdings weicht sie bei größerer Entfernung vom Arbeitspunkt immer weiter ab. Je näher die Kosten c_i also am verfügbaren Einkommen pro Fahrt y_i liegen, umso ungenauer wird die Approximation mit Polynomen höheren Grades. Die Taylorapproximation des einkommens- und kostenabhängigen Terms durch ein Polynom zweiten Grades ohne Restglied stellt sich demnach dar als:

$$\begin{aligned} \ln(y_i - c_i) &\approx \ln(y_i) - c_i \cdot \frac{\partial \ln(y_i)}{\partial y_i} + \frac{c_i^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 \ln(y_i)}{\partial^2 y_i} \\ &\approx \ln(y_i) - \frac{c_i}{y_i} - \frac{c_i^2}{2y_i^2} \end{aligned} \quad (8.11)$$

Setzt man dies wiederum in die Gleichungen (8.3) und (8.4) ein erhält man ein Modell, in dem der logarithmische Ausdruck $\ln(y_i - c_i)$ durch ein Polynom zweiten Grades approximiert wurde.⁵⁰

$$U_{i,car} = \hat{\beta}_{cost}^* \cdot \left(\ln(y_i) - \frac{c_{i,car}}{y_i} - \frac{c_{i,car}^2}{2y_i^2} \right) + \hat{\beta}_{tt_car} \cdot t_{i,car} \quad (8.12)$$

$$U_{i,pt} = \hat{\beta}_0^* + \hat{\beta}_{inc}^* \ln(y_i) + \hat{\beta}_{cost}^* \cdot \left(\ln(y_i) - \frac{c_{i,pt}}{y_i} - \frac{c_{i,pt}^2}{2y_i^2} \right) + \hat{\beta}_{tt_pt} \cdot t_{i,pt} \quad (8.13)$$

Wie an der Kennzeichnung (*) zu erkennen, konnte auch hier nicht ausgeschlossen werden, dass die alternativenspezifischen Verhaltensparameter $\hat{\beta}_0$ und $\hat{\beta}_{inc}$ signifikant von Null verschieden sind. Daraus kann erneut geschlossen werden, dass sich aus den Daten keinerlei grundsätzliche oder einkommensabhängige Präferenzen für eines der beiden Verkehrsmittel ergeben. Da zudem auch der Verhaltensparameter $\hat{\beta}_{cost}$ vor dem einkommensabhängigen Term sich ebenfalls nicht als signifikant unterschiedlich zu Null ergibt, würde dieser wie die beiden vorher genannten aus dem Modell entfernt werden. Damit würde lediglich die Reisezeit als relevanter Einflussfaktor bei der Auswahl von Tagesplänen übrig bleiben und die sinnvolle Erweiterung um monetäre Einflussfaktoren aus Kapitel 5 wäre durch die Hinzunahme einer Einkommensabhängigkeit rückgängig gemacht worden. Dieses Ergebnis ist als zweifelhaft zu bewerten. Deshalb wird die quadratische

⁵⁰ Angepasstes $\rho^2=0.105$.

Approximation nicht als Grundlage für weitere Simulationen verwendet. Denn dafür müssten die Ursachen dieser Ergebnisse noch deutlich weiter untersucht werden. Außerdem scheint die lineare Approximation einen hinreichend guten Ausgangspunkt für eine Auswertung der ersten einkommensabhängigen Simulationen zu sein.

8.2.3 Überblick der einkommensabhängigen MATSim-Nutzenfunktionen

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine analoge Formulierung der Nutzenfunktionen zu Franklin (2006) aufgrund der Datenstruktur nicht möglich ist. Des Weiteren rechtfertigen die Schätzungen keine Verwendung einer quadratischen Approximation des natürlichen Logarithmus. Somit wird das folgende Testszenario auf Basis der linearen Approximation durchgeführt. Auch zukünftige, darauf aufbauende Simulationen des großräumigen Szenarios für Zürich sollten zunächst diese funktionale Form verwenden. Aus Abschnitt 8.2.1 und unter Analogie zur in Abschnitt 5.2 erläuterten Überführung der geschätzten Parameter in die MATSim-Nutzenfunktionen ergibt sich das folgende einkommensabhängige Modell zur Beschreibung der Präferenzen der Agenten:

$$U_{i,car} = 1.31 \cdot \ln(y_i) - \frac{1.31}{y_i \cdot CHF} \cdot 0.12 \frac{CHF}{km} \cdot l_{i,leg} + \frac{2.83}{h} \cdot t_i^* \cdot \ln\left(\frac{t_{i,perf}}{t_0}\right) - \frac{1.52}{h} \cdot t_{late} \quad (8.14)$$

$$U_{i,pt} = + \frac{0.97}{h} \cdot t_{i,pt} + 1.31 \cdot \ln(y_i) - \frac{1.31}{y_i \cdot CHF} \cdot 0.28 \frac{CHF}{km} \cdot l_{i,leg} + \frac{2.83}{h} \cdot t_i^* \cdot \ln\left(\frac{t_{i,perf}}{t_0}\right) - \frac{1.52}{h} \cdot t_{late} \quad (8.15)$$

$\ln(y_i)$ wird im Weiteren als Basisnutzen aus Einkommen interpretiert, wohingegen $\frac{1.31}{\ln(y_i)} \cdot distance_cost$ als kurzfristige Nutzenänderung durch Mobilitätskosten definiert wird.

Der Verhaltensparameter für zu spätes Eintreffen am Aktivitätenort ist analog zu Abschnitt 5.2.2 auf diese Schätzung reskaliert. Dieser könnte nun ebenfalls als einkommensabhängig betrachtet werden, aus Vereinfachungsgründen wurde er allerdings nur für das durchschnittliche Einkommen pro Fahrt der befragten Personen berechnet. Dieses beträgt 49.15 CHF.⁵¹

⁵¹ Für zukünftige großräumige Simulationen sollte aus den in Abschnitt 5.2.2 erläuterten Gründen auf diese Bestrafung verzichtet werden.

9 Simulation eines Testszenarios mit Einkommensabhängigkeit

In diesem Kapitel soll ein Testszenario simuliert werden, bei dem die individuellen Nutzen von Mobilität nicht nur von der Reisezeit und den Kosten der Fahrten abhängen, sondern auch vom verfügbaren Einkommen der betrachteten Personen. Dafür wird das Testnetzwerk aus Kapitel 6 herangezogen. Neben einem **Vergleichsfall** mit bis auf die Nutzenfunktionen gleichen Rahmenbedingungen wird ein fiktiver **Maßnahmenfall** konstruiert, in dem der öffentliche Verkehr beschleunigt und zudem verteuert wird. Anhand eines Vergleichs der Ergebnisse können die individuellen Nutzenänderungen aufgrund der Maßnahme dargestellt werden. Weiterhin wird eine erste Idee für ein Kompensationsschema abgeleitet, durch das die gesellschaftliche Akzeptanz deutlich erhöht werden könnte.

9.1 Modellkonfiguration

Das Straßennetzwerk für diesen Test wurde identisch aus Abschnitt 6.1 übernommen. Es haben 2000 Agenten die Wahl zwischen Auto und öffentlichem Verkehr, um morgens zu ihrem Arbeitsort zu gelangen und am Abend zu ihrem Wohnort zurückzufahren. Neben der Implementierung der einkommensabhängigen Nutzenfunktionen aus Abschnitt 8.2.3 in MATSim, muss zusätzlich noch eine plausible Verteilung der Einkommen auf die einzelnen Personen durchgeführt werden.

9.1.1 Generierung einer fiktiven Bevölkerung mit realer Einkommensverteilung

Für die Generierung der realen Einkommensverteilung werden Daten des Kantons Zürich herangezogen, um später - allerdings nicht mehr im Rahmen dieser Arbeit - eine ähnliche Szenariogestaltung für großräumige Analysen zu ermöglichen. Die Lorenzkurve des Kantons aus der Bundessteuerstatistik 2006 stellt die Ausgangsbasis der Einkommensverteilung dar (Statistisches Amt des Kantons ZH, 2009). Wie aus Abbildung 15 entnommen werden kann, beschreibt die Lorenzkurve (dort in blau dargestellt) den aggregierten prozentualen Anteil eines Prozentsatzes der Bevölkerung am Gesamteinkommen. Es kann bspw. abgelesen werden, dass die 80 % der Steuerpflichtigen mit dem niedrigsten Einkommen zusammen etwa die Hälfte des Gesamteinkommens erzielen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die 20 % der Meistverdienenden zusammen ebenfalls über 50 % des Gesamteinkommens verfügen. Um nun eine stetige Verteilung des Einkommens berechnen zu können, wurde die Lorenzkurve mit einer Polynomregression

dritten Grades approximiert. Diese in Abbildung 15 schwarz dargestellte Kurve hat demnach folgende funktionale Form:

$$y(x) = 0.9916x^3 - 0.2398x^2 + 0.2056x \quad (8.16)$$

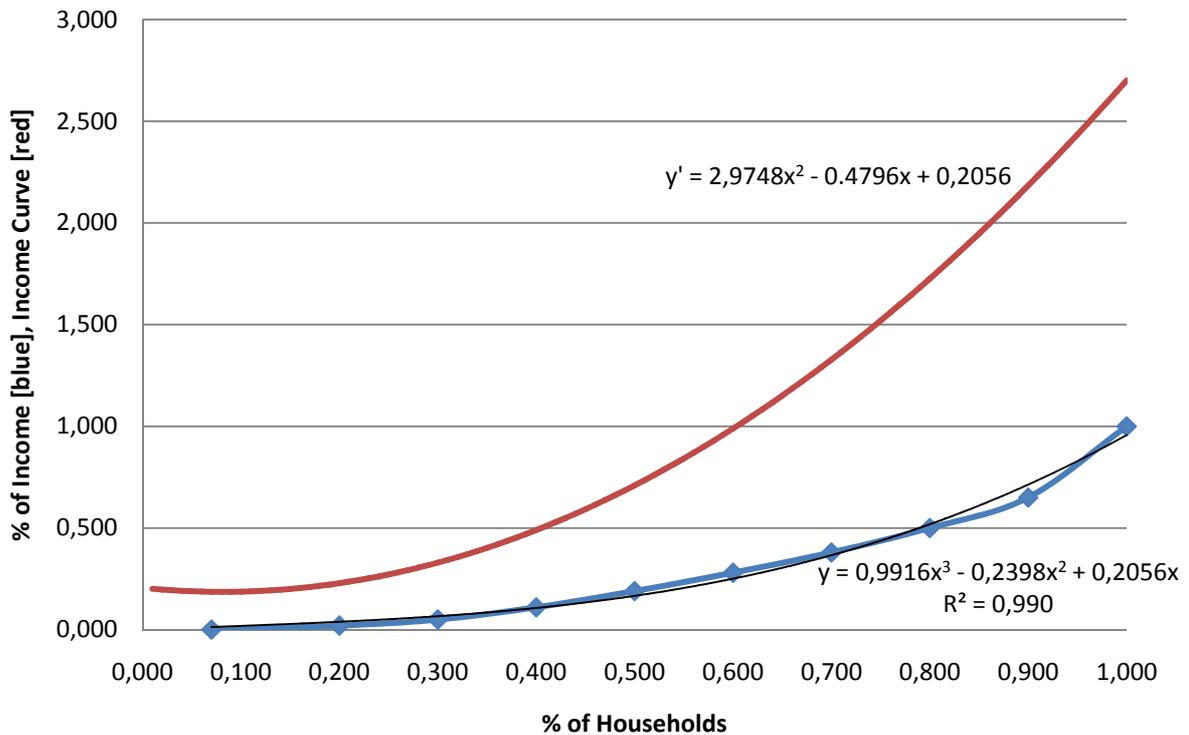


Abbildung 15: Lorenzkurve des Kantons Zürich [blau], Approximation durch eine Polynomfunktion [schwarz] und Einkommenskurve [rot].⁵²

Die unabhängige Variable x stellt den aggregierten prozentualen Anteil der Personen an der Gesamtbevölkerung dar, wobei diese nach Höhe des Einkommens sortiert ist. Die abhängige Variable y steht für den prozentualen aggregierten Anteil dieser Personen am Gesamteinkommen. Um von dieser Verteilungsfunktion auf ein individuelles Einkommen schließen zu können muss zunächst die Einkommensfunktion als Ableitung der Lorenzkurve gebildet werden (Kämpke, 2008, S. 2):

$$y'(x) = 2.9748x^2 - 0.4796x + 0.2056 \quad (8.17)$$

⁵² Quelle: Eigene Darstellung.

Diese in Abbildung 15 rot dargestellte Kurve zeigt für alle Personen x ihr relatives Einkommen im Bezug auf das Medianeinkommen an. Multipliziert man also für alle Personen den jeweiligen Wert auf der Einkommenskurve mit dem Medianjahreseinkommen, so erhält man für die Personen ihr individuelles Jahreseinkommen. Augenscheinlich sind die Personen entlang der x - Achse gleich verteilt. Jedes Quartil beinhaltet bspw. genau 25 % der Gesamtbevölkerung. Somit kann durch die 2000-fache Ziehung einer Zufallszahl zwischen 0 und 1, der Zuordnung eines Wertes auf der Einkommensfunktion, der anschließend mit dem Medianeinkommen multipliziert wird, eine fiktive Bevölkerung erzeugt werden, deren Einkommensverteilung der im Kanton Zürich folgt. Der Wert des Medianeinkommens wurde ebenfalls vom Statistischen Amt des Kantons ZH (2009) übernommen und beträgt 46 300 CHF.

9.1.2 Entwurf des Maßnahmenfalls

Die geplante Verkehrsmaßnahme sollte eine Erhöhung der Preise des öffentlichen Verkehrs beinhalten, durch die eine Beschleunigung desselben realisiert werden könnte. In der Literatur finden sich viele Untersuchungen über Preis- und Fahrzeitelastizitäten der ÖV-Nachfrage. Für eine Zusammenstellung mehrerer Studien vgl. Cervero (1990). Aus Vereinfachungsgründen wird häufig die Simpson-Curtin-Regel herangezogen, nach der für jedes Prozent, um das die Preise des ÖV erhöht werden, die Nachfrage um 0.33 % zurückgeht (Curtin, 1968). Cervero (1990) kommt zu dem Ergebnis, dass die Fahrzeitelastizität der Nachfrage in etwa doppelt so hoch ist wie die Preiselastizität. Demnach würde eine einprozentige Fahrzeiterhöhung die Nachfrage um 0.66 % zurückgehen lassen. Für den Maßnahmenfall des Testszenarios soll diese Abschätzung ausreichen. Die Reisezeit im öffentlichen Verkehr wird also relativ zum Vergleichsfall um 10 % gesenkt, während die Preise um 20 % angehoben werden. Die Abschätzung von Cervero (1990) würde also bestätigt, wenn die Nachfrage nach dem ÖV in etwa konstant bleibt. Es sei aber angemerkt, dass Preis- und Reisezeitelastizitäten in der Realität i. d. R. von vielen Faktoren abhängen. So reagieren die Nutzer meist sensitiver auf Preiserhöhungen als auf Preissenkungen. Zudem spielt der absolute Betrag des Preisniveaus eine entscheidende Rolle.

Im folgenden Vergleich zwischen Maßnahmen- und Vergleichsfall wird zudem angenommen, dass es aufgrund der Maßnahme zu keiner Nachfrageanpassung kommt. D. h. es werden keine Fahrten unterlassen oder neuer Verkehr induziert. Die Nachfrage kann sich nur in der Wahl des Verkehrsmittels und in der Abfahrtszeit vom Aktivitätenort anpassen, was ggf. zu

einer Änderung des Nutzenniveaus führt. Tabelle 9 stellt die wichtigsten in den Simulationen verwendeten Parameter für den Maßnahmen- und den Vergleichsfall zusammen.

Parameter	Maßnahmenfall	Vergleichsfall
β_{perf}	+2.83 [1/h]	+2.83 [1/h]
β_{tt_car}	+0.00 [1/h]	+0.00 [1/h]
β_{tt_pt}	+0.97 [1/h]	+0.97 [1/h]
β_{late}	-1.52 [1/h]	-1.52 [1/h]
β_{cost_car}	-1.31 / y_i [1/CHF]	-1.31 / y_i [1/CHF]
Distanzkosten car	+0.12 [CHF/km]	+0.12 [CHF/km]
β_{fare_pt}	-1.31 / y_i [1/CHF]	-1.31 / y_i [1/CHF]
Distanzkosten pt	+0.336 [CHF/km]	+0.28 [CHF/km]
$\frac{t_{freeSpeed_pt}}{t_{freeSpeed_car}}$	1.8	2
t_h^*	12.00 [h]	12.00 [h]
t_w^*	08.00 [h]	08.00 [h]
Beginn der Arbeitszeit	Genau 07:00 Uhr	Genau 07:00 Uhr
Ende der Arbeitszeit	Spätestens 18:00 Uhr	Spätestens 18:00 Uhr
γ	2	2

Tabelle 9: Vergleich der verwendeten Verhaltensparameter: Maßnahmenfall und Vergleichsfall.⁵³

⁵³ Quelle: Eigene Darstellung.

9.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen von Maßnahmen- und Vergleichsfall werden zunächst in Abschnitt 9.2.1 auf ihre Plausibilität untersucht. In Abschnitt 9.2.2 sind dann individuelle Wohlfahrtsveränderungen dargestellt und es wird eine erste Möglichkeit einer monetären Kompensation aufgezeigt, die mit einer derartigen Maßnahme einhergehen könnte.

9.2.1 Plausibilitätsprüfung

Als erstes Ergebnis ist festzuhalten, dass sich der Modal Split zwischen den betrachteten Verkehrsmitteln so gut wie nicht ändert. Fahren im Vergleichsfall 61.45 % der Personen mit dem ÖV, so sind es im Maßnahmenfall 61.70 %. Dies bestätigt die in Abschnitt 9.1 erwähnte Simpson-Curtin-Regel, nach der die Hypothese aufgestellt worden war, dass die Verkehrsnachfrage sich unter den gewählten Parametern des Maßnahmenfalls nicht ändern würde. Bezogen auf das Testszenario aus Abschnitt 6.2.2, wo keine Einkommensabhängigkeit der Nutzenfunktion betrachtet wurde, entspricht dies etwa 6 % mehr Personen im ÖV als Folge der Verwendung einer einkommensabhängigen Nutzenfunktion. Wie aus Abbildung 16 zu entnehmen, können die Nutzer des öffentlichen Verkehrs im Maßnahmenfall etwas später losfahren als im Vergleichsfall. Der Grund liegt in der angenommenen Beschleunigung des ÖV um 10 %.

Für den Autoverkehr ist festzuhalten, dass die Vormittagsspitze um etwa 20 % von etwa 520 auf 420 Abfahrten zurückgeht. Dafür ist sie nun etwas breiter ausgebildet, sie entzerrt sich also ein wenig wie in Abbildung 17 zu erkennen. In der Nachmittagsspitze sind sowohl beim Auto- als auch beim öffentlichen Verkehr keine Besonderheiten zu beobachten.

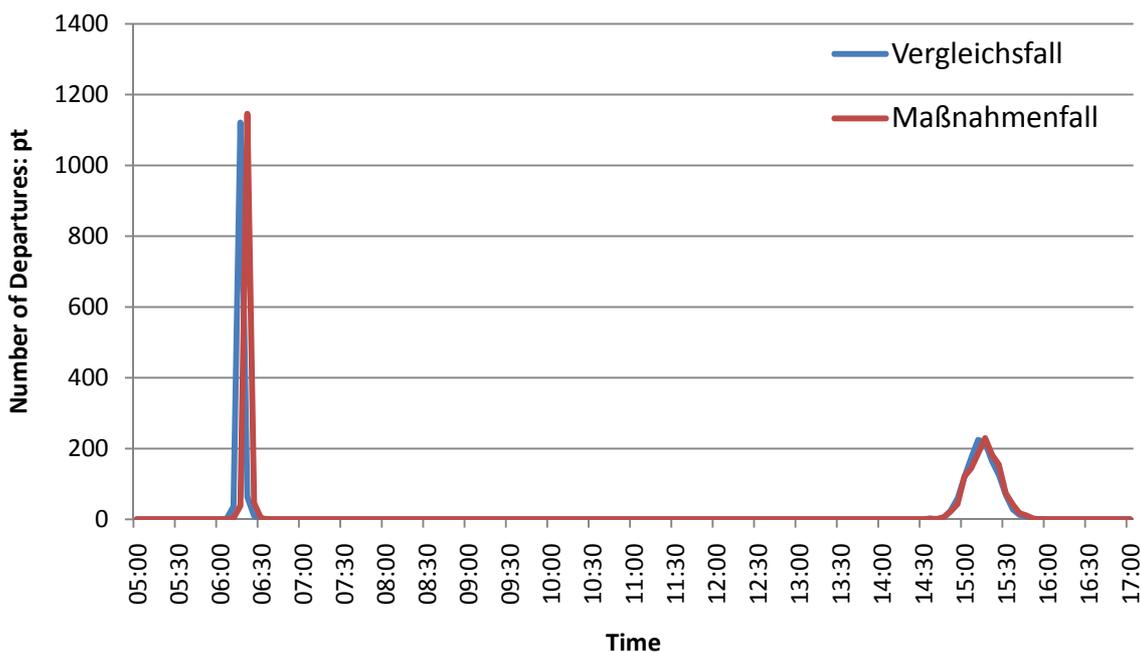


Abbildung 16: Maßnahmen- und Vergleichsfall: Anzahl der Abfahrten ÖV.
Versobene Vormittagsspitze aufgrund der ÖV-Beschleunigung.⁵⁴

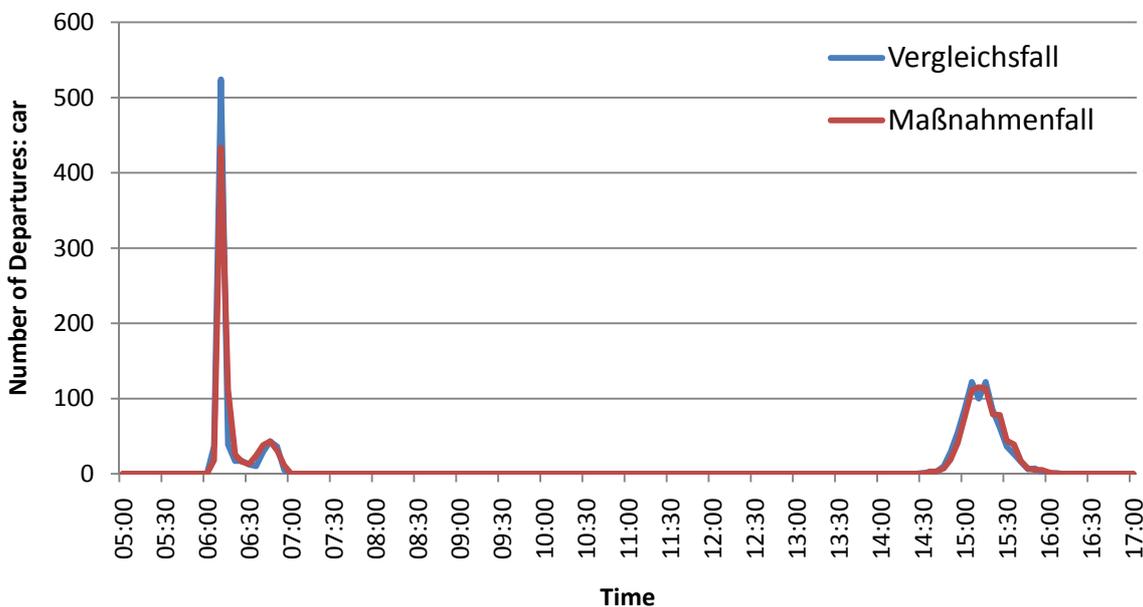


Abbildung 17: Maßnahmen- und Vergleichsfall: Anzahl der Abfahrten Auto.
Entzerrung der Vormittagsspitze.⁵⁵

⁵⁴ Quelle: Eigene Darstellung.

9.2.2 Veränderung der individuellen Wohlfahrt und Kompensation

Ziel dieses Abschnittes ist zum einen die Darstellung der individuellen Wohlfahrtsveränderungen entlang der Einkommensverteilung, zum anderen soll die gesamtwirtschaftliche Vorteilhaftigkeit der Maßnahme beurteilt werden. Des Weiteren ist die Kompensationsvariation für alle Individuen zu bestimmen, um einen ersten Vorschlag einer Kompensationsmaßnahme zu unterbreiten, die mit dem Projekt einhergehen könnte.

Abbildung 18 stellt die individuellen Nutzenänderungen entlang der Einkommensverteilung dar. Diese berechnen sich aus den personenbezogenen Nutzen der Tagespläne des Maßnahmenfalls abzüglich derer aus der Simulation des Vergleichsfalls.

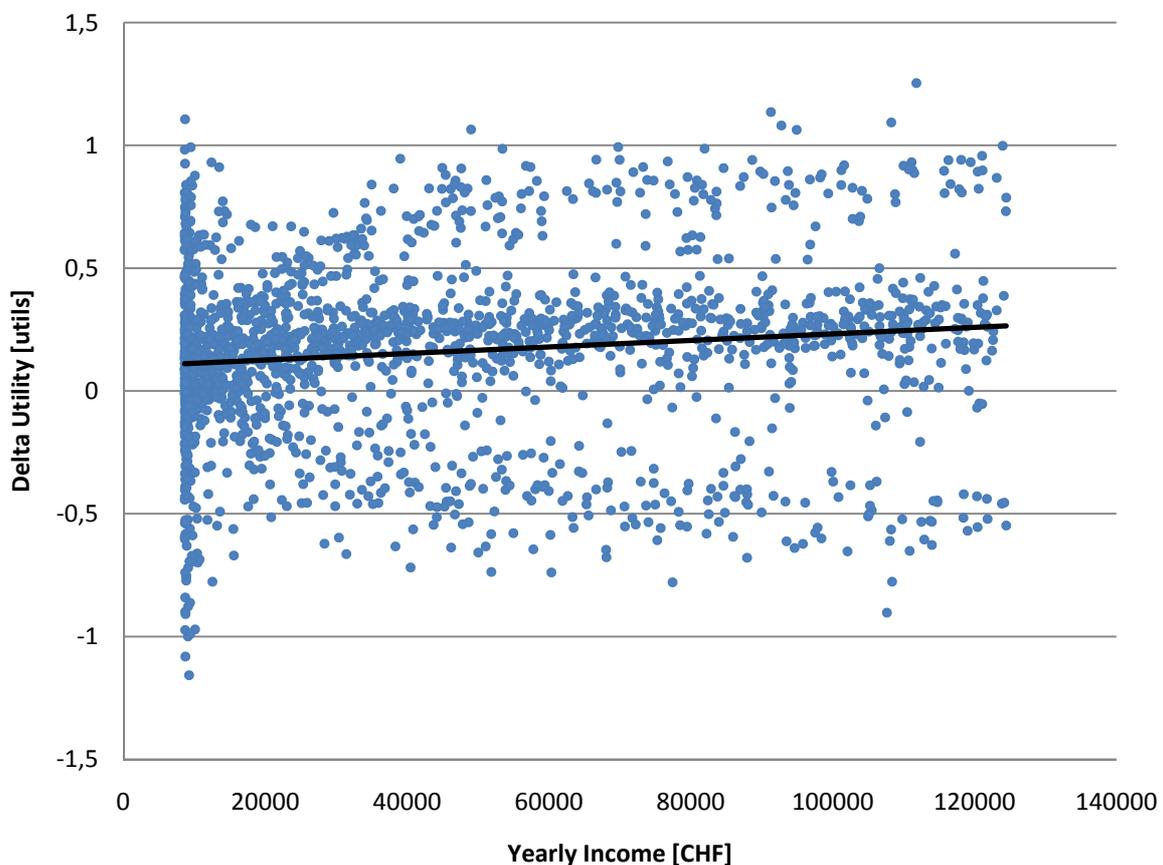


Abbildung 18: Individuelle Nutzenänderungen durch die Beschleunigung und Verteuerung des öffentlichen Verkehrs.⁵⁶

⁵⁵ Quelle: Eigene Darstellung.

⁵⁶ Quelle: Eigene Darstellung.

Es fällt auf, dass die Nutzenunterschiede relativ weit streuen und zunächst kein direkter Zusammenhang zur Höhe des Einkommens abgeleitet werden kann. Da der Value of Time in den verwendeten Nutzenfunktionen aber mit steigendem Einkommen zunimmt, müssten – bei gleichbleibendem Modal Split – höher Verdienende tendenziell mehr von der ÖV-Beschleunigung profitieren als geringer Verdienende. Ein derartiger Zusammenhang kann mithilfe einer Regressionsgerade auch bestätigt werden, welche in Abbildung 18 schwarz eingezeichnet ist. Diese Gerade lässt noch einen weiteren Schluss zu: die Maßnahme, den öffentlichen Verkehr um 10 % zu beschleunigen und gleichzeitig um 20 % zu verteuern, bewirkt auf allen Einkommensniveaus im Durchschnitt einen Nutzenzuwachs. Ist mit den zusätzlich eingenommenen Mitteln aus der Verteuerung der ÖV-Fahrpreise die Beschleunigung finanzierbar, so steigert diese Maßnahme auf jeden Fall die soziale Wohlfahrt und ist damit ökonomisch sinnvoll.

Fraglich ist nun, wie diese Nutzenunterschiede im Rahmen einer möglichen Kompensation zu bewerten sind. Die Kompensationsvariation beschreibt wie in Abschnitt 3.2.2 erläutert eine Kompensation, welche die Individuen auf dasselbe Nutzenniveau bringt, auf dem sie sich vor der Maßnahme befunden haben. Sie ist also für diejenigen Individuen positiv, welche einen Nutzenverlust hinnehmen mussten, und negativ für diejenigen, welche einen Nutzenzuwachs zu verzeichnen haben. Legt man die Nutzenfunktionen aus den Gleichungen (8.14) und (8.15) zugrunde, könnten die Individuen beispielsweise über eine Veränderung des Basisnutzens aus ihrem Einkommen kompensiert werden.⁵⁷ Diese Veränderung des Einkommens c müsste dann genau so gewählt werden, dass gilt:

$$1.31 \cdot \ln(y_i) + \Delta U_i = 1.31 \cdot \ln(y_i + c) \quad ; \quad c \in \mathbb{R} \quad (8.18)$$

Dabei beschreibt ΔU_i den individuellen Nutzenunterschied durch die Maßnahme, welcher in Abbildung 18 geplottet wurde. Berechnet man nun für alle 2000 Individuen die nötige Kompensation, so erhält man Abbildung 19. Im Vergleich der beiden Abbildungen fällt auf, dass die Nutzenunterschiede zwar für alle Einkommensniveaus ähnlich weit schwanken, bei der Berechnung der Kompensation aber vor allem die hohen Einkommen ins Auge fallen. Der Grund dafür ist die im Modell enthaltene Annahme über den abnehmenden Grenznutzen von Geld. Bei Personen mit geringem Einkommen reicht eine kleine Änderung des

⁵⁷ Die kurzfristige Nutzenänderung durch die Mobilitätskosten aus den Gleichungen (8.14) und (8.15) wird in dieser Betrachtung nicht mit einbezogen. Es wird also davon ausgegangen, dass die Änderung des Einkommens durch eine Kompensation keine Nutzenänderung durch den fahrtkostenabhängigen Term hervorruft.

Einkommens bereits aus, um große Nutzenänderungen hervorzurufen. Personen mit hohem Einkommen müssen im Gegensatz dazu eine relativ dazu größere Einkommenänderung wahrnehmen, damit sich ihr empfundener Nutzen merklich ändert.

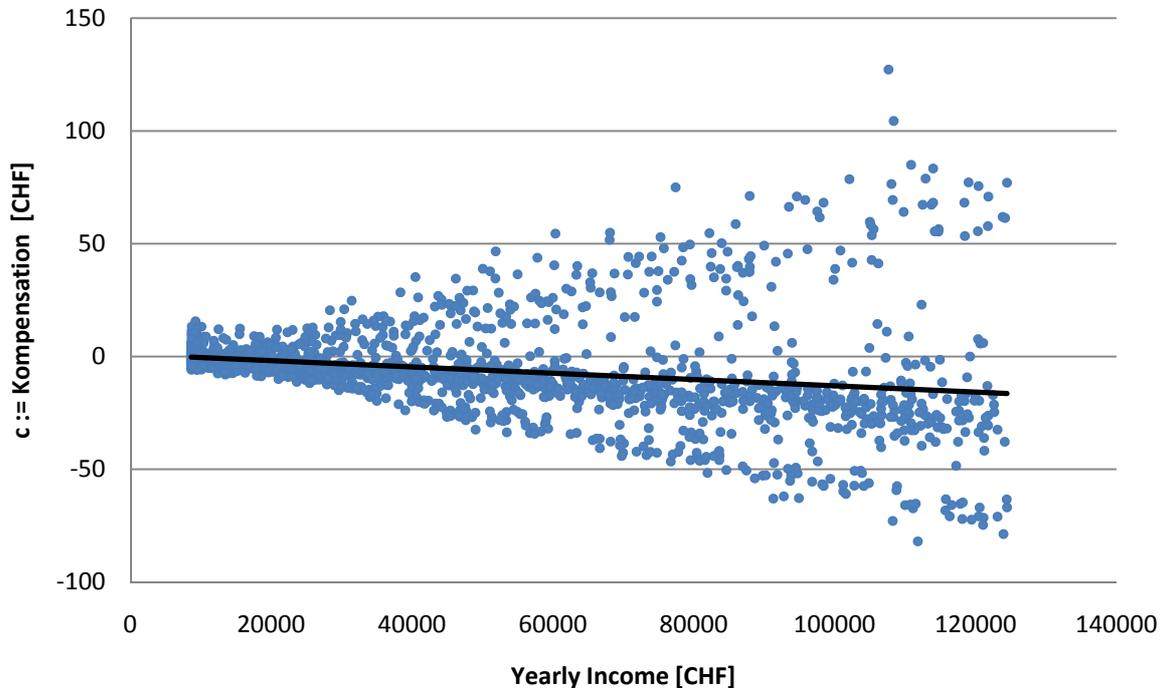


Abbildung 19: Nötige monetäre Kompensation zur Erhaltung des individuellen Nutzenniveaus.⁵⁸

Die aggregierte Betrachtung ergibt, dass man von den betroffenen Personen noch zusätzlich ca. 10 600 CHF einnehmen könnte. Die Kompensationen hätten bei individueller Bepreisung bereits als Transferzahlungen stattgefunden und müssten nicht mehr aus dieser Summe geleistet werden. Dies bestätigt die aus Abbildung 18 zu ziehende Schlussfolgerung, nach der das Projekt als gesamtwirtschaftlich vorteilhaft eingestuft wurde. In der Realität ist es allerdings nicht möglich, eine vollständige Preisdifferenzierung durchzuführen, weshalb eine Kompensation mit möglichst wenigen und leicht zu erfassenden Charakteristika der Personen auskommen sollte. Die genaue Untersuchung verschiedener Ausgestaltungsmöglichkeiten kann allerdings nicht mehr im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden. Eine Möglichkeit bietet bspw. die Regressionsgerade aus Abbildung 19. Mit zunehmendem Einkommen würden die Personen proportional mehr belastet werden. Das

⁵⁸ Quelle: Eigene Darstellung.

Hauptziel sollte dabei das Erreichen einer gesellschaftlichen Mehrheit für die Maßnahme sein, welche so die politische Umsetzbarkeit erleichtert. In weiteren Arbeiten könnten mit dieser Herangehensweise verschiedene Kompensationsdesigns miteinander auf die zu erwartende gesellschaftliche Akzeptanz verglichen werden. Dies wäre dann nicht mehr nur für kleine Projekte wie die von Franklin (2006) betrachtete mautfinanzierte Brücke anwendbar, sondern auch für große Ballungsräume, die in MATSim simuliert werden können.

10 Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zum einen Multiagentensimulationen durchgeführt, die auf realen Befragungsdaten aus der Schweiz basieren. Zum anderen wurde untersucht, wie die gesellschaftliche Akzeptanz einer Verkehrsmaßnahme durch eine damit einhergehende Kompensation gesteigert werden könnte.

Zur Durchführung der Simulationen wurden verkehrsrelevante Verhaltensparameter geschätzt, welche die Auswahl zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln beeinflussen. Diese Einflussfaktoren wurden aus realen Befragungsdaten einer Umfrage in der Schweiz gewonnen und sollten in MATSim zur stochastischen Auswahl zwischen verschiedenen Tagesplänen verwendet werden. So konnten, neben dem Einfluss der Reisezeit, nun auch monetäre Größen wie Treibstoffkosten oder Fahrpreis in MATSim-Simulationen betrachtet werden. Aufgrund der Datenlage war es nicht möglich, die Opportunitätskosten der Zeit und den empfundenen negativen Nutzen des Reisens getrennt zu ermitteln. Dies führte im Zuge der Überführung der geschätzten Parameter in die von MATSim verwendeten Nutzenfunktionen zu der Notwendigkeit, eine weitreichende Annahme über die Aufteilung dieser beiden Einflussfaktoren zu treffen: durch das Reisen im Auto entgeht den betrachteten Personen lediglich Zeit zum Ausüben einer geplanten Aktivität, die im Auto verbrachte Zeit wird nicht zusätzlich negativ bewertet. Dies impliziert, dass die Reisezeit in einem anderen Verkehrsmittel nur relativ zu der im Auto positiv bzw. negativ bewertet wird, je nachdem ob das Verkehrsmittel mehr bzw. weniger attraktiv als das Auto empfunden wird.

Die sich daraus bei der Analyse des Testszenarios ergebenden Nachteile der erweiterten Nutzenfunktionen konnten in der großräumigen Simulation allerdings nicht bestätigt werden. Die Ergebnisse des Testszenarios in Kapitel 6 zeigen zwar an, dass durch diese Annahme im Vergleich zu den bisherigen Modellen tendenziell mehr Stau erzeugt wird: die Straßenverkehrsnutzer reagieren bei ihrem Weg zur Arbeit auf die zu erwartende Staumenge mit deutlich geringeren Abfahrtszeitanpassungen. Für die großräumige Simulation des Tagesverkehrs in Zürich konnte allerdings gezeigt werden, dass die Verwendung der erweiterten Nutzenfunktionen insgesamt ähnlich gute Ergebnisse liefert wie die Auswertungen von Rieser / Grether / Nagel (2008). Insofern können diese Nutzenfunktionen auch für zukünftige Simulationen herangezogen werden. Sie haben den Vorteil, dass Vorhersagen über Verkehrszustände nach einer geplanten Verkehrsmaßnahme nun auf reelle Daten gestützt und damit aussagekräftiger sind. Dennoch sollte in Zukunft versucht werden, die Opportunitätskosten der Zeit und den empfundenen negativen Nutzen

des Reisens getrennt aus Befragungsdaten zu ermitteln, um so stabilere Parameter zu erhalten.

Des Weiteren bleibt festzuhalten, dass durch die Schätzungen der Verhaltensparameter nur ein geringer Teil der Verhaltensentscheidungen erklärt werden konnte (ρ^2 -Werte zwischen 0.10 und 0.14). Dieses Problem entsteht durch das Weglassen entscheidungsrelevanter Einflussfaktoren bei der Schätzung. Oft sind Parameter wie bspw. die Kosten für das Parken an einem Aktivitätenort oder die Verfügbarkeit eines Autos Bestandteil der zugrunde liegenden Befragung. Sind diese von MATSim später in der Simulation nicht abbildbar, so dürfen sie bei der Schätzung auch nicht betrachtet werden. Dies wiederum legt nahe, dass zum einen mittels auf MATSim angepassten Befragungen deutlich robustere Parameter geschätzt werden könnten und zum anderen versucht werden sollte, MATSim um bisher noch nicht abbildbare Einflüsse zu erweitern. Dazu zählen insbesondere:

- PKW-Verfügbarkeit
- Realistische Fahrzeiten im öffentlichen Verkehr
- Realistische Preisstruktur und Kapazitätsbegrenzungen im öffentlichen Verkehr

Der zweite Schwerpunkt dieser Arbeit lag auf der Analyse von Akzeptanz- und Umsetzungsproblemen bei verkehrspolitischen Maßnahmen. Dabei wurden insbesondere die Vorteile von Multiagentensimulationen beleuchtet. Diese sind im Gegensatz zu handelsüblicher Verkehrsplanungssoftware in der Lage, Nutzenänderungen aufgrund von veränderten Reisezeiten oder Kostenschwankungen auf individueller Ebene darzustellen. Will man auf politischer Ebene erreichen, dass bspw. die Mehrheit der Bevölkerung eine geplante Verkehrsmaßnahme unterstützt, so müsste ggf. eine Kompensationsmaßnahme mit dem Projekt einhergehen, durch die ein Großteil der Bevölkerung eine Verbesserung ihrer Situation wahrnimmt. Zur Abbildung der Effekte einer monetären Kompensation wurden die MATSim-Nutzenfunktionen um das individuelle Einkommen erweitert. In Kapitel 9 konnte für das in dieser Arbeit verwendete Testszenario gezeigt werden, welche individuellen Wohlfahrtsveränderungen sich durch eine Beschleunigung und gleichzeitige Verteuerung des öffentlichen Verkehrs ergeben. Darauf aufbauend konnte eine erste mögliche Ausgestaltung einer monetären Kompensation entwickelt werden, durch welche die gesellschaftliche Akzeptanz gesteigert werden könnte. Diese ersten Ergebnisse zeigen bereits an, dass Multiagentensimulationen in Zukunft als innovatives Hilfsmittel die Arbeit von Planungsbehörden bei der Gestaltung von gesellschaftlich akzeptierten Verkehrsprojekten nachhaltig unterstützen können.

Literatur

Arnott, R. / de Palma, A. / Lindsey, R. (1990): Economics of a bottleneck, *Journal of Urban Economics*, 27(1), S. 111 – 130.

Balmer, M. / Rieser, M. / Meister, K. / Charypar, D. / Lefebvre, N. / Nagel, K. / Axhausen, K. W. (2008): MATSim-T: Architecture and simulation times, *Heureka'08 / Bazzan-Klügl-book*.

Bates, J. (1987): Measuring travel time values with a discrete choice model: A note. *The Economic Journal*, 97(386), S. 493 – 498.

Bates, J. (2006): Economic evaluation and transport Modelling: Theory and Practice, Resource Paper for the 10th IATBR Conference 2003, Luzern.

Beckers, T. / v. Hirschhausen, C. / Klatt, J. P. / Winter, M. (2007): Effiziente Verkehrspolitik für den Straßensektor in Ballungsräumen – Kapazitätsauslastung, Umweltschutz, Finanzierung; Abschlussbericht zum FoPS-Forschungsvorhaben 73.326/2004: „Instrumente zur nachhaltigen Sicherung der Verkehrsinfrastruktur in Städten und Ballungsräumen“ im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).

Ben-Akiva, M. E. / Lerman, S. R. (1985): *Discrete Choice Analysis: Theory and Application in Travel Demand*.

Ben-Akiva, M. E. / McFadden, D. / Gärling, T. / Gopinath, D. / Walker, J. / Bolduc, D. /

Bierlaire, M. (2003): BIOGEME: A free package for the estimation of discrete choice models, *Proceedings of the 3rd Swiss Transportation Research Conference*, Ascona, Switzerland.

Bierlaire, M. (2008): An introduction to BIOGEME Version 1.7, <http://biogeme.epfl.ch>, abgerufen am 15.12.2008

BMVBW – Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (2003): Die gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik zum Bundesverkehrswegeplan 2003, heute BMVBS (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung).

Börsch-Supan, A. / Delquié, P. / Larichev, O. / Morikawa, T. / Polydoropoulou, A. / Rao, V. (1999): Extended Framework for Modeling Choice Behaviour, *Marketing Letters*, 10(3), S. 187 – 203.

Camm, F. (1983): *Consumer Surplus, Demand Functions, and Policy Analysis*, Rand Corporation, Santa Monica.

- Charypar, D. / Nagel, K. (2005):** Generating complete all-day activity plans with genetic algorithms, *Transportation* 32(4), S. 369 – 397.
- Chen, Y. / Rieser, M. / Grether, D. / Nagel, K (2008):** Improving a large-scale agent-based simulation scenario. VSP Working Paper 08-15.
- Franklin, J. P. (2006):** The Distributional Effects of Transportation Policies: The Case of a Bridge Toll for Seattle, University of Washington.
- Gawron, C. (1998):** An iterative algorithm to determine the dynamic user equilibrium in a traffic simulation model, *International Journal of Modern Physics C*, 9(3), S. 393 – 407.
- Grether, D. (2007):** Transport Systems' Planning and Transport Telematics at a Quick Glance.
- Heckman, J. (1971):** Three Essays on Household Labor Supply and the Demand For Market Goods, Ph.D. Dissertation, Princeton University.
- Herriges, J. A. / Kling, C. L. (1999):** Nonlinear income effects in random utility models, *The Review of Economics and Statistics*, 81(1), S. 62 – 72.
- Hess, S. / Erath, A. / Axhausen, K. W. (2008):** Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit.
- Hicks, J. R. (1939):** The Foundations of Welfare Economics, *Economic Journal* 49(196), S. 696 – 712.
- Hicks, J. R. (1956):** A revision of demand theory, Oxford University Press, Oxford.
- Jaufmann, D. (1996):** Mobilität und Verkehr: Einstellungen der Bürger im Spiegel von Umfrageergebnissen in vergleichender sekundäranalytischer Perspektive, Endbericht des Internationalen Instituts für Empirische Sozialökonomie INIFES an das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Stadtbergen.
- Kaballo, W. (2000):** Analysis I, Spektrum Verlag, zweite Auflage.
- Kaldor, N. (1939):** Welfare Propositions in Economics and Interpersonal Comparisons of Utility, *Economic Journal* 49(145), S. 549 – 52.
- Kämpke, T. (2008):** The use of mean values vs. medians in inequality analysis, *Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung/n*.
- Kockelman, K. M. (2001):** A model for time- and budget-constrained activity demand analysis, *Transportation Research Part B: Methodological*, 35(3), S. 255 – 269.

- Lindsey, R. / Verhoef, E. (2000):** Traffic Congestion and Congestion Pricing; Tinbergen Institute Discussion Paper TI 2000-101/3.
- Luce, R. / Suppes, P (1965):** Preference, Utility and Subjective Probability, Handbook of Mathematical Psychology Vol. 3.
- Luk, J. / Chung, E. (1997):** Public acceptance and technologies for road pricing, ARRB Transport Research Ltd., Research Report No. 307, Vermont South.
- Marshall, A. (1920):** Principles of Economics, 8th edition, Macmillan, London.
- McFadden, D. (1974):** Conditional logit analysis of qualitative choice behavior, Frontiers in econometrics, S. 105 – 142.
- McFadden, D. (2000):** Disaggregate Behavioral Travel Demand's RUM Side: A 30-Year Retrospective.
- Mill, J. S. (1863):** Utilitarianism, Oxford University Press.
- Kickhöfer, B. (2007):** Der Einfluss der Struktur urbaner Straßennetze auf die Wirksamkeit von Road Pricing - Eine Analyse mit der Verkehrsmodellierungssoftware VISUM.
- Ortúzar, J. D. / Willumsen, L. G. (2001):** Modelling Transport; 3rd Edition, John Wiley & Sons, Chichester.
- Reinhold, T (2006):** Konzept zur integrierten Optimierung des Berliner Nahverkehrs, Öffentlicher Personennahverkehr, Springer Berlin Heidelberg.
- Rieser, M. / Grether, D. / Nagel, K. (2008):** Adding mode choice to a multi-agent transport simulation, TRB'09, VSP working paper 08-14.
- Schade, J. (1999):** Maßnahmen zur Veränderung von Mobilitätsverhalten und ihre Akzeptanz, Arbeitsbericht Nr. 147 der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Marita Nehring, Marcus Steierwald (Hrsg.), S. 43 – 64.
- SFSO (2006):** Ergebnisse des Mikrozensus 2005 zum Verkehr. Swiss Federal Statistical Office, Neuchatel.
- Statistisches Amt des Kantons Zürich (2009):** Internetpräsenz des Statistischen Amtes des Kantons Zürich, abgerufen am 25.05.2009 unter http://www.statistik.zh.ch/themenportal/themen/aktuell_detail.php?id=2752&tb=4&mt=0 und http://www.statistik.zh.ch/themenportal/themen/daten_detail.php?id=759.
- Small, K. A. / Rosen, H. S. (1981):** Applied welfare economics with discrete choice models, Econometrica, 49(1), S. 105 – 130.

Small, K. A. (1983): The incidence of congestion tolls on urban highways, *Journal of Urban Economics* 13, S. 90 – 111.

Thurstone, L. L. (1927): A Law of Comparative Judgment, *Psychological Review* 34, S. 273 – 286.

Train, K. E. (2003): *Discrete Choice Methods with Simulation*, Cambridge University Press, Cambridge.

Van Sundert (1986): *Verkehrspolitik*, WiSo-Kurzlehrbücher: Reihe Volkswirtschaft, Franz Vahlen, München.

Vickrey, W. S. (1969): Congestion theory and transport investment, *The American Economic Review*, 59(2), S. 251 – 260.

Vrtic, M. / Schüssler, N. / Erath, A. / Bürgle, M. / Axhausen, K. / Frejinger, E. / Stojanovic, J. / Bierlaire, M. / Rudel, R. / Scagnolari, S. / Maggi, R. (2007): Einbezug von Reisekosten bei der Modellierung des Mobilitätsverhaltens.

Anhang zur Diplomarbeit von Benjamin Kickhöfer (# 217671)

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Berlin, den 05.06.2009

Benjamin Kickhöfer