

Universität Stuttgart

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik

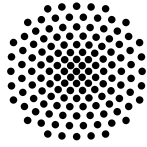
Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Friedrich

Qualität von Verkehrsnachfragemodellen

Eric Pestel

Veröffentlichungen aus dem
Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Heft 60 (April 2021)



Universität Stuttgart

Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik
Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Friedrich

Qualität von Verkehrsnachfragemodellen

Eric Pestel

Veröffentlichungen aus dem
Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Heft 60 (April 2021)

Herausgeber : Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Universität Stuttgart

Copyright : Das Copyright liegt beim Verfasser.

Eigenverlag und Vertrieb : Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Universität Stuttgart

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und
Verkehrsleittechnik
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

Hinweis / Note:

Diese Veröffentlichung ist auch als "Elektronische Dissertation" online unter **<http://elib.uni-stuttgart.de>** verfügbar und kann dort im PDF-Format heruntergeladen werden.

This paper is also published online as "Electronic Dissertation" at **<http://elib.uni-stuttgart.de>** and can be downloaded there as PDF file.

Qualität von Verkehrsnachfragemodellen

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität
Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Eric Pestel

aus Oelsnitz im Vogtland

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Wilko Manz

Tag der mündlichen Prüfung: 23. April 2021

Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik

Universität Stuttgart

2021

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter am Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik des Institutes für Straßen- und Verkehrswesen an der Universität Stuttgart. Im Folgenden möchte ich die Gelegenheit nutzen, mich zu bedanken.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich. Er hat mir die Möglichkeit gegeben, als akademischer Mitarbeiter an seinem Lehrstuhl zu arbeiten und diese Zeit mit einer Promotion abzuschließen. Seine Anmerkungen und Ratschläge haben wesentlich zu meiner eigenen Entwicklung und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Dafür bin ich ihm sehr dankbar.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wilko Manz möchte ich mich für die Übernahme der Rolle des Mitberichters und die wertvollen Hinweise, Anregungen und Optimierungen bedanken.

Darüber hinaus möchte ich den Mitgliedern des FGSV-Arbeitskreises 1.2.6. „Konzeption und Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen des Personenverkehrs“ für die vielen Diskussionen danken, die mein Verständnis der Verkehrsnachfragemodellierung erweitert und geschärft haben. Gleiches gilt für alle Projektpartner, insbesondere Robert Simon, Juliane Pillat und Christian Schiller, mit denen ich in den vergangenen fünf Jahren zusammenarbeiten durfte.

Auch meinen Lehrstuhlkollegen möchte ich danken: dafür, dass sie mir den Start im „fremden“ Stuttgart so einfach gemacht haben, für die vielen kleinen Gespräche, Ablenkungen, Kaffeepausen und Feierabendbiere, für die Hilfe untereinander und für die tollen Aktivitäten außerhalb des Lehrstuhls. Ich habe die fünf Jahre mit euch sehr genossen. Das gilt auch für Alice Lorenz, Manfred Wacker und Michael Veeck, weil ihr die wichtigen Aufgaben im Hintergrund erledigt, um uns Mitarbeitern den Rücken freizuhalten.

Meinen ganz besonderen Dank möchte ich an Alice Lorenz, Manfred Wacker, Emely Richter, Kevin Christof, Florian Schön, Anneke Heine und Luise Pestel richten: für die Korrekturen, kritischen Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge. Ihr habt diese Arbeit in so vielen Punkten besser gemacht.

Abschließend möchte ich meiner Frau Luise danken. Du bist für mich mit nach Stuttgart gegangen, hast mich stets unterstützt und du (zusammen mit unserer Tochter Charlotte) hast in den stressigen und nervenzehrenden Momenten meine Gedanken in andere Bahnen gelenkt und somit für die notwendige Distanz gesorgt.

Danke!

Eric Pestel

Dieser Dissertation liegen Teile der folgenden Forschungsarbeiten zugrunde:

- „Einflussgrößen auf die Qualität von makroskopischen Nachfragemodellen im Personenverkehr“ im Auftrag der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG, Förderkennzeichen FR 2666/3-1),
- „Qualitätssicherung von Verkehrsmodellen“ im Auftrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI, Förderkennzeichen 2015/001) und
- „Anforderungen an städtische Verkehrsnachfragemodelle“ im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI, Förderkennzeichen FE 70.919/2015).

Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	XI
Kurzfassung	XV
Abstract	XIX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Theorie der Verkehrsnachfragemodellierung	4
2.1 Variablen und Parameter	4
2.2 Diskrete Wahlmodelle	5
2.3 Modelle der Verkehrsplanung	7
2.4 Verkehrsnachfragemodelle	11
2.4.1 Typologien von Verkehrsnachfragemodellen	11
2.4.2 Modellbildung	15
2.5 Herausforderungen bei der Umsetzung der Modelltheorie	38
3 Abweichungen zwischen Modell und Realität	41
3.1 Begriffsdefinitionen	41
3.2 Erkenntnisse aus Ex-post-Analysen von Verkehrsnachfragemodellen der Praxis	44
3.3 Ursachen für Unsicherheiten und Abweichungen bei Verkehrsnachfragemodellen	49
3.3.1 Fehler im Analysefall	50
3.3.2 Fehler bei Prognoseannahmen	60
3.4 Methoden zur Bestimmung von Unsicherheiten	65
3.4.1 Qualitative Analysen	65
3.4.2 Quantitative Analysen	67
3.4.3 Darstellung der Unsicherheiten	92

3.5	Vorschläge zur Vermeidung und Kommunikation von Unsicherheiten in der Modellierung	93
4	Qualitätsmanagement von Verkehrsnachfragemodellen	100
4.1	Definitionen bezüglich Qualität	100
4.2	Allgemeine Anforderungen an Verkehrsnachfragemodelle	103
4.3	Qualitätsmanagementprozess	105
4.3.1	Verifizierung der Spezifikation und der Implementierung	106
4.3.2	Überprüfung der Eingangsdaten	107
4.3.3	Einstellen der Parameter	110
4.3.4	Kalibrierung	111
4.3.5	Validierung	112
4.3.6	Dokumentation	116
5	Einflussgrößen auf die Qualität von Verkehrsnachfragemodellen	118
5.1	Datengrundlage	118
5.2	Aufbau und Kalibrierung der makroskopischen Verkehrsnachfragemodelle	121
5.3	Untersuchungsmethodik	125
5.3.1	Untersuchte Einflussgrößen	125
5.3.2	Auswahl der Gütemaße	132
5.4	Auswertung	137
5.4.1	Einfluss der Modellannahmen zur Nachbildung von Entscheidungsprozessen der Verkehrsteilnehmenden	137
5.4.2	Einfluss der inhaltlichen Segmentierung der Nachfrage	150
5.4.3	Einfluss von Messfehlern bei Mobilitätsverhaltensdaten	155
5.4.4	Einfluss der Aggregation von Modellergebnissen	166
5.5	Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse	166
6	Fazit	169
7	Literatur	XXI
8	Begriffs- und Abkürzungsverzeichnis	XXXV
9	Formelverzeichnis	XLVII

10 Anhang	LIII
Anhang 1 Berechnung des Kennwertmodells der Verkehrserzeugung	LIV
Anhang 2 Verhaltenskodex für Spezialisten im Bereich der Simulation	LV
Anhang 3 Empfehlungen zur Überprüfung der Modellergebnisse	LVIII
Anhang 4 Dokumentation des Wegetagebuchgenerators für die Untersuchungen in Kapitel 5	LX
Anhang 5 Spezifikationen des Wegetagebuchgenerators für die Untersuchungen in Kapitel 5	LXXIII
Anhang 6 Modelltheorie des mikroskopischen Verkehrsnachfragemodells des Verbands Region Stuttgart	LXXIX
Anhang 7 Spezifikationen der Nachfragemodelle für die Untersuchungen in Kapitel 5	LXXXI
Anhang 8 Spezifikation des Zielwahlschätzalgorithmus für die Untersuchungen in Kapitel 5	CV
Anhang 9 Zusätzliche Abbildungen zu den Experimentauswertungen von Kapitel 5.3.2	CVII

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verkehrsrelevante Entscheidungen und ihre Abbildung in Verkehrsmodellen (Quelle: FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 17)).	8
Tabelle 2:	Einteilung mit acht Aktivitäten und 17 Aktivitätenpaaren mit ihrem jeweiligen Typ (Klammerwert) (Quelle: SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 163)).	19
Tabelle 3:	Mögliche Zuordnung von maßgebenden Personengruppen und Siedlungsstrukturgrößen zu Aktivitätenpaaren (Quelle: in Anlehnung an SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 150)).	20
Tabelle 4:	Abhängigkeiten der Moduswahl (Quelle: FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 82 f.)).	26
Tabelle 5:	Überblick über in Verkehrsnachfragemodellen abbildbare Entwicklungen und Maßnahmen (Quelle: Auszug aus FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 67)).	40
Tabelle 6:	Ort der Unsicherheit in Anlehnung an WALKER ET AL. (2003, S. 9 ff.) und MANZO ET AL. (2014, S. 22 ff.).	42
Tabelle 7:	Mögliche Ursachen für Prognoseunsicherheiten.	62
Tabelle 8:	Übersicht über die Ursachen für Unsicherheiten und Abweichungen bei Verkehrsnachfragemodellen.	64
Tabelle 9:	Übersicht über verschiedene Gütemaße zur Bewertung von Einzelwertpaaren (Quelle: in Anlehnung an FRIEDRICH ET AL. (2019a, S. 728)).	68
Tabelle 10:	Skalierungsfaktor f für verschiedene Kenngrößen (Quelle: in Anlehnung an FRIEDRICH ET AL. (2019a, S. 729)).	69
Tabelle 11:	Gegenüberstellung der Anzahl der Vergleichselemente bei Matrixrelationen und Dreiecksstrecken.	81
Tabelle 12:	Prognosewertanpassung in Abhängigkeit der Modellanwendung (in Anlehnung FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 214 ff.)).	89
Tabelle 13:	Aufbau einer Unsicherheitsmatrix (in Anlehnung an WALKER ET AL. (2003, S. 15) und MANZO ET AL. (2014, S. 22 ff.)).	93
Tabelle 14:	Begriffe der DIN EN ISO 9000:2015 (2015) bezogen auf die Qualität von Verkehrsnachfragemodellen (aktualisierte und erweiterte Auflistung auf Grundlage von FRIEDRICH (2010, S. 5)).	101
Tabelle 15:	Begriffe der DIN EN ISO 9000:2015 (2015) bezogen auf den Begriff Qualitätsmanagement.	103
Tabelle 16:	Tests zur Überprüfung des Modellverhaltens nach FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 209 ff.).	115

Tabelle 17:	Übersicht über die Spezifikationen, Erwartungen und Ergebnisse der Experimente.	167
Tabelle 18:	Empfehlungen zur Überprüfung der Modellergebnisse in Anlehnung an FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 186).	LIX
Tabelle 19:	Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (Vier-Stufen-Algorithmus).	LXXXI
Tabelle 20:	Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (EVA).	LXXXIII
Tabelle 21:	Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (VISEM).	LXXXIV
Tabelle 22:	Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (Vier-Stufen-Algorithmus).	LXXXV
Tabelle 23:	Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (EVA).	LXXXVII
Tabelle 24:	Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (VISEM).	LXXXIX
Tabelle 25:	Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (Vier-Stufen-Algorithmus).	XC
Tabelle 26:	Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (EVA).	XCII
Tabelle 27:	Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (VISEM).	XCIII
Tabelle 28:	Spezifikationen für das Nachfragemodell „Eine Personengruppe, ohne personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich“ (EVA).	XCV
Tabelle 29:	Spezifikationen für das Nachfragemodell „Eine Personengruppe, ohne personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich“ (VISEM).	XCVI
Tabelle 30:	Spezifikationen für das Nachfragemodell „Zwei Personengruppen, ohne personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich“ (EVA).	XCVIII
Tabelle 31:	Spezifikationen für das Nachfragemodell „Zwei Personengruppen, ohne personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich“ (VISEM).	XCIX
Tabelle 32:	Spezifikationen für das Nachfragemodell „Zwei Personengruppen, mit personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich“ (EVA).	CI
Tabelle 33:	Spezifikationen für das Nachfragemodell „Zwei Personengruppen, mit personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich“ (VISEM).	CII

Tabelle 34: Spezifikationen für die Nachfragemodelle der Einflussgröße
„Stichprobengröße“.

CIV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der vorliegenden Dissertation (Bildquelle: eigene Darstellung).	3
Abbildung 2: Das Verkehrsnachfragemodell als Bestandteil eines umfassenden Verkehrsplanungsmodells (Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 34)).	9
Abbildung 3: Aufbau einer Nachfragematrix (Bildquelle: FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 36)).	10
Abbildung 4: Räume (links) und Verkehrsarten (rechts) in einem Verkehrsnachfragemodell (Bildquelle: FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 32)).	17
Abbildung 5: Das Vier-Stufen Modell mit den wesentlichen Eingangsgrößen: Siedlungsstrukturdaten, Verhaltensdaten, Verkehrsangebotsdaten (Bildquelle: FRIEDRICH (2019, S. 56)).	18
Abbildung 6: Sequentieller Entscheidungsprozess in einem Nested-Logit-Modell (Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an FRIEDRICH (2019, S. 145)).	27
Abbildung 7: Beispielhafte Zielwahlmodelle ohne (links) und mit (rechts) personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich (Bildquelle: eigene Darstellung).	37
Abbildung 8: Stufen der Unsicherheit nach WALKER ET AL. (2003, S. 12 f.) (Bildquelle: eigene Darstellung).	42
Abbildung 9: Schematische Darstellungen der Ungenauigkeit als Folge von mangelnder Präzision oder Richtigkeit. (Bildquellen: modifizierte Abbildung in Anlehnung an NICOLAISEN (2012, S. 29)).	43
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Entwicklung von Fehlern bei zunehmender Modellkomplexität (Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an ALONSO (1968, S. 184)).	54
Abbildung 11: Fehlereinflüsse auf die Eingangsdaten eines Verkehrsnachfragemodells (Bildquelle: eigene Darstellung).	55
Abbildung 12: Schematische Darstellung der Entwicklung von Fehlern (Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an WILLUMSEN (2016a)).	60
Abbildung 13: Methoden zur Bestimmung von Unsicherheiten (Bildquelle: eigene Darstellung in Anlehnung an MANZO ET AL. (2014, S. 27)).	65
Abbildung 14: Beispielhafte Darstellung der maximal zulässigen Abweichung vom Erhebungswert c für die Gütebereiche des SQV -Werts.	

(Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 185)).	70
Abbildung 15: Bewertung der Abweichung für Einzelwerte von Fahrtzeiten (Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 186)).	71
Abbildung 16: Beispielhafte SQV -Auswertung für den Fall, dass eine Strecke halbiert wird. (Bildquelle: FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 190)).	72
Abbildung 17: Unterschied zwischen (Punkt-) Prognosen und Szenarien (Bildquelle: in Anlehnung an PHLEPS ET AL. (2015, S. 4 f.))	84
Abbildung 18: Schematische Darstellung der Fehlerfortpflanzung im Vier-Stufen-Algorithmus (Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an REZAEESTAKHRUIE (2017, S. 25)).	90
Abbildung 19: Schematische Darstellung von Konvexitätseffekten (Bildquelle: SIMON (2018)).	91
Abbildung 20: Qualitätsmanagementprozess beim Aufbau eines Verkehrsnachfragemodells (Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an PESTEL ET AL. (2016, S. 659) und FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 172)).	106
Abbildung 21: Beispiel eines 5-Zellen-Netzmodells inkl. aller Aktivitätenorte (Bildquelle: eigene Darstellung).	120
Abbildung 22: Schematische Darstellung der Funktionsweise des modifizierten Bisektionsverfahrens für einen zu schätzenden Parameter (Bildquelle: eigene Darstellung).	123
Abbildung 23: Beispiel für eine Visualisierung der Evaluierungsergebnisse von einem Modell mit zwei Parametern (Bildquelle: eigene Darstellung).	124
Abbildung 24: Exemplarische Darstellung des verwendeten Auswertungsschemas für die Verkehrserzeugungsvalidierung (Bildquelle: eigene Darstellung).	133
Abbildung 25: Exemplarische Darstellung des SQV ($f = 1 / (Z^2 - Z)$) für jede Quelle-Ziel-Relation (Bildquelle: eigene Darstellung).	134
Abbildung 26: Exemplarische Darstellung der umgelegten Nachfrage (links) und der zugehörigen Bewertung mit dem SQV ($f = 1 / S$; rechts) im Dreiecksnetz (Bildquelle: eigene Darstellung).	135
Abbildung 27: Exemplarische Darstellung der Reiseweitenverteilung mit den zugehörigen SQV -Bewertungen ($f = 1 / K$) je Klasse (Bildquelle: eigene Darstellung).	136
Abbildung 28: Exemplarische Darstellung des verwendeten Auswertungsschemas für die Zielwahlvalidierung (Bildquelle: eigene Darstellung).	137

Abbildung 29: Vergleich der Verkehrserzeugungsergebnisse auf verschiedenen Aggregationsebenen für Experiment 1 (Bildquelle: eigene Darstellung).	138
Abbildung 30: Vergleich der Zielwahlergebnisse für Experiment 1 (Bildquelle: eigene Darstellung).	140
Abbildung 31: Vergleich der Verkehrserzeugungsergebnisse auf verschiedenen Aggregationsebenen für Experiment 2 (Bildquelle: eigene Darstellung).	142
Abbildung 32: Vergleich der Zielwahlergebnisse für Experiment 2 (Bildquelle: eigene Darstellung).	145
Abbildung 33: Vergleich der Verkehrserzeugungsergebnisse auf verschiedenen Aggregationsebenen für Experiment 3 (Bildquelle: eigene Darstellung).	147
Abbildung 34: Vergleich der Zielwahlergebnisse für Experiment 3 (Bildquelle: eigene Darstellung).	150
Abbildung 35: Vergleich der Verkehrserzeugungsergebnisse auf verschiedenen Aggregationsebenen für Experiment 4 (Bildquelle: eigene Darstellung).	152
Abbildung 36: Vergleich der Zielwahlergebnisse auf verschiedenen Aggregationsebenen für Experiment 4 (Bildquelle: eigene Darstellung).	154
Abbildung 37: Vergleich der Verkehrserzeugungsergebnisse auf verschiedenen Aggregationsebenen für Experiment 5 (Bildquelle: eigene Darstellung).	158
Abbildung 38: Vergleich der Zielwahlergebnisse auf verschiedenen Aggregationsebenen für Experiment 5 (Bildquelle: eigene Darstellung).	166
Abbildung 39: Berechnungsansätze des Kennwertmodells der Verkehrserzeugung (Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 166 f.)).	LIV
Abbildung 40: Beispiel für Logit-Modell: pflichtaktivitätsgebunden (Rubberbanding) und Logit-Modell: Vollständige Enumeration (Bildquelle: eigene Darstellung).	LXIX
Abbildung 41: Beispiel eines 5-Zonen-Netzmodells ohne Aktivitätenorte (Bildquelle: eigene Darstellung).	LXXI
Abbildung 42: Wegetagebuchgeneratorspezifikationen für die Untersuchungen mit einer Personengruppe, einer Aktivität und fünf Verkehrszellen (Experiment 1, Bildquelle: eigene Darstellung).	LXXIII
Abbildung 43: Wegetagebuchgeneratorspezifikationen für die Untersuchungen mit einer Personengruppe, zwei Aktivitäten	

und fünf Verkehrszellen (Experiment 2, Bildquelle: eigene Darstellung).	LXXIV
Abbildung 44: Wegetagebuchgeneratorspezifikationen für die Untersuchungen mit zwei Personengruppen, einer Aktivität und fünf Verkehrszellen (Experiment 3, Bildquelle: eigene Darstellung).	LXXV
Abbildung 45: Wegetagebuchgeneratorspezifikationen für die Untersuchungen mit einer Personengruppe, einer Aktivität und 25 Verkehrszellen (Experiment 1, Bildquelle: eigene Darstellung).	LXXVI
Abbildung 46: Wegetagebuchgeneratorspezifikationen für die Untersuchungen mit einer Personengruppe, zwei Aktivitäten und 25 Verkehrszellen (Experiment 2, Bildquelle: eigene Darstellung).	LXXVII
Abbildung 47: Wegetagebuchgeneratorspezifikationen für die Untersuchungen mit zwei Personengruppen, einer Aktivität und 25 Verkehrszellen (Experiment 3, Bildquelle: eigene Darstellung).	LXXVIII
Abbildung 48: Vergleich der Verkehrserzeugungsergebnisse auf verschiedenen Aggregationsebenen für Experiment 4 (mit EVA-Modellen) (Bildquelle: eigene Darstellung).	CVIII
Abbildung 49: Vergleich der Zielwahlergebnisse auf verschiedenen Aggregationsebenen für Experiment 4 (mit EVA-Modellen) (Bildquelle: eigene Darstellung).	CXI

Kurzfassung

Verkehrsnachfragemodelle sind ein wichtiges und notwendiges Werkzeug der Verkehrsplanung. Sie sind eine wichtige Grundlage für politische Entscheidungen mit häufig langfristigen und kostenintensiven Konsequenzen. Aus diesem Grund müssen die Ergebnisse von Verkehrsnachfragemodellen einer gewissen Qualität genügen. Die vorliegende Arbeit befasst sich diesbezüglich mit folgenden Forschungsfragen:

1. Woher kommen die Abweichungen zwischen Verkehrsnachfragemodell und Realität und wie lassen sich diese Abweichungen bestimmen?
2. Wie wird die Qualität eines Verkehrsnachfragemodells definiert und welche Schritte sind für ein Qualitätsmanagement von Verkehrsnachfragemodellen notwendig?
3. Wie groß ist der Einfluss ausgewählter Unsicherheiten in einem Verkehrsnachfragemodell?

Anhand einer Metastudie von Ex-post-Analysen wird gezeigt, aus welchen Gründen sich (in der Vergangenheit erstellte) Modellprognosen als ungenau erwiesen und in welchen Größenordnungen diese Ungenauigkeiten liegen. Die Metastudie unterscheidet Straßenbauprojekte, Mautstraßenprojekte, Schienenverkehrsprojekte, Luftverkehrsprojekte und nicht umgesetzte Projekte. Zudem wertet sie zeitliche und räumliche Aspekte aus. Eine exemplarische Auflistung von juristischen Streitfällen zeigt darüber hinaus, welche Auswirkungen ungenaue Modellprognosen haben können. Darauf aufbauend wird ein detaillierter Überblick über die Unsicherheiten, die im Rahmen der Verkehrsnachfragemodellierung auftreten, und die Methoden, die zur Abbildung der Unsicherheiten verwendet werden können, gegeben.

Eine wichtige Voraussetzung dafür, dass Verkehrsnachfragemodelle im Rahmen der Entscheidungsfindung eingesetzt werden, ist das Vertrauen in die Modellergebnisse. Dieses Vertrauen lässt sich aufbauen, wenn die Modelle und ihre Ergebnisse qualitativ hochwertig, zuverlässig und transparent sind. In der vorliegenden Arbeit wird ein standardisierter Qualitätsmanagementprozess beschrieben, der in jedem Schritt der Modellerstellung Prüfungen vorsieht und somit für eine vergleichbare Qualität von Verkehrsnachfragemodellen unerlässlich ist. In diesem Zusammenhang ist auch die Modelldokumentation von großer Bedeutung: Wirkungszusammenhänge, Modellannahmen und Unsicherheiten müssen darin klar und verständlich beschrieben werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Unsicherheitseinflüsse genauer untersucht:

- Einfluss der verwendeten Modelltheorie (als Beispiel für einen Spezifikationsfehler): Mit den Modellannahmen zur Nachbildung von Entscheidungsprozessen der Verkehrsteilnehmenden werden in einem Nachfragemodell grundlegende Festlegungen über die Abbildung des Mobilitätsverhaltens der Menschen getroffen. Untersucht wird die Frage, ob dieses Mobilitätsverhalten besser mit Einzelwegen (aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle der Typen Vier-Stufen-Algorithmus oder EVA) oder mit Wegeketten (aktivitätenbasierte Wegekettenmodelle des Typs VISEM) abgebildet werden kann.

- Einfluss der inhaltlichen Segmentierung der Nachfrage (als Beispiel für einen Abstraktionsfehler):

Die inhaltliche Segmentierung der Nachfrage bestimmt den Detaillierungsgrad, mit dem das Modell Entscheidungsprozesse nachbilden kann. Je nach verfügbarer Datengrundlage und geplanten Einsatzbereichen des Modells sind feinere oder gröbere Segmentierungen möglich. Es wird untersucht, welchen Einfluss die Personengruppensegmentierung und ein personengruppenübergreifender Randsummenausgleich haben.

- Einfluss der Stichprobengröße (als Beispiel für einen Messfehler bei Mobilitätsverhaltensdaten):

Aus den mit Wegetagebüchern erfassten Verhaltensdaten leiten sich die Verkehrserzeugungssparameter und die Verhaltensparameter für die Ziel- und Moduswahl ab. Die Genauigkeit wird von der Stichprobengröße sowie von der Qualität der Erhebung und Nachbearbeitung beeinflusst. Die vorgenommene Untersuchung fokussiert sich auf den Einfluss der Stichprobengröße.

Für die Untersuchungen werden die Mobilitätsverhalten von virtuellen mikroskopischen Populationen als Realität angenommen. Diese Mobilitätsdatenbasen werden mit makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen reproduziert und es wird der Grad der Annäherung mit selbstskalierenden Gütemaßen bestimmt. Insgesamt werden hierbei 55 Verkehrsnachfragemodelle verschiedenster Spezifikation in drei Netzmodellgrößen erstellt. Das Auswertungsdesign ist so gestaltet, dass zusätzlich zu den oben genannten Einflussgrößen auch der Einfluss der Aggregation von Modellergebnissen untersucht werden kann.

Hinsichtlich der verwendeten Modelltheorie können für die Modellierung von Verkehrserzeugung und Zielwahl keine eindeutigen Vor- oder Nachteile von aktivitätenbasierten Einzelwegmodellen oder aktivitätenbasierten Wegekettensmodellen nachgewiesen werden. Bei der Untersuchung der inhaltlichen Segmentierung wird deutlich, dass ein personengruppenübergreifender Randsummenausgleich wichtig ist. Bezüglich des Stichprobenfehlers lässt sich ableiten, dass neben einer ausreichend großen Stichprobengröße die Gewichtung der Stichprobenelemente von großer Bedeutung ist. Allgemein wird die Erwartung bestätigt, dass Mobilitätsdatenbasen und Modelle besser übereinstimmen, je stärker die Ergebnisse aggregiert werden.

Für die Praxis der Verkehrsnachfragemodellierung lassen sich somit folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Modelle sind nur Abbilder der Realität und können diese nie vollkommen abbilden. Abweichungen von der Realität sind daher zu erwarten. Trotzdem sollte versucht werden, die Unsicherheiten, die auf die Modelle wirken, zu minimieren. Dies betrifft Fehler im Modellaufbau, bei den Eingangsdaten und beim Umgang mit dem Modell.
- Der Aufbau von Verkehrsnachfragemodellen muss von einem standardisierten Qualitätsmanagementprozess begleitet werden. Dieser beginnt mit der Formulierung einer detaillierten Spezifikation vor dem eigentlichen Beginn der Modellierung, umfasst

sämtliche Überprüfungen im Rahmen der Verifizierung, Eingangsdatenprüfung und Validierung, und endet mit einer Dokumentation, die unter anderem alle Annahmen, Unsicherheiten und Einsatzgrenzen des Modells klar aufführt.

- Ungeachtet der Datengrundlage ist es aus Gründen der Abbildungsqualität von Verkehrserzeugung und Zielwahl unerheblich, ob aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle oder aktivitätenbasierte Wegekettenmodelle verwendet werden. Ein personengruppenübergreifender Randsummenausgleich erweist sich hingegen als vorteilhaft.

Abstract

Travel demand models are a necessary and important tool for transport planning. They provide important bases for political decisions, often with long-term and cost-intensive consequences. For this reason, travel demand models have to provide high-quality results. This thesis deals with the following research questions:

1. Where do the differences between travel demand model and reality come from and how can these differences be determined?
2. How is the quality of a travel demand model defined and which steps are necessary for a quality management of travel demand models?
3. How big is the influence of certain uncertainties in a transport demand model?

A meta-study of ex-post analyses will show why past model forecasts turned out to be inaccurate and what the magnitude of these inaccuracies is. The meta-study distinguishes between road projects, toll road projects, rail projects, air traffic projects and do-nothing alternatives. It also evaluates temporal and spatial aspects. Furthermore, an exemplary list of legal disputes shows what effects inaccurate forecasts can have. Based on this, a detailed overview of the uncertainties that arise in the context of travel demand modelling and the methods that can be used to capture these uncertainties is given.

An important requirement for the use of travel demand models in decision processes is the confidence in the model results. This confidence can be achieved if the models and their results are of high quality, reliable and transparent. This thesis describes a standardized quality management process that includes checks at every step of the model development process and is therefore essential for a comparable quality of travel demand models. In this context, model documentation is also of crucial importance: interdependencies, model assumptions and uncertainties must be described in a clear and understandable manner.

In the scope of this thesis three selected uncertainties are investigated in detail:

- Influence of the employed model theory (as an example for a specification error): With the assumptions regarding the modelling of individual decision processes, fundamental definitions are made in a demand model about how the mobility behaviour of individuals is represented. The question is investigated, whether this mobility behaviour can be better mapped with trip-based (four-step-algorithm or EVA) or with tour-based (VISEM) approaches.
- Influence of the segmentation of demand (as an example of an abstraction error): The segmentation of demand determines the level of detail that is used to model decision processes. Depending on the available data base and the intended fields of application of the model, different segmentations are possible. The influence of the person group segmentation and a balancing across person groups is investigated.

- Influence of the sample size (as an example for a measurement error in mobility behaviour data):

The trip generation parameters and the behavioural parameters for the destination and mode choice are derived from the behavioural data collected with household travel surveys. The accuracy is influenced by the sample size and the quality of the survey and post-processing. The performed investigation focuses on the influence of the sample size.

For the purpose of the investigations, it is assumed that the mobility behaviour of virtual microscopic populations represents the reality. Then, these mobility behaviours are reproduced with macroscopic travel demand models and the inaccuracy is determined with a self-scaling quality indicator. A total of 55 travel demand models of different specifications in three network model sizes are created. The evaluation is designed in such a way that in addition to the above-mentioned influences, the impact of the aggregation of model results can be analysed.

Regarding the employed model theory, no clear advantages or disadvantages of trip-based models or tour-based models can be identified. When investigating the segmentation of demand, it becomes clear that a balancing across person groups is important. With respect to the sampling error, it can be concluded that together with a sufficiently large sample size, the weighting of the sample elements is of great importance. In general, the expectation is confirmed that greater aggregation of the results will lead to a better match between mobility databases and models.

Consequently, the following conclusions can be drawn for the practice of travel demand modelling:

- Models are only images of the reality and can never fully replicate it. Therefore, deviations from reality are to be expected. Nevertheless, efforts should be made to minimise the uncertainties that affect the models. This concerns errors in the model structure, in the input data and in the handling of the model.
- The development of travel demand models must be supported by a standardised quality management process. This starts with the formulation of a detailed specification prior to the actual beginning of modelling, includes all checks within the scope of verification, input data checks and validation, and concludes with a documentation that clearly lists all assumptions, uncertainties, and application limits of the model.
- Irrespective of the data basis, the quality of trip generation and destination choice is not affected by either using trip-based models or tour-based models. However, an algorithm that balances the travel demand among different person groups turns out to be advantageous.

Essentially, all models are wrong, but some are useful.

[...] the practical question is how wrong do they have to be to not be useful.

George E. P. Box in BOX & DRAPER (1987, S. 424, 74)

1 Einleitung

Die Verkehrsplanung beschäftigt sich mit vielen drängenden Fragen. Es gilt, die Reisezeiten, die Erreichbarkeiten, die Wirtschaftlichkeit, die Sicherheit, die Schadstoff-, Treibhausgas- und Lärmemissionen sowie den Energieverbrauch im Verkehrssektor zu verbessern. Die einzelnen Ziele lassen sich jeweils durch konkrete Maßnahmen erreichen. Dabei kann es jedoch zu Zielkonflikten zwischen den einzelnen Maßnahmen kommen, z.B. führt eine Reduktion der Geschwindigkeit auf einem Streckenzug zu einer Verbesserung der Sicherheit, allerdings geschieht dies zulasten der Reisezeit. Die Maßnahmen müssen also wohlüberlegt und in ihrer Wirkung aufeinander abgestimmt sein.

Für ein grundsätzliches Verständnis, wie Verkehr funktioniert und wie bestimmte Maßnahmen wirken, helfen Erhebungen des aktuellen Verkehrsgeschehens. Erhebungen haben aber einen entscheidenden Nachteil: sie beschreiben nur den aktuellen Zustand inkl. aller Besonderheiten des Erhebungszeitraums, z.B. Streckensperrungen aufgrund von Baustellen. Für bisher nicht vorhandene Situationen, z.B. die Nutzung von automatisierten Fahrzeugen, ist eine Erhebung gar nicht möglich. Erhebungen lassen auch keine Prognosen von zukünftigen Zuständen zu (ggf. ist bei der Erhebung einer längeren Zeitreihe ein Trend absehbar). Um nun die Wirkungen und die Effektivität von verkehrsplanerischen Maßnahmen in der Zukunft abschätzen zu können, nennt FRIEDRICH (2015) die (subjektive) Erfahrung von Planenden, Abschätzungen aus einfachen (verkehrlichen) Zusammenhängen (Trends) und Verkehrsnachfragemodelle. Die beiden erstgenannten Herangehensweisen bestechen aufgrund ihrer Einfachheit und tatsächlich sind sie im Verkehrsplanungsprozess ein unverzichtbarer Bestandteil. Aber aufgrund dieser Einfachheit scheitern sie besonders an der Abbildung komplexer Zusammenhänge. Dafür eignen sich wiederum Verkehrsnachfragemodelle. Mit ihnen lassen sich die Wirkungen von zukünftigen Entwicklungen und geplanten Maßnahmen vor ihrer Realisierung berechnen. Somit ist es möglich, vorab zu bestimmen, ob eine Maßnahme in die richtige Richtung zielt oder ob bestimmte Entwicklungen (z.B. der demografische Wandel) überhaupt erst bestimmte Maßnahmen notwendig machen.

Im ausgehenden 19. Jahrhundert war nicht absehbar, welchen immensen Einfluss das Automobil auf Verkehr, Stadtgestaltung, Wirtschafts- und Sozialsysteme haben wird. Heutzutage bieten Verkehrsnachfragemodelle die Möglichkeit, die Potenziale und verkehrlichen Einflüsse zukünftiger Technologien (Mikromobilität mit E-Scootern, Ridesharing, automatisierte Fahrzeuge, Lufttaxis etc.) abzuschätzen und sie somit möglichst gesellschaftsdienlich ins Stadtbild zu integrieren. Verkehrsnachfragemodelle liefern damit eine wichtige Grundlage für politische Entscheidungen mit häufig langfristigen und kostenintensiven Konsequenzen. (MILLER (2020, S. 31))

1.1 Motivation

Unterschiedlichste Personenkreise nutzen Verkehrsnachfragemodelle direkt oder indirekt:

- Personen, die Verkehrsnachfragemodelle nach den definierten Anforderungen entwickeln. Dabei müssen sie ihre Vorgehensweise bei Modellaufbau, Kalibrierung und Validierung angemessen dokumentieren.
- Personen, die Verkehrsnachfragemodelle in Verkehrsverbünden, bei Betreibern des öffentlichen Verkehrs (ÖV) oder als politische Entscheidungsträger nutzen, um verkehrsplanerische Entscheidungen zu treffen.
- Wissenschaftliche Einrichtungen, die Modelle häufig zum Erproben neuer Modellansätze oder zum Abschätzen innovativer Technologien nutzen.
- Personen, die nur Modellergebnisse nutzen und das Modell nicht selbst bedienen.
- Institutionen, die beratende oder prüfende Tätigkeiten ausführen (z.B. Rechnungshöfe, Sachverständige, Gerichte) und die Modelle hinsichtlich ihrer Validität prüfen. Dies kann als externe Beratung im Modellerstellungsprozess oder bei juristischen Streitfällen geschehen.
- Die Gesellschaft, die den Aufbau von Verkehrsnachfragemodellen für die öffentliche Hand aus Steuermitteln finanziert. Darüber hinaus dienen die Modellergebnisse als Grundlage für politische Entscheidungen. Die Konsequenzen dieser Entscheidungen betreffen die gesamte Gesellschaft.

Alle genannten Personenkreise sollten ein Interesse daran haben, dass Modelle qualitativ hochwertig, ihre Eigenschaften gut dokumentiert und ihre Ergebnisse verlässlich sind. Für eine einheitliche Definition, was qualitativ hochwertig bedeutet, und für besser vergleichbare Qualitätsprüfungen empfiehlt es sich, verpflichtende Standards vorzugeben. International gibt es einige Beispiele für bestehende Modellierungsrichtlinien oder -empfehlungen. Auch in den deutschsprachigen Ländern (Deutschland, Österreich, Schweiz) gibt es Bestrebungen, solche Richtlinien bzw. Empfehlungen herauszugeben. In diesem Zusammenhang wurden am Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik der Universität Stuttgart drei Forschungsprojekte zum Thema „Modellqualität“ unter anderem durch den Autor dieser Dissertation bearbeitet. Die vorliegende Arbeit basiert auf den Erkenntnissen dieser Forschungsprojekte und widmet sich folgenden Forschungsfragen:

1. Woher kommen die Abweichungen zwischen Verkehrsnachfragemodell und Realität und wie lassen sich diese Abweichungen bestimmen?
2. Wie wird die Qualität eines Verkehrsnachfragemodells definiert und welche Schritte sind für ein Qualitätsmanagement von Verkehrsnachfragemodellen notwendig?
3. Wie groß ist der Einfluss ausgewählter Unsicherheiten in einem Verkehrsnachfragemodell?

1.2 Aufbau der Arbeit

Zur Bearbeitung der Forschungsfragen wird die vorliegende Dissertation in sechs Kapitel gegliedert. Nach dem einleitenden Kapitel 1 wird in Kapitel 2 ein grundlegendes Verständnis für die Theorie hinter der Verkehrsnachfragemodellierung aufgebaut. Kapitel 3 befasst sich mit Forschungsfrage 1: es werden die Erkenntnisse bisheriger Studien zu Ex-post-Analysen zusammengefasst, zudem werden die Fragen geklärt, warum es zu Abweichungen zwischen Modell und Realität kommt, wie solche Abweichungen zu klassifizieren sind und wie diese quantifiziert werden können. Im anschließenden Kapitel 4 werden die Begriffe „Qualität“ und „Qualitätsmanagement“ definiert und es wird ein Qualitätsmanagementprozess für die Erstellung von Verkehrsnachfragemodellen vorgestellt (Forschungsfrage 2). In Kapitel 5 werden ausgewählte Einflussgrößen auf die Modellqualität genauer untersucht (Forschungsfrage 3). Die Ergebnisse der Untersuchung werden kritisch eingeordnet und es werden Schlussfolgerungen für die Qualität von zukünftigen Modellen abgeleitet. Das abschließende Kapitel 6 dient der inhaltlichen Diskussion sowie der Zusammenfassung der Dissertation. Darüber hinaus wird ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf gegeben. Abbildung 1 illustriert den beschriebenen Aufbau.

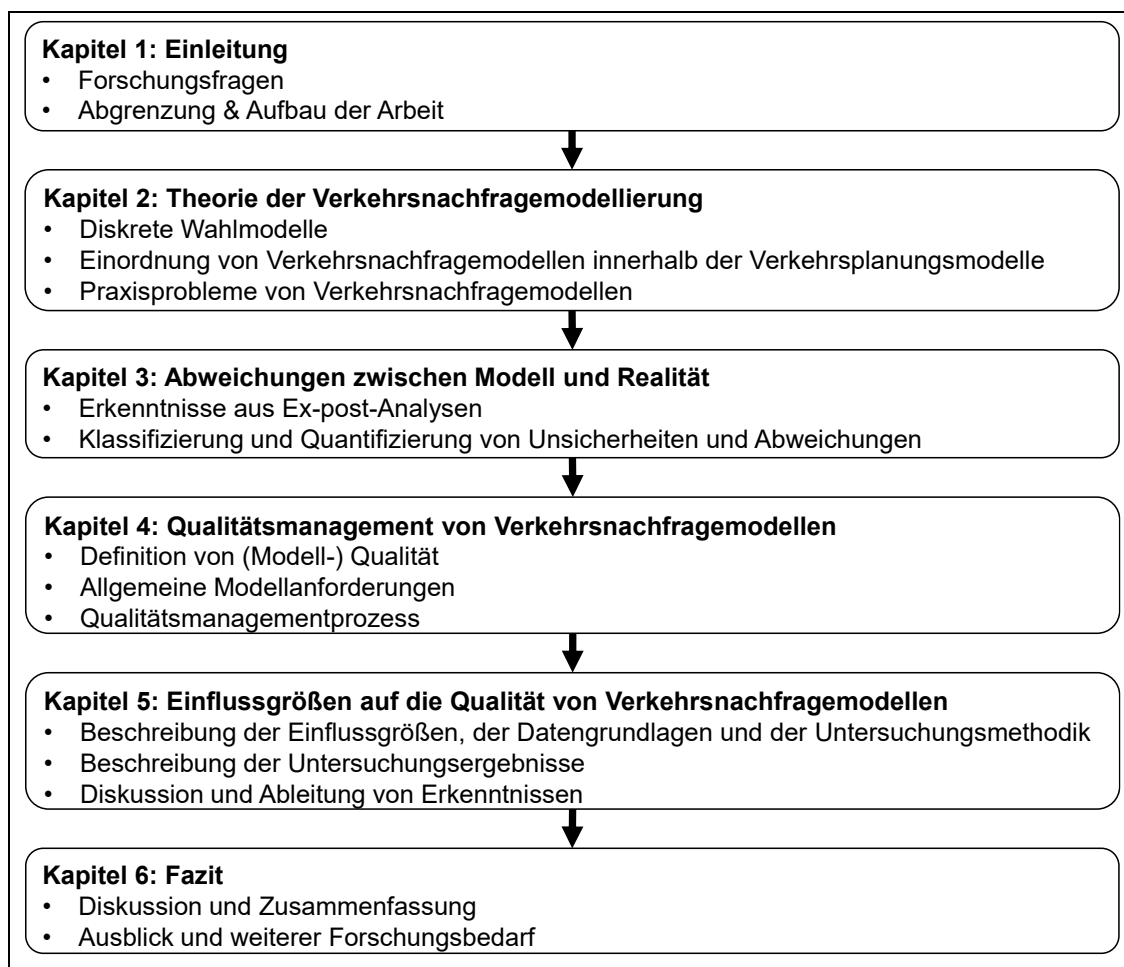


Abbildung 1: Aufbau der vorliegenden Dissertation (Bildquelle: eigene Darstellung).

Everything we think we know about the world is a model.

Donella H. Meadows in MEADOWS (2009, S. 87)

2 Theorie der Verkehrsnachfragemodellierung

In diesem Kapitel soll ein grundlegendes Verständnis für die Theorie der Verkehrsnachfragemodellierung aufgebaut werden. Dazu wird zunächst die Theorie der diskreten Wahlmodelle grob umrissen. Anschließend werden die Modelle der Verkehrsplanung vorgestellt, wobei ein besonderer Fokus auf die Theorie der Verkehrsnachfragemodelle gelegt wird. Da diese Dissertation nicht den Anspruch hat, bestehende Lehrbücher zu ersetzen, werden die Themen in einer für diese Arbeit notwendigen Tiefe besprochen – für mehr Details wird auf die Fachliteratur verwiesen. Den Abschluss des Kapitels bildet eine Übersicht über die Probleme bei der Umsetzung der Modelltheorie in die Praxis.

2.1 Variablen und Parameter

Variablen und Parameter sind die Grundbausteine eines Verkehrsnachfragemodells. Daher sind die Definition und Abgrenzung der beiden Begriffe wichtig.

Bei **Modellvariablen** werden abhängige und unabhängige Variablen unterschieden (HARTL (2020, S. 17 f.)). Abhängige Variablen (auch als Kenngrößen bezeichnet) beschreiben dabei das Ergebnis der Verkehrsplanung. Unabhängige Variablen hingegen sind die Eingangsgrößen der Verkehrsplanung. Sie verändern sich entweder ohne planerische Eingriffe (z.B. Bevölkerungsstruktur oder Energiepreise) oder aufgrund planerischer Entscheidungen (z.B. Arbeitsplätze in einer Verkehrszelle, Anzahl der Fahrstreifen einer Strecke, Lage von Haltepunkten, Preise für Parken oder Fahrkarten).

Wesentliche Variablen des Verkehrsangebots sind die Netzelemente mit ihren jeweiligen Eigenschaften (Fahrzeit, Kapazität, Nutzungsgebühren). Wesentliche Variablen der Siedlungsstruktur sind die Einwohner mit ihren soziodemografischen Eigenschaften und die Aktivitätenorte. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 35))

Modellparameter sind die Stellschrauben des Modells, mit deren Hilfe das Modell bei der Modellerstellung an die Realität angepasst wird (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 35)). WALKER ET AL. (2003, S. 11) unterscheiden folgende Parametertypen:

- Exakte Parameter sind universelle Konstanten, z.B. die mathematischen Konstanten π und e .
- Feste Parameter sind Parameter, die durch frühere Untersuchungen so gut bestimmt sind, dass sie als genau angesehen werden können, z.B. die Erdbeschleunigung an einem bestimmten Ort auf der Erde.
- A priori gesetzte Parameter sind Parameter, deren Werte durch die Kalibrierung nur schwer festzulegen sind und die daher auf einen bestimmten, konstanten Wert festgelegt werden. Hierbei lässt sich unterscheiden in:

- Empirisch begründete Parameter, die aus Verkehrserhebungen abgeleitet werden können (z.B. Produktions- oder Attraktionsraten) und
- Gesetzte Parameter, die aufgrund mangelnder empirischer Grundlagen aus der Literatur oder aufgrund von Erfahrungen angenommen werden und im Kalibrierungsprozess nicht verändert werden, z.B. konkrete Value of Time-Ausprägungen.
- Kalibrierte Parameter sind Parameter, die unbekannt sind, nicht aus anderen Quellen übernommen werden können und im Kalibrierungsprozess durch die Modellerstellenden bestimmt werden, z.B. die Parameter der CR-Funktion¹ oder der Widerstandsfunktion bei der Routenwahl.

Auch Modelleigenschaften, die keine skalaren Werte sind, können als Parameter bezeichnet werden. So sind z.B. die Verkehrszellengrößen, die Anzahl und Lage von Anbindungsknoten und die Streckenkapazitäten wesentliche Parameter des Verkehrsangebots. Entsprechend sind die Anzahl der Personengruppen und Wegezwecke wesentliche Parameter des Nachfragemodells. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 35))

2.2 Diskrete Wahlmodelle

Jede menschliche Handlung ist die Folge bewusster oder unbewusster Entscheidungen zwischen mehreren Alternativen. Im verkehrlichen Kontext gibt es dabei oft nur eine endliche Anzahl von klar getrennten (diskreten) Wahlalternativen. Um diese Entscheidungen in einem Modell zu reproduzieren, müssen diese diskreten Alternativen, deren relevante Eigenschaften (Attribute), die Einstellungen der Verkehrsteilnehmenden und das Zusammenwirken dieser Komponenten abgebildet werden.

Die meisten diskreten Wahlmodelle verwenden das Konzept der Nutzenmaximierung. Dieses Konzept basiert darauf, dass der Nutzen jeder Attributsausprägung einer Alternative als skalarer Wert ausgedrückt werden kann. Dadurch lässt sich ein Gesamtnutzen dieser Alternative berechnen. Entsprechend der Nutzenmaximierung wählen die Verkehrsteilnehmenden die Alternative mit dem größten Nutzen, d.h. die attraktivste Alternative. In der Praxis der Modellerstellung ist es allerdings unmöglich, sämtliche entscheidungsbeeinflussenden Attribute, deren wahrgenommene Ausprägung bzw. die Informiertheit der Entscheidenden sowie deren individuelle Präferenzen im Entscheidungsprozess zu kennen. Aus diesem Grund werden in der stochastischen Nutzentheorie (engl.: random utility theory) zufällige Einflüsse berücksichtigt. Zusammen mit dem objektiven, deterministischen Nutzenbetrag ergibt sich somit der subjektive Gesamtnutzen einer Alternative. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 71 ff.), TFR (2020a))

Die folgenden Formeln zeigen die Grundform einer Nutzenfunktion:

¹ „Eine CR-Funktion (Capacity-Restraint-Funktion) beschreibt den Zusammenhang zwischen der Auslastung und der Fahrtzeit auf einer Strecke im Kfz-Verkehr.“ (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 35))

$$u_{gi} = v_{gi} + \varepsilon_{gi} \quad (1)$$

$$v_{gi} = \beta_{0gi} + \sum_{k \in K} \beta_{kgi} \cdot x_{kgi} \quad (2)$$

mit

u_{gi}	subjektiver Gesamtnutzen u der Alternative i für die Gruppe g
v_{gi}	deterministischer, objektiver Nutzenbetrag v der Alternative i für die Gruppe g
ε_{gi}	zufallsabhängiger, stochastischer Nutzenbetrag ε der Alternative i für die Gruppe g
β_{0gi}	alternativenspezifische Konstante der Alternative i für die Gruppe g
β_{kgi}	Parameter zur Gewichtung des Attributes k der Alternative i für die Gruppe g
x_{kgi}	Wert x des Attributes k der Alternative i für die Gruppe g
K	Menge der Attribute

Mit einem Wahlmodell kann der Nutzen einer Alternative in eine entsprechende Auswahlwahrscheinlichkeit überführt werden (siehe Formel (3)).

$$p_{gi} = \frac{f(v_{gi})}{\sum_{i \in I} f(v_{gi})} \quad (3)$$

mit

p_{gi}	Wahrscheinlichkeit p , dass eine Person der Gruppe g die Alternative i wählt
v_{gi}	deterministischer, objektiver Nutzenbetrag v der Alternative i für die Gruppe g
$f(v_{gi})$	bewertete Nutzenfunktion v_{gi}
I	Menge der Alternativen

Ein verbreitetes Wahlmodell für mehr als zwei Alternativen ist das multinominale Logit-Modell unter Verwendung der folgenden Formel (4). Es sind aber auch andere Bewertungsfunktionen möglich (PTV (2018, S. 207 f.)), z.B.:

- Logit-Funktion:

$$f(v_{gi}) = \exp(\beta_g \cdot v_{gi}) \quad (4)$$

- Kirchhoff-Funktion:

$$f(v_{gi}) = v_{gi}^{\beta_g} \quad (5)$$

- EVA1-Funktion:

$$f(v_{gi}) = \frac{1}{(1 + v_{gi})^{\varphi(v_{gi})}} \quad \text{mit} \quad \varphi(v_{gi}) = \frac{\beta_{1g}}{1 + \exp(\beta_{2g} - \beta_{3g} \cdot v_{gi})} \quad (6)$$

- EVA2-Funktion:

$$f(v_{gi}) = \left(1 + \left(\frac{v_{gi}}{\beta_{3g}} \right)^{\beta_{2g}} \right)^{-\beta_{1g}} \quad (7)$$

mit

v_{gi} deterministischer, objektiver Nutzenbetrag der Alternative i für die Gruppe g

$f(v_{gi})$ bewertete Nutzenfunktion v_{gi}

β_g Parameter der Bewertungsfunktion der Gruppe g

Für weiterführende Informationen hinsichtlich diskreter Wahlmodelle sei an dieser Stelle auf die Fachliteratur verwiesen, z.B.:

- Discrete choice analysis: Theory and application to travel demand (BEN-AKIVA & LERMAN (2006)) oder
- Discrete Choice Methods with Simulation (TRAIN (2009)).

2.3 Modelle der Verkehrsplanung

Verkehr ist die Summe der vielfältigen individuellen Entscheidungsprozesse der Verkehrsteilnehmenden. Im privaten Personenverkehr treffen Privatpersonen diese Entscheidungen aufgrund individueller Präferenzen. Im Wirtschaftsverkehr sind dagegen betriebswirtschaftliche Abwägungen und Optimierungsüberlegungen der wirtschaftlichen Akteure ausschlaggebend. Im Folgenden werden die Entscheidungsprozesse im privaten Personenverkehr behandelt.

Im Rahmen der Verkehrsplanung gibt es verschiedene Modelle, die verkehrsrelevante Entscheidungen nachbilden (siehe Tabelle 1). Die Konsequenzen dieser Entscheidungen haben unterschiedliche Zeithorizonte. Langfristig wird z.B. über die Wahl des Wohnortes (Flächennutzungsmodelle) oder über die Anschaffung eines Fahrzeuges und einer ÖV-Zeitkarte (Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodelle) entschieden. Mittelfristige Entscheidungen hinsichtlich der Anzahl, Ver- und Aufteilung von Ortsveränderungen wer-

den mit Verkehrsnachfragemodellen abgebildet. Dies betrifft die durchzuführenden Aktivitäten sowie deren Reihenfolge und räumliche Lage, die Wahl des Verkehrsmittels zur Durchführung einer Ortsveränderung und die Wahl einer Route bzw. Verbindung². Verkehrsflussmodelle simulieren Interaktionen der einzelnen Verkehrsteilnehmenden. Sie bilden damit kurzfristige Entscheidungen ab. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 15 ff.))

Modelltyp	Teilmodelle	
	Personenverkehr	regionaler Güterverkehr
Flächennutzungsmodelle	Standortwahl	
Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodelle	Fahrzeugbeschaffungswahl	-
	Zeitkartenbeschaffungswahl	
Verkehrsnachfragemodelle	Aktivitätenwahl	Verkehrsaufkommensermittlung
	Zielwahl	Zielwahl
	Moduswahl	Tourenbildung, Fahrzeugklassenzuordnung
	Abfahrtszeitwahl	
	Routenwahl	
Verkehrsflussmodelle	Geschwindigkeitswahl	
	Fahrstreifenwahl	
	Fahrzeugfolgeabstandwahl	

Tabelle 1: Verkehrsrelevante Entscheidungen und ihre Abbildung in Verkehrsmodellen (Quelle: FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 17)).

Im Fokus dieser Arbeit stehen Verkehrsnachfragemodelle. Sie können als Teil eines umfassenden Verkehrsplanungsmodells verstanden werden. Wie in Abbildung 2 dargestellt, beinhaltet ein solches Verkehrsplanungsmodell diverse Daten-, Wirkungs- und Bewertungsmodelle. Das Verkehrsnachfragemodell wird in diesem Kontext als „Wirkungsmodell Ortsveränderungen“ bezeichnet (roter Rahmen).

² „Verbindung bezeichnet eine zeitlich differenzierte Route. Während bei einer statischen Umlegung die Nachfrage auf eine Menge von räumlich unterschiedlichen Routen, deren Eigenschaften sich im Betrachtungszeitraum nicht ändern, verteilt wird, ist bei dynamischen Umlegungen neben der Route auch der Zeitpunkt der Ortsveränderung relevant.“ (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 261))

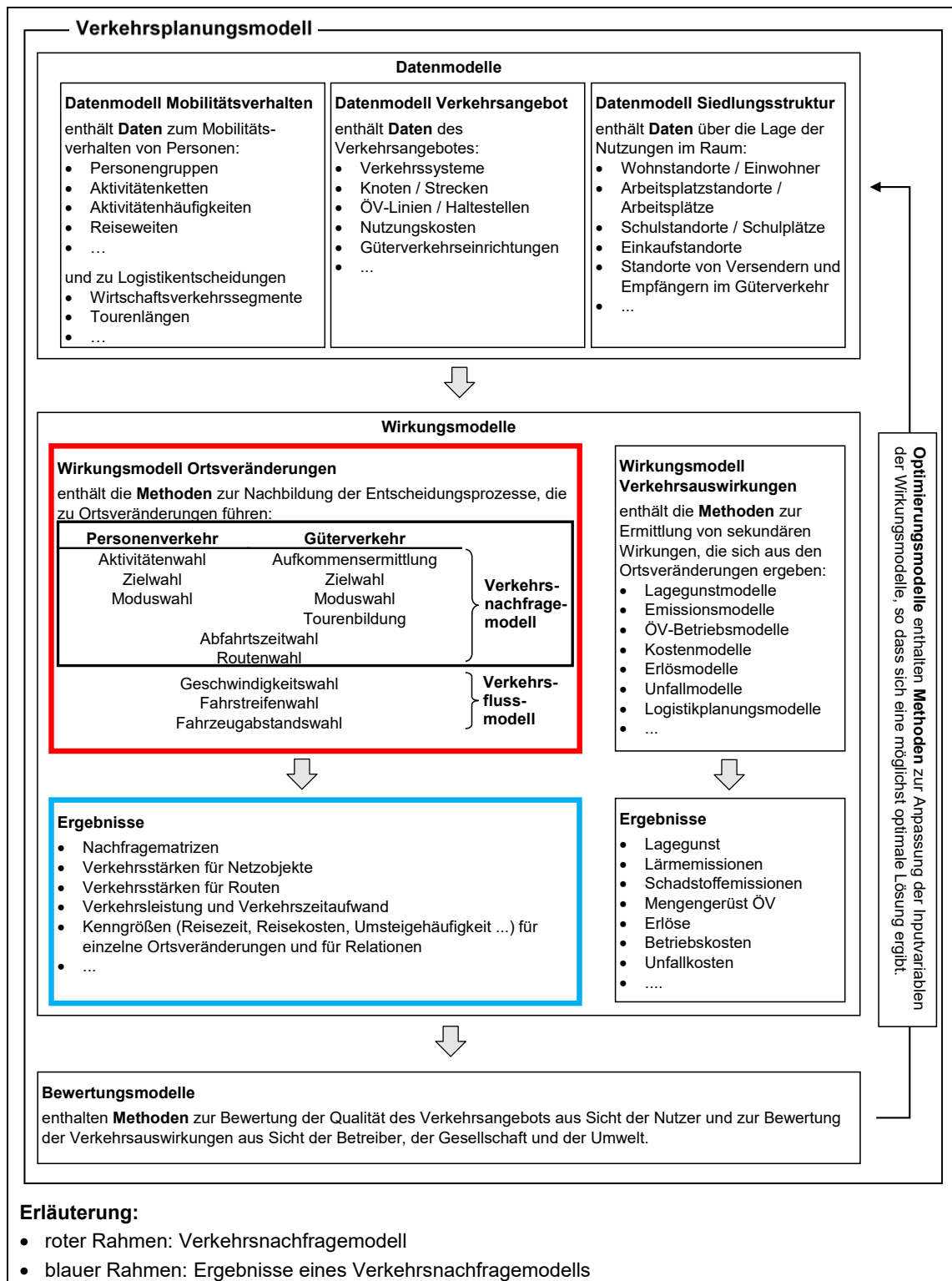


Abbildung 2: Das Verkehrsnachfragemodell als Bestandteil eines umfassenden Verkehrsplanungsmodells (Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 34)).

Entsprechend Abbildung 2 (blauer Rahmen) beinhalten die Ergebnisse eines Verkehrsnachfragemodells unter anderem Nachfragematrizen, Verkehrsstärken und Kenngrößen. Relationsbezogene Ergebnisse werden dabei in Form von Matrizen dargestellt. Je

nach Detaillierungsgrad des Modells können Matrizen für einzelne Merkmale erzeugt werden, z.B. Matrizen je Modus, je Personengruppe, je Wegezweck oder je Zeitraum. Nach FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 36) wird in Kenngrößen- und Nachfragematrizen unterschieden:

- Die Werte einer Kenngrößenmatrix quantifizieren den Aufwand für eine Ortsveränderung zwischen zwei Verkehrszellen. Typische Aufwände sind Entfernungen, Zeiten, Kosten und Umsteigehäufigkeiten. Kenngrößenmatrizen beschreiben die Qualität des Verkehrsangebots.
- Nachfragematrizen (auch Wegematrix, Fahrtenmatrix oder Verkehrsstrommatrix genannt) enthalten die Menge der Ortsveränderungen zwischen Verkehrszellen (siehe Abbildung 3).

nach d von o	1	...	d	...	Z	Σ produziert
1	d_{11}					d_1^p
...						
o			d_{od}			$d_o^p = \sum_{d \in Z} d_{od}$
...						
Z					d_{ZZ}	d_Z^p
Σ angezogen	d_1^a		$d_d^a = \sum_{o \in Z} d_{od}$		d_Z^a	Gesamtverkehr = Σ produzierter Verkehr = Σ angezogener Verkehr $d = \sum_{o \in Z} d_o^p = \sum_{d \in Z} d_d^a$ $= \sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}$
Erläuterung: d_{od} Verkehrsnachfrage der Verkehrsbeziehung von Verkehrszelle o nach Verkehrszelle d d_z^p produzierter Verkehr der Verkehrszelle z , d.h. Ortsveränderungen mit Quelle in Verkehrszelle z d_z^a angezogener Verkehr der Verkehrszelle z , d.h. Ortsveränderungen mit Ziel in Verkehrszelle z d Gesamtverkehr der Matrix D Z Anzahl bzw. Menge der Verkehrszellen						

Abbildung 3: Aufbau einer Nachfragematrix (Bildquelle: FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 36)).

Darüber hinaus können sich Modellergebnisse auf einzelne Netzelemente beziehen (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 37)), z.B.

- Strecken und Abbieger: Verkehrsstärke, Auslastung, Fahrtzeit.
- Haltestellen: Verkehrsstärken für Ein-, Aus- und Umsteiger, Wartezeiten.
- Linien: Einsteiger, Aussteiger, Fahrgäste, Personenkilometer, Auslastung.

Modellergebnisse können auch auf der Ebene von Verkehrszellen dargestellt werden, z.B. die Anzahl der produzierten und angezogenen Wege, die Modal-Split-Anteile des Quellverkehrs oder mittlere Aufwände des Zielverkehrs einer Verkehrszelle. Um die Modellergebnisse auf den gesamten Untersuchungsraum, Teilräume oder Mengen von Netzelementen zu beziehen, müssen sie aus mehreren kleinteiligeren Modellergebnissen aggregiert werden. Beispiele sind das Verkehrsaufkommen im Untersuchungsraum oder die mittlere Verkehrsstärke einer bestimmten Straßenklasse. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 37))

2.4 Verkehrsnachfragemodelle

Im Folgenden werden die Typologien von Verkehrsnachfragemodellen sowie Methoden der Modellbildung erläutert.

2.4.1 Typologien von Verkehrsnachfragemodellen

Anhand ihrer Eigenschaften bzw. ihrer Modellarchitektur lassen sich Verkehrsnachfragemodelle verschiedenen Typen zuordnen. Im Folgenden werden für diese Arbeit relevante Typisierungen beschrieben. Weitere Typisierungen finden sich z.B. in FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 19 ff.).

2.4.1.1 Abgrenzung mikroskopischer und makroskopischer Verkehrsnachfragemodelle

Ein **mikroskopisches Nachfragemodell**³ bildet die Entscheidungen einzelner Personen im Untersuchungsraum ab. Die abgebildeten Personen entstammen dabei in der

³ Häufig werden mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle auch mit dem englischen Begriff „activity-based“ bezeichnet. Ursprünglich entstand der Begriff „activity-based models“ (ABM), um sich von klassischen makroskopischen Einzelwegmodellen abzugrenzen, die den Fokus weniger auf der eigentlichen Aktivität, sondern eher auf den Wegen zwischen Quelle und Ziel der Ortsveränderung legten. In aktuellen makroskopischen Modellen ist der Auslöser einer Ortsveränderung jedoch ebenso das Bedürfnis einer Aktivität nachzugehen. Daher können

Regel einer synthetischen Bevölkerung, die auf Grundlage einer Haushaltsbefragungsstichprobe erzeugt wird (siehe z.B. VON SCHMIDT ET AL. (2017)). Das ist notwendig, da Haushaltsbefragungen im Untersuchungsraum selten mit einer ausreichend großen und detaillierten Stichprobe realisiert werden können, um die gesamte Bevölkerung abzubilden. Eine Person dieser synthetischen Bevölkerung, die oft als Agent bezeichnet wird, wird durch eine Reihe von Attributen beschrieben (z.B. Wohnort, Arbeitsort, Pkw-Besitz). Diese mikroskopischen Agenten treffen stochastische Entscheidungen auf individueller Ebene. In einer Entscheidungssituation wählen sie aus einer Menge von Alternativen genau eine Alternative, z.B. einen bestimmten Modus. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 27 f.))

In einem mikroskopischen Verkehrsnachfragemodell können die Agenten häufig auf ein eigenes „Gedächtnis“ zurückgreifen, das Erfahrungen (z.B. Reisezeiten) aus vorangegangenen „Tagen“ speichert. Diese „Erfahrungen“ können spätere Entscheidungen beeinflussen. Die Agenten passen ihre Entscheidungen dabei autonom an, wodurch sich in Zusammenspiel mit den Entscheidungen der anderen Agenten ein Verkehrszustand ergibt. Die Agenten bewerten diesen Zustand mit einem nutzenbasierten Ansatz, woraufhin sie ihre Entscheidungen in der nächsten Iteration ggf. verändern. Diese vielfach wiederholte Rückkopplung bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes lässt sich als Lernprozess interpretieren. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 27 f.))

Ein mikroskopisches Verkehrsnachfragemodell liefert als (Zwischen-) Ergebnis einzelne Ortsveränderungen individueller Agenten, wobei für jede Ortsveränderung unter anderem folgende Attribute protokolliert werden können: Agentennummer, Wegezweck, Quelle, Ziel, Modus und Route. Die Verkehrsstärke auf einem Netzelement ergibt sich aus der Summe über alle Agenten, die das Netzelement nutzen. Verkehrsstärken eines einzelnen mikroskopischen Berechnungslaufes (Simulation) sind daher immer ganzzahlig. Da die Agenten stochastische Entscheidungen treffen, werden die Berechnungsläufe mehrfach wiederholt und gemittelt. Somit ergeben sich statistisch abgesicherte Ergebnisse. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 27 f.))

Mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle werden häufig um eine Entscheidung über die Dauer und Reihenfolge von Aktivitäten erweitert. Sie werden dann auch tages- oder wochenplanbasierte Modelle genannt. Diese Möglichkeit zur Abbildung von Aktivitätsprogrammen, die Möglichkeit zur Abbildung komplexer Zusammenhänge im Haushaltskontext und die Möglichkeit, Aussagen zu Agenten im Netz zu treffen, sind Vorteile der mikroskopischen gegenüber den makroskopischen Modellansätzen. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 29), SIMON ET AL. (2020, S. 15))

Allgemein versprechen mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle durch die Modellierung von einzelnen Agenten inklusive ihrer individuellen Eigenschaften eine realisti-

diese Modelle auch als aktivitätenbasiert bezeichnet werden. Um hier einer Verwirrung vorzubeugen werden die mikroskopischen Verkehrsnachfragemodelle im Folgenden nicht als „activity-based“ bezeichnet.

schere Abbildung von menschlichem Verhalten. Zudem ist mit ihnen eine höhere räumlich und zeitliche Auflösung möglich. Die Nachteile von mikroskopischen Verkehrsnachfragemodellen sind ein höherer Modellierungsaufwand, ein größerer Datenbedarf und eine hohe Berechnungszeit bedingt durch die notwendige hohe Simulationsanzahl. (McNALLY & RINDT (2010, S. 57 ff.), ORTÚZAR & WILLUMSEN (2011, S. 485 ff.), PTV AG (2020))

Makroskopische Verkehrsnachfragemodelle fassen die Objekte der realen Welt in aggregierten Größen zusammen, z.B. einzelne Personen in Personengruppen oder einzelne Fahrzeuge in Verkehrsstärke einer Strecke. Die Personen einer Personengruppe werden nicht individuell modelliert, sie haben daher auch kein eigenes „Gedächtnis“. Aus diesem Grund sind auch keine entscheidungsrelevanten Attribute einzelner Agenten oder frühere Entscheidungen der Agenten bekannt. In makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen werden die Kenngrößen einer Route oder Verbindung (z.B. Reisezeiten oder Kosten) in einer Kenngrößenmatrix auf der Ebene der Quelle-Ziel-Relationen oder in der Umlegung auf der Ebene von Routen oder Verbindungen gespeichert. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 27 f.))

In mikroskopischen und makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen werden die Alternativen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit gewählt. Im Gegensatz zu den mikroskopischen Modellen werden bei makroskopischen Modellen nicht individuelle Ortsveränderungen, sondern die Menge der Ortsveränderungen zwischen Verkehrszellen und Verkehrsstärken auf Routen bzw. Verbindungen ermittelt. Die Verkehrsstärke auf einem Netzelement ergibt sich aus der Summe der Verkehrsstärken aller Routen bzw. Verbindungen, die über das Netzelement führen. Verkehrsstärken eines makroskopischen Verkehrsnachfragemodells sind (positive) reelle Zahlen. Weil diese Modelle damit das durchschnittliche Verhalten der Bevölkerung in einer eindeutigen, reproduzierbaren Lösung modellieren, ist nur ein Berechnungslauf (Simulation) notwendig. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 27 f.))

In konkreten Anwendungen lassen sich mikroskopische und makroskopische Modellansätze (sowohl verkehrsnachfrage- als auch verkehrsflusseitig) kombinieren, z.B. in Ridesharing-Bündelungsalgorithmen (siehe z.B. FRIEDRICH ET AL. (2018)) oder in Softwareprodukten wie dem MaaS-Modeller oder der simulationsbasierten dynamischen Umlegung in PTV VISUM 2020 (PTV (2020, S. 3091 ff., 528 ff.)).

Makroskopische Verkehrsnachfragemodelle sind in der Verkehrsplanungspraxis weit verbreitet: es gibt ca. 70 „große“ Modelle auf Bundes-, Landes- oder Stadtregionsebene und ca. 1.500 projektspezifische temporäre Modelle (FGSV (2013)). Es dominieren hierbei zwei verschiedene Modelltheorien:

- aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle und
- aktivitätenbasierte Aktivitätenkettenmodelle.

2.4.1.2 Abgrenzung Einzelwegmodelle und Wegekettenmodelle

Aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle bestimmen Ortsveränderungen zwischen Verkehrszellen ohne den Kontext innerhalb einer Aktivitätenkette zu berücksichtigen. Dazu werden die Aktivitätenketten in Teilketten mit genau einem Weg, d.h. mit einer Quelle und einem Ziel, unterteilt. Ein solches Aktivitätenpaar⁴ wird durch die Aktivität an der Quelle und durch die Aktivität am Ziel charakterisiert. Hierbei werden Gruppen mit Wohnortbezug (z.B. „Wohnen – Arbeiten“) und Gruppen ohne Wohnortbezug (z.B. „Arbeiten – Einkaufen“) unterschieden, weil unter anderem nur für die wohnortgebundenen Wege Referenzdaten vorliegen, z.B. aus dem Wegetagebuch einer Haushaltsbefragung. Aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle erfordern Randsummenausgleiche in der Verkehrserzeugung, damit für jede Verkehrszelle die Anzahl der produzierten und angezogenen Wege gleich ist. Inkonsistente Ergebnisse können dennoch auftreten, wenn sich der Modal-Split für Hin- und Rückrichtung einer Relation aufgrund des Verkehrsangebots unterscheidet. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 29))

Aktivitätenbasierte Wegekettenmodelle betrachten alle Wege bzw. Aktivitäten einer Person während einer geschlossenen Rundtour – vom Verlassen der Wohnung bis zur Rückkehr. Es entstehen dadurch sogenannte Aktivitätenketten, z.B. Wohnen – Arbeiten – Einkaufen – Wohnen. Wichtig für die Modellierung sind die Auftretenshäufigkeiten jener Aktivitätenketten (Verkehrserzeugung). Auf die Verkehrserzeugung folgend wird jeder Aktivität der Kette ein Aktivitätenort zugewiesen (Zielwahl). So wird die Aktivitätenkette in eine Wegekette mit Ortsbezug überführt. Die Ziel- und Moduswahl aktivitätenbasierter Wegekettenmodelle betrachtet stets die gesamte Aktivitätenkette und verhindert so (modelltechnisch gesehen) unplausible Verkehrsmittelübergänge, z.B. vom Modus „Pkw-Selbstfahrende“ zum Modus „Pkw-Mitfahrende“. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 29))

Eine wichtige Eigenschaft von aktivitätenbasierten Wegekettenmodellen ist die Möglichkeit, die langfristige Zielwahl übergeordneter Pflichtaktivitäten (z.B. Arbeiten) von der Zielwahl der anderen Aktivitäten zu entkoppeln. Dieses Einhängen von Nicht-Pflichtaktivitätenorten zwischen Wohn- und Pflichtaktivitätenort wird als Rubberbanding (PTV (2018, S. 230 ff.), TFR (2020b)), bipolares Zielwahlmodell (SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 211)) oder Ellipsenkonzept (JUSTEN ET AL. (2013, S. 147)) bezeichnet. Die Wahl eines Nicht-Pflichtaktivitätenortes hängt dabei vom kombinierten Aufwand der Ortsveränderungen zwischen Wohnung, Nicht-Pflichtaktivitätenort und Pflichtaktivitätenort ab. (WABMUTH (2001, S. 71 ff.), SIMON ET AL. (2020, S. 10))

Hinsichtlich eines Vergleichs von aktivitätenbasierten Einzelwegmodellen und aktivitätenbasierten Wegekettenmodellen stellen FRIEDRICH ET AL. (2019c) fest, dass Erstgenannte zu große Vereinfachungen vornehmen, während Letztere mit sehr differenzierten Annahmen rechnen und damit quasi eine Scheingenauigkeit widerspiegeln. So werden

⁴ SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 105) bezeichnen Aktivitätenpaare als Quelle-Ziel-Gruppen. Konkret definieren sie eine Quelle-Ziel-Gruppe als Verbindung der Flächennutzungsmerkmale einer Person und deren Ortsveränderungsaktivität.

bei der Verkehrserzeugung in aktivitätenbasierten Wegekettenmodellen Personengruppen typischerweise nach Pkw- oder Zeitkartenbesitz differenziert. Das setzt voraus, dass Verkehrserzeugungs-, Ziel- und Moduswahlparameter für alle Gruppen und Aktivitätenketten geschätzt werden können. Eine solche Differenzierung der Personengruppen wäre untypisch für aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle.

Zusätzlich sind Aktivitätenketten teilweise sehr lang und müssen somit gekürzt oder vereinfacht werden (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 74)). Beispielsweise kann die Aktivitätenkette Wohnen – Einkaufen – Einkaufen – Einkaufen – Einkaufen – Wohnen (WEEEEW) unter anderem gekürzt bzw. vereinfacht werden zu:

- Fall 1: Wohnen – Einkaufen – Wohnen (WEW) oder
- Fall 2: 2 x (Wohnen – Einkaufen – Einkaufen – Wohnen) (2 x WEEW).

In Fall 1 führt die Kürzung zu einer zu geringen Anzahl von Wegen; in Fall 2 erzeugt die Vereinfachung zu viele Wege mit Wohnortbezug. Allgemein haben aktivitätenbasierte Wegekettenmodelle dadurch den Nachteil, dass das Verkehrsaufkommen stärker kalibriert werden muss. Aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle hingegen können das Verkehrsaufkommen in der Regel direkt aus den Wegetagebüchern der Haushaltsbefragung ableiten. Ihr Nachteil besteht darin, dass durch Zusammenfassen zum Teil Informationen verloren gehen (z.B. in der Aktivität Sonstiges bzw. im Aktivitätenpaar Sonstiges-Sonstiges) und dass sie in der Zielwahl den räumlichen Bezug zu Wohnort und Pflichtaktivität nur begrenzt abbilden können.

2.4.2 Modellbildung

Für Verkehrsnachfragemodelle gilt wie für alle Modelle, dass sie die Realität nur vereinfacht und reduziert auf bestimmte Eigenschaften abbilden. Im Rahmen der Modellbildung muss entschieden werden, welche Eigenschaften in welchem Detaillierungsgrad abgebildet werden. FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 71 ff.) geben einen sehr umfassenden Überblick über den Stand der Verkehrsnachfragemodellierung für die Themen: Entscheidungsmodelle, Verkehrserzeugungsmodelle, Zielwahlmodelle, Moduswahlmodelle, simultane Verkehrserzeugungs- und Moduswahlmodelle, simultane Ziel- und Moduswahlmodelle, Abfahrtszeitwahlmodelle, Umlegungsmodelle für den Individualverkehr (IV) und den öffentlichen Verkehr (ÖV), Rückkopplungen zwischen den Modellstufen, Einsatz von Korrekturverfahren, Festlegung des Planungs- und Untersuchungsraums, Abbildung von Raum- und Siedlungsstruktur, Abbildung des Verkehrsangebots, Abbildung der Verkehrsnachfrage im Personen-, Wirtschafts- und Eventverkehr, Berücksichtigung von Sharingangeboten und externem Verkehr sowie Erstellung von Prognosen. Das Ziel des folgenden Kapitels ist es nicht, diese Empfehlungen zu wiederholen. Stattdessen werden im Folgenden besondere Aspekte der Modellbildung herausgehoben. Für weitere Informationen sei auf FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 71 ff.) verwiesen.

Hinsichtlich des abzubildenden Detaillierungsgrades lassen sich in inhaltliche, räumliche und zeitliche Komponenten differenzieren. Grundsätzlich gilt: je feiner das Angebot bzw. die Nachfrage segmentiert ist, desto feiner kann das Modell Entscheidungsprozesse abbilden. Der Grad der Segmentierung wird von der Datenverfügbarkeit, den geplanten Einsatzbereichen und dem akzeptierten Fehler durch eine zu grobe bzw. zu feine Spezifizierung (siehe auch Kapitel 3.3.1.1) bestimmt.

- Inhaltliche Segmentierung: Inhaltlich wird die Bevölkerung des Untersuchungsraums (und ggf. ein- und auspendelnde Personen) in verhaltenshomogene Personengruppen eingeteilt. Zusätzlich werden Wegezwecke und Modi unterschieden. Weitere Informationen zur inhaltlichen Segmentierung finden sich z.B. in SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 161 ff.), ORTÚZAR & WILLUMSEN (2011, S. 139 ff.) und FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 118 ff., 125 ff.).
- Räumliche Segmentierung: Die räumliche Segmentierung betrifft die Strukturierung der Verkehrszellen, den Detaillierungsgrad des Verkehrsnetzes und die Abgrenzung von Planungs-, Untersuchungs-, Einfluss- und Außenraum⁵ (siehe Abbildung 4, links). Nur Wege des Binnenverkehrs (Wege mit Quelle und Ziel im Untersuchungsraum) werden komplett im Modell berechnet. Wege des Quell-, Ziel- und Durchgangsverkehrs werden in der Regel aus externen Datenquellen (z.B. übergeordneten Modellen) übernommen (siehe Abbildung 4, rechts). (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 31)) Weitere Informationen zur räumlichen Segmentierung finden sich z.B. in SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 88 ff.), ORTÚZAR & WILLUMSEN (2011, S. 128 ff.) und FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 115 ff.).
- Zeitliche Segmentierung: Für die zeitliche Segmentierung muss der Zeitraum, für den die Nachfrage modelliert wird, festgelegt werden. Darüber hinaus kann das Modell zeitlich statisch oder dynamisch sein. Weitere Informationen zur zeitlichen Segmentierung finden sich z.B. in SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 168 f.) ORTÚZAR & WILLUMSEN (2011, S. 141) und FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 91 ff.).

Alle Entscheidungen, die im Rahmen der Modellbildung getroffen werden müssen, haben letztlich Einfluss auf die Modellergebnisse und ihre Interpretation. So zeigt beispielsweise FRIEDRICH (2011, S. 13 ff.) den jeweiligen deutlichen Einfluss der Verkehrszellengröße, der Unterscheidung von Wegezwecken und der Wahl des Anbindungsknotens auf die Modellergebnisse.

⁵ „Der Planungsraum umfasst den Raum, in dem Maßnahmen untersucht werden. Der Untersuchungsraum beinhaltet neben dem Planungsraum den Einflussraum, in dem die Maßnahmen Wirkungen auf die Verkehrsnachfrage haben. Der Außenraum dient zur Abbildung der verkehrlichen Interaktion des Untersuchungsraums mit dem Rest der Welt.“ (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 31 f.))

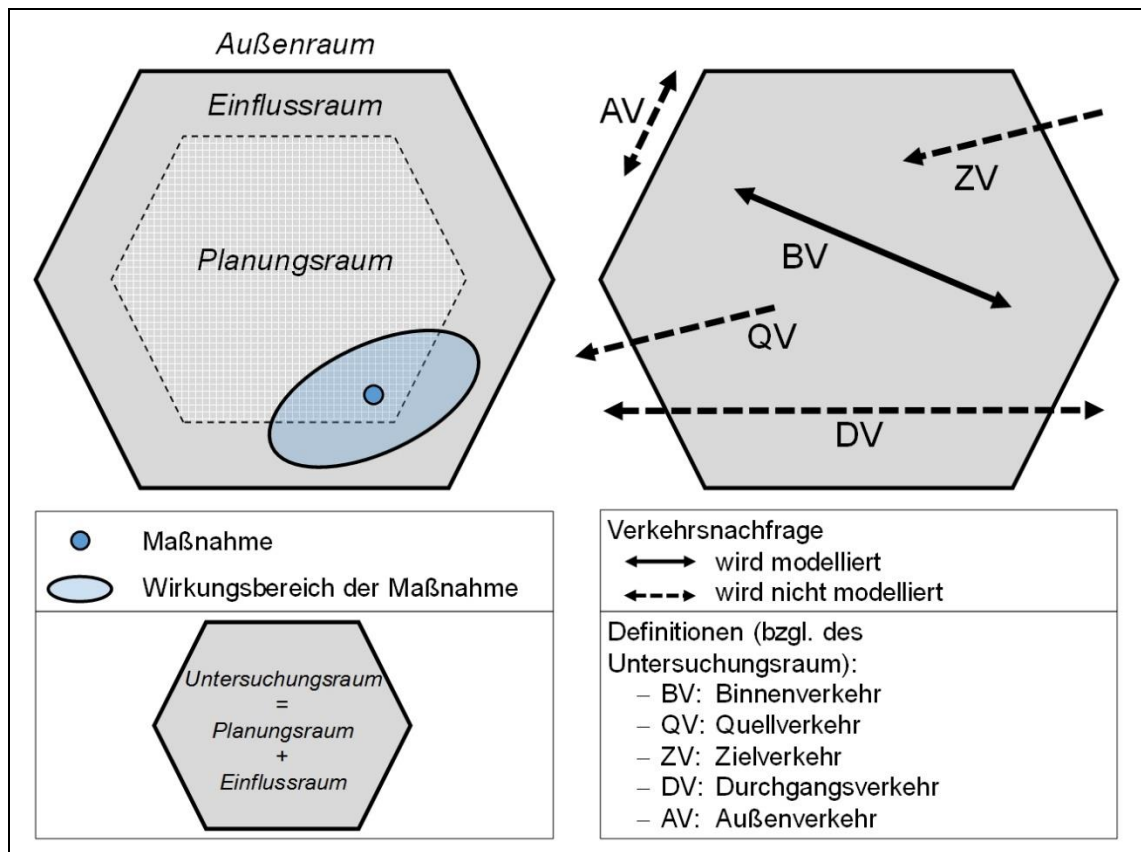


Abbildung 4: Räume (links) und Verkehrsarten (rechts) in einem Verkehrsnachfragemodell (Bildquelle: FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 32)).

2.4.2.1 Vier-Stufen-Algorithmus

Die Ursprünge der Verkehrsnachfragemodellierung finden sich in den 1950er Jahren in den USA in Detroit und Chicago (BATES (2010, S. 11)). Der damals entwickelte Vier-Stufen-Algorithmus beschreibt die klassischen vier Teilmodelle (bzw. Modellstufen) eines Verkehrsnachfragemodells (siehe Abbildung 5):

- Verkehrserzeugung (oder Aktivitätenwahl),
- Zielwahl (oder Verkehrsverteilung),
- Moduswahl (oder Verkehrsaufteilung) und
- Umlegung (inkl. Routen- bzw. Verbindungssuche und Routen- bzw. Verbindungswahl).

Typischerweise werden die Modellstufen sequentiell (einzeln und nacheinander) berechnet. Im Folgenden wird der Vier-Stufen-Algorithmus als ein aktivitätenbasiertes Einzelwegmodell beschrieben. Ein weiteres aktivitätenbasiertes Einzelwegmodell, das eine Variation des Vier-Stufen-Algorithmus verwendet, wird in Kapitel 2.4.2.2 vorgestellt. Eine Variante von aktivitätenbasierten Wegekettensmodellen, die eine abgewandelte Form des Vier-Stufen-Algorithmus nutzen, wird im Kapitel 2.4.2.3 näher erläutert.

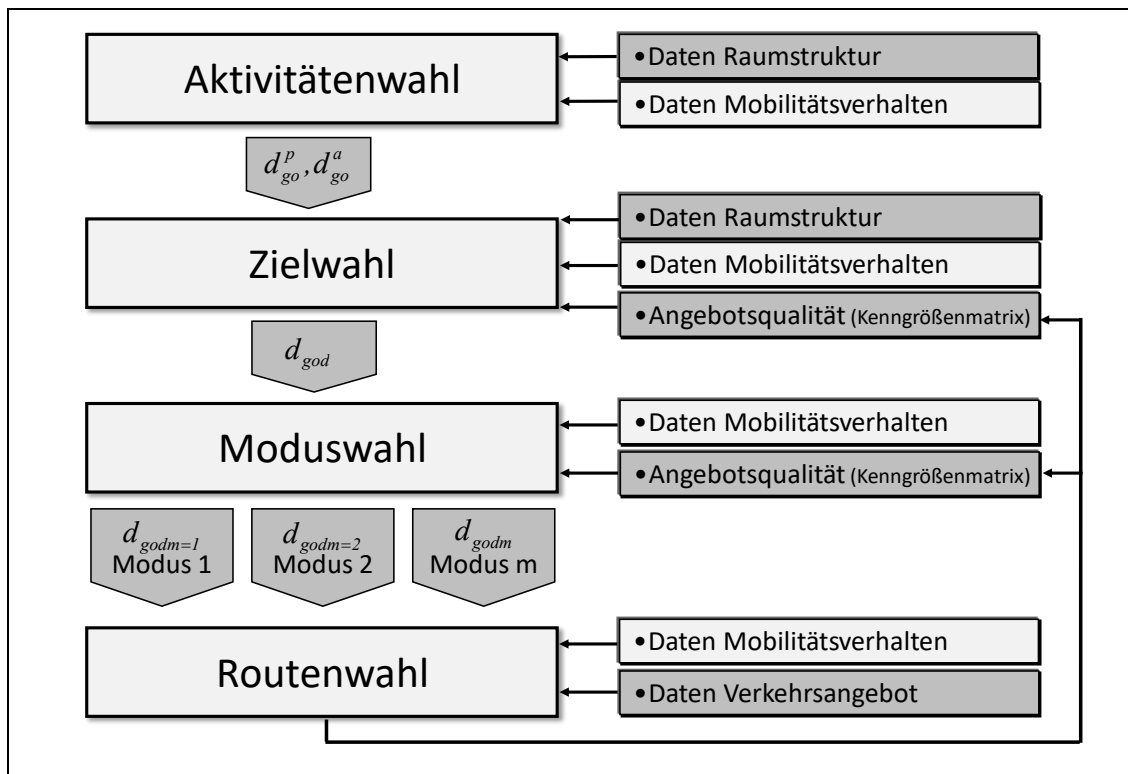


Abbildung 5: Das Vier-Stufen Modell mit den wesentlichen Eingangsgrößen: Siedlungsstrukturdaten, Verhaltensdaten, Verkehrsangebotsdaten (Bildquelle: FRIEDRICH (2019, S. 56)).

Verkehrserzeugung

Im Schritt der Verkehrserzeugung (oder Aktivitätenwahl) wird das Verkehrsaufkommen, d.h. die Anzahl an Ortsveränderungen, differenziert für die Nachfragegruppen g^6 auf Grundlage der Flächennutzung berechnet. Es wird zwischen produziertem Verkehr an der Quelle einer Ortsveränderung (Produktion) und angezogenem Verkehr am Ziel einer Ortsveränderung (Attraktion) unterschieden. Verkehrserzeugungsmodelle können folgende Ausprägung haben (SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 149 ff.)):

- Schätzmodelle: Das Verkehrsaufkommen wird aus empirischen Kennwerten oder Erfahrungen abgeleitet, z.B. jede Person erzeugt drei Wege pro Tag.
- Steigerungsfaktorenmodelle: Ein (bekanntes) Verkehrsaufkommen des Analysefalls wird aufgrund der Entwicklung von relevanten Siedlungsstrukturgrößen fortgeschrieben.

⁶ Eine Nachfragegruppe g kann alle Ortsveränderungen eines Wegezwecks (zur Arbeit), eines Aktivitätenpaares (z.B. Wohnen – Arbeiten), einer Aktivitätenkette (z.B. Wohnen – Arbeiten – Einkaufen – Wohnen) oder eines Teiluntersuchungsraums umfassen, die von einer Personengruppe (z.B. Erwerbstätige mit Pkw-Besitz) durchgeführt werden.

- Regressionsmodelle: Das Verkehrsaufkommen wird als Funktion in Abhängigkeit der relevanten Siedlungsstrukturgrößen beschrieben. Die Funktion wird mit einer Regressionsanalyse bestimmt.
- Kennwertmodelle: Das Verkehrsaufkommen wird für jedes Aktivitätenpaar innerhalb einer Aktivitätenkette berechnet. Sie werden typischerweise für die Modellierung von aktivitätsbasierten Einzelwegmodellen verwendet und daher im Folgenden näher beschrieben.

Die Basis des Kennwertmodells der Verkehrserzeugung sind die Aktivitätenpaare innerhalb einer Aktivitätenkette. Es lassen sich drei Typen von Aktivitätenpaaren unterscheiden:

- Typ 1: Die Ortsveränderung beginnt am Wohnort (bzw. am Pflichtaktivitätenort).
- Typ 2: Die Ortsveränderung endet am Wohnort (bzw. am Pflichtaktivitätenort).
- Typ 3: Die Ortsveränderung hat keinen Bezug zum Wohnort (bzw. zum Pflichtaktivitätenort).

Tabelle 2 zeigt eine Einteilung mit acht Aktivitäten und 17 Aktivitätenpaaren inkl. ihrer Typisierung.

Quelle \ Ziel	W	A	K	B	D	E	F	S
Wohnen (W)	-	WA (1)	WK (1)	WB (1)	WD (1)	WE (1)	WF (1)	WS (1)
Arbeit (A)	AW (2)	-	AS (1)					
Kindereinrichtung (K)	KW (2)	SA (2)	SS (3)					
Bildung (B)	BW (2)							
Dienstliche Erledigung (D)	DW (2)							
Einkaufen (E)	EW (2)							
Freizeit (F)	FW (2)							
Sonstiges (S)	SW (2)							

Tabelle 2: Einteilung mit acht Aktivitäten und 17 Aktivitätenpaaren mit ihrem jeweiligen Typ (Klammerwert) (Quelle: SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 163)).

Jedem Aktivitätenpaar werden maßgebende Personengruppen und Siedlungsstrukturgrößen unter Berücksichtigung von sachlogischen Zusammenhängen zugeordnet (siehe Tabelle 3).

Aktivitäten-paar	maßgebende Personengruppe bzw. Siedlungsstrukturgröße der Quellverkehrszone	maßgebende Personengruppe bzw. Siedlungsstrukturgröße der Zielverkehrszone
WA	Erwerbstätige	Arbeitsplätze
WK	Kleinkinder	Kindergartenplätze
WB	Schüler, Auszubildende, Studierende	Schul- bzw. Studienplätze
WD	Erwerbstätige	Arbeitsplätze
WE	Einwohner	Verkaufsfläche
WF	Einwohner	Potenzial bzw. Kapazität der Einrichtung
WS	Einwohner	Sonstige Siedlungsstrukturgrößen
AS	Arbeitsplätze	Sonstige Siedlungsstrukturgrößen
AW	Arbeitsplätze	Erwerbstätige
KW	Kindergartenplätze	Kleinkinder
BW	Schul- bzw. Studienplätze	Schüler, Auszubildende, Studierende
DW	Arbeitsplätze	Erwerbstätige
EW	Verkaufsfläche	Einwohner
FW	Potenzial bzw. Kapazität der Einrichtung	Einwohner
SW	Sonstige Siedlungsstrukturgrößen	Einwohner
SA	Sonstige Siedlungsstrukturgrößen	Arbeitsplätze
SS	Sonstige Siedlungsstrukturgrößen	Sonstige Siedlungsstrukturgrößen

Tabelle 3: Mögliche Zuordnung von maßgebenden Personengruppen und Siedlungsstrukturgrößen zu Aktivitätenpaaren (Quelle: in Anlehnung an SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 150)).

Für die Berechnung des verkehrszellenfeinen Verkehrsaufkommens werden neben den verkehrszellenfeinen Ausprägungen von Personengruppen und Siedlungsstrukturgrößen folgende Verhaltenskennwerte benötigt:

- Die Produktionsraten beschreiben die mittlere Wegeanzahl pro Tag und Person. SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 162) bezeichnen die Produktionsrate als spezifisches Verkehrsaufkommen.
- Die Attraktionsrate ist ein Maß für die mittlere Wegeanzahl pro Tag und Siedlungsstrukturgröße. SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 165) bezeichnen die Attraktionsrate als Erzeugungsrate.
- Die Untersuchungsraumanteile sind Faktoren für den Binnenverkehr im Untersuchungsraum.

$$d_{go}^p = u_{go}^p \cdot \sum_{k \in K} \beta_{kg}^p \cdot z_{ok} \quad (8)$$

$$d_{gd}^a = u_{gd}^a \cdot \sum_{k \in K} \beta_{kg}^a \cdot z_{dk} \quad (9)$$

mit

d_{go}^p	produzierte Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Quellverkehrszelle o
d_{gd}^a	angezogene Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Zielverkehrszelle d
$\beta_{kg}^p, \beta_{kg}^a$	Produktions- bzw. Attraktionsrate: Zahl der Ortsveränderungen, die von einer Nachfragegruppe g für die Siedlungsstrukturgröße k erzeugt bzw. angezogen werden
u_{go}^p, u_{gd}^a	Untersuchungsraumanteil: Anteil der Ortsveränderungen des produzierten Verkehrs in der Quellverkehrszelle o bzw. des angezogenen Verkehrs in der Zielverkehrszelle z , deren Quelle und Ziel im Untersuchungsraum liegt
z_{ok}, z_{dk}	Wert einer Siedlungsstrukturgröße k in der Quellverkehrszelle o bzw. Zielverkehrszelle d (z.B. Personen einer Personengruppe, Arbeitsplätze, Einkaufsmöglichkeiten)
K	Menge der Siedlungsstrukturgrößen

Nach SCHILLER (2007, S. 55 ff.) kann das Verkehrsaufkommen in verschiedenem Umfang von den Siedlungsstrukturgrößen (inkl. ihrer Kapazitäten) und den Erreichbarkeiten der Verkehrszellen abhängen. In Folge dieser Abhängigkeiten ergeben sich nach FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 259) folgende Randsummenbedingungen für das Verkehrsaufkommen:

- **Harte (bzw. unelastische) Randsummenbedingungen:**
Das Quell- und Zielverkehrsaufkommen der Verkehrszellen wird ausschließlich durch die maßgebenden Siedlungsstrukturdaten (und ihre Kapazitäten bestimmt). Die Erreichbarkeit der Verkehrszellen hat in diesem Fall keinen Einfluss auf die Verkehrserzeugung. Dies ist in der Regel für Wege mit Pflichtaktivitäten der Fall. Die Implementierung des Vier-Stufen-Algorithmus in PTV VISUM 18 rechnet ausschließlich mit harten Randsummenbedingungen (PTV (2018, S. 175 ff.)).

$$\begin{aligned}
 d_{go}^{p,\min} &= d_{go}^p = \sum_{d \in Z} d_{god} = d_{go}^{p,\max} \\
 d_{gd}^{a,\min} &= d_{gd}^a = \sum_{o \in Z} d_{god} = d_{gd}^{a,\max}
 \end{aligned} \tag{10}$$

- **Weiche (bzw. elastische) Randsummenbedingungen:**
Wenn das Quell- und Zielverkehrsaufkommen der Verkehrszellen in der Verkehrserzeugung nur bedingt durch die maßgebenden Siedlungsstrukturdaten (im Sinne einer minimal nötigen und maximal möglichen Wegeanzahl) bestimmt werden kann und somit deren Erreichbarkeit ebenfalls in die Berechnung einfließt, werden weiche Randsummenbedingungen verwendet. Dies ist typischerweise für Wege mit substituierbaren Aktivitäten (z.B. Einkaufen) der Fall.

$$\begin{aligned}
d_{go}^{p,\min} \leq d_{go}^p = \sum_{d \in Z} d_{god} \leq d_{go}^{p,\max} & \quad ; \quad d_{go}^{p,\min} < d_{go}^{p,\max} \\
d_{gd}^{a,\min} \leq d_{gd}^a = \sum_{o \in Z} d_{god} \leq d_{gd}^{a,\max} & \quad ; \quad d_{gd}^{a,\min} < d_{gd}^{a,\max}
\end{aligned} \tag{11}$$

- Offene Randsummenbedingungen:

Offene Randsummenbedingungen sind ein Sonderfall der weichen Randsummenbedingungen. Die maßgebende Siedlungsstrukturgröße gibt hier kein minimal nötiges oder maximal mögliches Verkehrsaufkommen vor. Das Verkehrsaufkommen ergibt sich ausschließlich aus der Erreichbarkeit der Verkehrszellen. Dies ist in der Regel für Freizeitwege der Fall.

$$\begin{aligned}
d_{go}^{p,\min} \leq d_{go}^p = \sum_{d \in Z} d_{god} \leq d_{go}^{p,\max} & \quad ; \quad d_{go}^{p,\min} = 0 \quad ; \quad d_{go}^{p,\max} = \infty \\
d_{gd}^{a,\min} \leq d_{gd}^a = \sum_{o \in Z} d_{god} \leq d_{gd}^{a,\max} & \quad ; \quad d_{gd}^{a,\min} = 0 \quad ; \quad d_{gd}^{a,\max} = \infty
\end{aligned} \tag{12}$$

mit

d_{go}^p	produzierte Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Quellverkehrszelle o
$d_{go}^{p,\min}$	minimal produzierte Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Quellverkehrszelle o
$d_{go}^{p,\max}$	maximal produzierte Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Quellverkehrszelle o
d_{gd}^a	angezogene Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Zielverkehrszelle d
$d_{gd}^{a,\min}$	minimal angezogene Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Zielverkehrszelle d
$d_{gd}^{a,\max}$	maximal angezogene Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Zielverkehrszelle d
d_{god}	Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d
K	Menge der Siedlungsstrukturgrößen

Zielwahl

In der Zielwahl (oder Verkehrsverteilung) werden die Ortsveränderungen zwischen einer Quellverkehrszelle o und einer Zielverkehrszelle d berechnet. Dazu wird der produzierte Verkehr aller Quellverkehrszellen o auf die möglichen Zielverkehrszellen d verteilt. Bei der Berechnung werden unter anderem der Grund der Ortsveränderung (Wegezzweck), die Attraktion der Zielverkehrszellen d , der Aufwand (Kosten, Reiseweiten, Reisezeiten) für die Durchführung der Ortsveränderung und dessen Bewertung durch die Verkehrsteilnehmenden berücksichtigt. Unter Umständen müssen Randsummenbedingungen für bestimmte Aktivitätenpaare eingehalten werden, z.B. dass jeder Arbeits- oder Schulplatz nur von einer Person belegt wird (harte Randsummenbedingungen) oder dass es eine Mindestanzahl an Kunden für einen Einkaufsstandort gibt (weiche Randsummenbedingungen). Gegebenenfalls wird eine separate Zielwahl für langfristige (Pflicht-) Aktivitäten, z.B. die Auswahl des Arbeitsplatzes, durchgeführt. Konkurrieren zwei oder mehr Personengruppen um die gleiche Siedlungsstrukturgröße (z.B. Arbeitsplätze) empfiehlt sich ein personengruppenübergreifender Randsummenausgleich, der in Kapitel 2.4.2.4 näher beschrieben wird. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 75 ff.))

Es gibt eine Vielzahl an Zielwahlmodellen. Auch die Wahl der Bewertungsfunktion (siehe Kapitel 2.2) beeinflusst die Abbildung von gegebenen Raumrestriktionen. FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 291) beschreiben die Grundform eines Zielwahlmodells mit Randsummenbedingungen wie folgt:

$$d_{god} = f(v_{god}) \cdot f_{d_{go}^p} \cdot f_{d_{gd}^a} \quad (13)$$

$$v_{god} = \sum_{k \in K} \beta_{kg}^d \cdot x_{kod} \quad (14)$$

mit

d_{god} Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d

v_{god} Nutzenfunktion v für eine Ortsveränderung der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d

$f(v_{god})$ bewertete Nutzenfunktion v_{god}

$f_{d_{go}^p}$ Anpassungsfaktoren für das quellseitige Verkehrsaufkommen zur Lösung des bilinearen Gleichungssystems

$f_{d_{gd}^a}$ Anpassungsfaktoren für das zieleitige Verkehrsaufkommen zur Lösung des bilinearen Gleichungssystems

β_{kg}^d Aufwandsempfindlichkeitsparameter der Nachfragegruppe g bei der Zielwahl für die k . Kenngröße der Angebotsqualität

x_{kod} Wert x der Kenngröße k zur Beschreibung der Angebotsqualität zwischen den Verkehrszellen o und d

K Menge der Siedlungsstrukturgrößen

Die Randsummenbedingungen werden durch die Anpassungsfaktoren zur Lösung des bilinearen Gleichungssystems formuliert. Sie müssen hierbei in einem iterativen Prozess bestimmt werden. Typische Optimierungsalgorithmen hierfür sind der FURNESS- oder der MULTI-Algorithmus. Sie werden z.B. in SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 189 ff.) oder FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 291 ff.) detailliert beschrieben.

Eine weitere Möglichkeit, die Randsummen des Verkehrsaufkommens einzuhalten, sind Fixierungen dieser Randsummen. Während mit der Lösung des bilinearen Gleichungssystems beidseitige Randsummenbedingungen eingehalten werden können, ermöglichen Fixierungen nur eine einseitige Einhaltung. Das heißt, dass entweder die quellseitige, die zieleitige oder die wege zweckseitige Ortsveränderungsanzahl genau eingehalten wird. Vorteilhaft ist daran, dass das Lösen eines Gleichungssystems nicht nötig ist. Neben Fixierungen helfen Gewichtungen, den Bekanntheitsgrad eines Zieles (mit weichen Randsummenbedingungen) abzubilden. Als Gewichtungsrößen werden dabei in der Regel quell- oder zieleitige Siedlungsstrukturgrößenpotenziale herangezogen. (SCHILLER (2007, S. 98 ff.), FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 76 ff.))

Formel (15) zeigt im Folgenden ein typisches Beispiel für ein solches Zielwahlmodell: ein quellseitig fixiertes und zieleitig gewichtetes multinominales Logit-Modell.

$$d_{god} = d_{go}^p \frac{d_{gd}^a \cdot \exp(v_{god})}{\sum_{d \in Z} d_{gd}^a \cdot \exp(v_{god})} \quad (15)$$

mit

d_{god} Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d

v_{god} Nutzenfunktion v für eine Ortsveränderung der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d (siehe Formel (14))

d_{go}^p produzierte Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Quellverkehrszelle o

d_{gd}^a angezogene Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Zielverkehrszelle d

Z Menge der Verkehrszellen

Moduswahl

Die Moduswahl (oder Verkehrsaufteilung) teilt die Ortsveränderungen von einer Quellverkehrszelle o zu einer Zielverkehrszelle d auf die verschiedenen Modi m (z.B. Fuß, Rad, ÖV, Pkw) auf. Ein Modus umfasst dabei die Menge der Verkehrsmittel, die die Verkehrsteilnehmenden für eine Ortsveränderung benötigen. Umfasst ein Modus mehr als ein Verkehrsmittel (z.B., wenn innerhalb des Modus ÖV die Verkehrsmittel Bus und Bahn unterschieden werden), ist eine weitere Verkehrsmittelwahl nötig. Sie erfolgt meistens im Zuge der Routenwahl. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 81))

Die Berechnung der Moduswahl erfolgt häufig mit multinominalen Logit-Modellen (siehe Formel (16)). Dabei wird eine Vielzahl an Einflussgrößen berücksichtigt. Tabelle 4 gibt hierzu eine Übersicht.

$$d_{godm} = d_{god} \cdot \frac{\exp(v_{godm})}{\sum_{m \in M} \exp(v_{godm})} \quad (16)$$

$$v_{godm} = \beta_{0gm}^m + \sum_{k \in K} \beta_{kgm}^m \cdot x_{kodm} \quad (17)$$

mit

d_{godm} Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d mit dem Modus m

d_{god} Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d

v_{godm} Nutzenfunktion v für eine Ortsveränderung der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d mit dem Modus m

β_{0gm}^m modusspezifische Konstante

β_{kgm}^m Aufwandsempfindlichkeitsparameter der Nachfragegruppe g bei der Moduswahl für die k . Kenngröße der Angebotsqualität mit dem Modus m

x_{kodm} Wert x der Kenngröße k zur Beschreibung der Angebotsqualität zwischen den Verkehrszellen o und d mit dem Modus m

M Menge der Modi

K Menge der Siedlungsstrukturgrößen

Eigenschaften der Verkehrsteilnehmenden	
Lage des Wohnorts	Die Lage des Wohnorts kann die Notwendigkeit des Pkw-Besitzes beeinflussen. An Orten mit schlechter ÖV-Qualität kann der Motorisierungsgrad höher sein. Diese Eigenschaft kann durch ein vorgeschaltetes Verkehrsmittelverfügbarkeitsmodell abgebildet werden oder vereinfacht durch ein zellenspezifisches Attribut, das die ÖV-Qualitätsstufe beschreibt.
Pkw-Verfügbarkeit, Führerscheinbesitz und Zeitkarten-Verfügbarkeit	Diese Eigenschaften können über Personengruppen oder über Verkehrszellenattribute (Anteil der Personen mit Pkw-Verfügbarkeit bzw. Zeitkartenverfügbarkeit) abgebildet werden.
Haushaltsstruktur	Eigenschaften der Haushaltsstruktur (z.B. Pkw-Verfügbarkeit) können nur sehr vereinfacht über Personengruppen abgebildet werden.
Eigenschaften der Verkehrsmittel des Modus	
Zeitaufwand (Zu- und Abgangszeit, Wartezeiten, Fahrzeiten) und Umsteigehäufigkeiten	Diese Eigenschaften können direkt mit einem Verkehrsnachfragemodell berechnet und in die Nutzenfunktion integriert werden.
Kosten (Fahrpreise, Kraftstoffkosten, Straßen- und Parkplatznutzungsgebühren)	Kosten, die nicht entfernungsabhängig sind, erfordern ein Kostenberechnungsmodell. Die damit ermittelten Kosten können dann in die Nutzenfunktion integriert werden. Parkplatznutzungsgebühren hängen von der Parkdauer ab und müssen deshalb nach Wegezweck differenziert werden.
Zeitliche Verfügbarkeit (Bedienungshäufigkeit)	Aus der Bedienungshäufigkeit kann eine fiktive Wartezeit am Startort und eine Startwartezeit an der Starthaltestelle abgeleitet und in die Nutzenfunktion integriert werden. Die fiktive Wartezeit beschreibt die Zeitdifferenz zwischen der Wunschabfahrtszeit des Fahrgastes und der angebotenen Abfahrtszeit. Sie kann als Anpassungszeit bezeichnet werden. Aus der Bedienungshäufigkeit kann außerdem eine Startwartezeit abgeleitet werden. Sie beschreibt den Zeitpuffer, den ein Fahrgast für die Ankunft an der Starthaltestelle einplant.
Parkplatzverfügbarkeit	Die Parkplatzverfügbarkeit kann über ein Verkehrszellenattribut abgebildet werden.
Komfort, Bequemlichkeit, Sicherheit	Diese Eigenschaften werden üblicherweise nicht explizit modelliert und gehen über eine modusspezifische Konstante in die Nutzenfunktion ein. Der unterschiedliche Komfort eines modernen Schienenverkehrsmittels gegenüber einem Bus kann durch eine unterschiedliche Bewertung der Fahrzeit erfolgen (z.B. Schienenbonus).
Regelmäßigkeit und Zuverlässigkeit des Verkehrsangebots	Die Regelmäßigkeit und die Zuverlässigkeit des Verkehrsangebots werden bisher nicht in Modellen abgebildet. Sie gehen im Pkw-Verkehr indirekt durch die Fahrzeit im belasteten Netz ein, die auf Relationen mit hoher Auslastung (= geringere Zuverlässigkeit) stärker steigt, als auf Relationen mit geringer Auslastung.
Eigenschaften der Ortsveränderung	
Eigenschaften des Wegezwecks	Bei regelmäßigen Wegezwecken wird eine bessere Kenntnis über das Verkehrsangebot vorausgesetzt.
Eigenschaften des Fahrzeitpunktes	Das Verkehrsangebot kann für verschiedene Tageszeiten variieren, z.B. kann in den Abendstunden das ÖV-Angebot schlechter sein.

Tabelle 4: Abhängigkeiten der Moduswahl (Quelle: FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 82 f.)).

Neben dem beschriebenen einstufigen Modellansatz gibt es auch mehrstufige Moduswahlmodelle, z.B. Nested-Logit-Modelle (siehe Abbildung 6). Hierfür werden ähnliche Alternativen in Gruppen („Nestern“) zusammengefasst, z.B. Mitfahrende und Selbstfah-

rende zu Pkw. Weitere Informationen zu Theorie, Anwendung und Limitationen des Nested-Logit-Modells finden sich z.B. in BEN-AKIVA & LERMAN (2006, S. 276 ff.) und ORTÚZAR & WILLUMSEN (2011, S. 235 ff.).

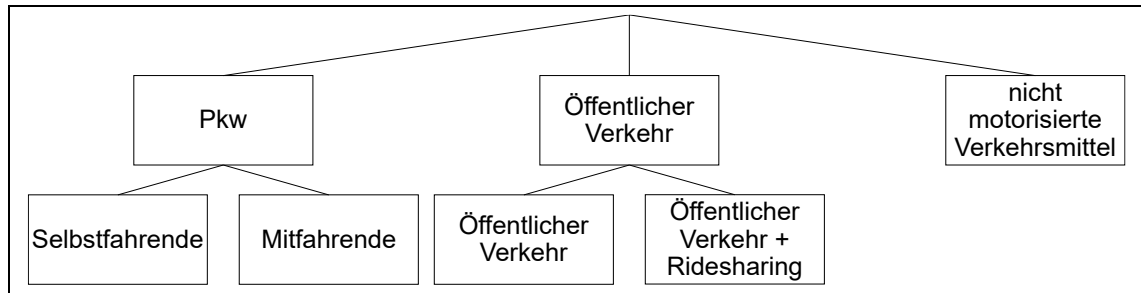


Abbildung 6: Sequentieller Entscheidungsprozess in einem Nested-Logit-Modell (Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an FRIEDRICH (2019, S. 145)).

Routen- bzw. Verbindungswahl in der Umlegung

Routen- bzw. Verbindungswahl- und Umlegungsmodelle ermitteln die möglichen Routen r im Verkehrsnetz und verteilen die Nachfrage der Modi m auf diese Routen. Mit Abschluss der Umlegung sind die Ortsveränderungen d_{godmr} bekannt. Die Aggregation aller Ortsveränderungen, deren Routen bzw. Verbindungen r über ein bestimmtes Netzelement s führen, ergibt die Verkehrsstärke q_s dieses Netzelementes für alle Verkehrsmodi (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 20 f.)):

$$q_s = \sum_{g \in G} \sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} \sum_{m \in M} \sum_{r \in R} \sum_{s \in r} d_{godmr} \quad (18)$$

mit

q_s	Verkehrsstärke q des Netzelementes s
d_{godmr}	Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d mit dem Modus m auf Route r
G	Menge der Nachfragegruppen
Z	Menge der Verkehrszellen
M	Menge der Modi
R	Menge der Routen

Nach FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 92 f.) besteht diese Modellstufe aus folgenden Teilschritten:

1. Routen- oder Verbindungssuche: Generieren der Routen- bzw. Verbindungsmenge.

2. Routen- oder Verbindungswahl: Verteilen der Verkehrsnachfrage auf die verfügbaren Routen oder Verbindungen.
3. Netzbelastung: Ermitteln der Verkehrsstärke im Netz aus der Nachfrage einer Route oder Verbindung.
4. Ermitteln von auslastungsabhängigen Widerständen (z.B. Fahrtzeit im IV oder Komfort im ÖV): Die Auslastung bzw. Verkehrsdichte ergibt sich aus den jeweiligen Verkehrsstärken und Kapazitäten der Netzelemente.
5. Prüfen einer Abbruchbedingung: Durch veränderte Auslastungen der Netzelemente ändert sich der Nutzen bzw. der Widerstand einer Routenalternative. Um diese neue Information zu berücksichtigen, werden Rückkopplungen innerhalb des Umlegungsmodelles durchgeführt. Nach jedem Iterationsschritt wird geprüft, ob ein vorgegebenes Abbruchkriterium erfüllt wird. Ist dies der Fall, wird die Umlegung beendet – wenn nicht, beginnt der beschriebene Prozess erneut.

Umlegungsmodelle sind für die weitere Arbeit von geringer Relevanz. Für weitere Informationen zu Umlegungsmodellen, insbesondere zu den Besonderheiten bei IV- und ÖV-Umlegungsmodellen, wird auf FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 92 ff.) verwiesen.

Zusätzliche Modellstufen, Reihenfolge und Zusammenfassung von Modellstufen und Rückkopplungen zwischen Modellstufen

Darüber hinaus können weitere Stufen aus Tabelle 1 (S. 8) abgebildet werden, z.B. die Abfahrtszeitwahl. Für die Abbildungsqualität eines Modells ist dies grundsätzlich von Relevanz, jedoch nicht für die vorliegende Arbeit. Daher wird hierzu auf FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 24 f.) verwiesen.

Zudem ist es möglich die Stufen Modus- und Zielwahl in anderer Reihenfolge zu berechnen. Die vorgestellte Reihung (zuerst Zielwahl, dann Moduswahl) wird als Trip-Interchange-Modell bezeichnet. Es ist ebenso möglich zuerst die Modus- und dann die Zielwahl zu berechnen. Solche Modelle werden Trip-End-Modelle genannt. Für konkrete Einsatzzwecke von Trip-End- bzw. Trip-Interchange-Modellen sei auf SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 234 f.) und FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 86 f.) verwiesen.

Die bisher beschriebene sequentielle Berechnung der einzelnen Modellstufen geht generell davon aus, dass die Wahlentscheidungen im Vier-Stufen-Algorithmus unabhängig voneinander getroffen werden. Da diese Annahme nur bedingt realistisch ist, werden Modellstufen häufig rechnerisch miteinander gekoppelt, sodass sich simultan berechnete Modellstufen⁷ ergeben. Die Modelltheorien EVA und VISEM nutzen solche simultanen Modellansätze für die Ziel- und Moduswahl (siehe Kapitel 2.4.2.2 und 2.4.2.3).

⁷ „Simultane Modellstufen werden im Gegensatz zu sequentiellen berechneten Modellstufen nicht einzeln und nacheinander berechnet, sondern in einem gemeinsamen Rechenschritt. Es

Rückkopplungen sind ein notwendiger Bestandteil eines Verkehrsnachfragemodells. Durch sie lassen sich Aufwandsänderungen, die sich in späteren Modellstufen ergeben, in den vorgelagerten Entscheidungsprozessen berücksichtigen. Rückkopplungen sind iterative Prozesse, die solange wiederholt werden, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Sie sorgen somit für ein Gleichgewicht zwischen Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage. Rückkopplungen sind essentiell für die Abbildungsqualität eines Modells. Im Rahmen dieser Arbeit sind sie jedoch nicht von Relevanz, daher wird auch hier auf FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 106 ff.) verwiesen.

2.4.2.2 EVA-Modelltheorie

EVA (**E**rzeugung, **V**erteilung, **A**ufteilung) ist die softwareseitige Umsetzung eines aktivitätenbasierten Einzelwegmodells in der Verkehrsplanungssoftware PTV VISUM. Die EVA-Modelltheorie ist eine Weiterentwicklung des klassischen Vier-Stufen-Algorithmus mit den Modellstufen Verkehrserzeugung, Zielwahl und Moduswahl. Eine Umlegung ist nicht Teil der klassischen EVA-Modelltheorie. Allgemein unterscheidet sich die EVA-Modelltheorie von der Theorie des klassischen Vier-Stufen-Algorithmus durch:

- Methoden zum Ausgleich von Differenzen im Quell- und Zielverkehrsaufkommen einer Verkehrszelle:
Die sequentielle Berechnung von Verkehrserzeugung und Zielwahl führt beim klassischen Vier-Stufen-Algorithmus zu Differenzen zwischen Quell- und Zielverkehrsaufkommen auf Verkehrszellenebene. Um diesen Effekt zu vermeiden, führen EVA-Modelle zwei Randsummenausgleiche durch:
 - Der **Randsummenausgleich 1** symmetrisiert das spezifische Verkehrsaufkommen (Produktionsrate), sodass die Verkehrsaufkommen am Wohnort identisch sind.
 - Der **Randsummenausgleich 2** gleicht Differenzen zwischen angezogenem und produziertem Verkehrsaufkommen ohne Bezug zum Wohnort (bzw. Pflichtaktivitätenort) aus, indem es die Verkehrsaufkommen der Aktivitätenpaare vom Typ 3 modifiziert.
- eine (vollständig) simultane Berechnung von Ziel- und Moduswahl:
Dazu wird die zweidimensionale Zielwahlfunktion (bilineares Gleichungssystem) um eine Modusdimension auf drei Dimensionen (trilineares Gleichungssystem) erweitert.

Im Folgenden werden die Modellstufen der EVA-Modelltheorie kurz erläutert. Ausführliche Informationen finden sich vor allem in SCHNABEL & LOHSE (1997) aber auch weiteren

wird in hierarchisch simultane und vollständig simultane Modellstufen unterschieden. Für hierarchisch simultane Modelle kommen sog. Log-Summen oder Nested-Logit-Modelle zum Einsatz. Vollständig simultane Modelle lösen ein trilineares Gleichungssystem, das die drei Wahlereignisse Quelle / Ziel / Modus abbildet. Hierfür werden spezielle Lösungsverfahren wie MULTI oder FURNESS verwendet.“ (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 260))

Veröffentlichungen der Professur für Theorie der Verkehrsplanung (TU Dresden), z.B., LOHSE ET AL. (1997), SCHILLER (2004), DUGGE (2006) und SCHILLER (2007).

Verkehrserzeugung

Die EVA-Modelltheorie nutzt das in Kapitel 2.4.2.1 beschriebene Kennwertmodell der Verkehrserzeugung. Die Berechnung wird im Folgenden verbal erläutert. Detaillierte Berechnungsvorschriften finden sich in Abbildung 39 in Anhang 1 (S. LIV) bzw. in SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 166 f.).

Je nach Typ des Aktivitätenpaares (siehe Tabelle 2 (S. 19)) werden die Verkehrsaufkommen unterschiedlich berechnet. Bei Typ 1 und 2 werden zunächst die Verkehrsaufkommen mit Wohnortbezug (bzw. Arbeitsplatzbezug) bestimmt. Dies ergibt bei Typ 1 das Quellverkehrsaufkommen und bei Typ 2 das Zielverkehrsaufkommen. Diese Verkehrsaufkommen werden dann proportional zum Potenzial ihrer Siedlungsstrukturgrößen auf alle Zielverkehrszellen (Typ 1) bzw. Quellverkehrszellen (Typ 2) verteilt. Bei harten Randsummenbedingungen werden die Verkehrsaufkommen direkt in diesem Verkehrserzeugungsschritt bestimmt. Im Fall von weichen Randsummenbedingungen werden zunächst nur minimale und maximale Verkehrsaufkommen berechnet. In einem weiteren Berechnungsschritt symmetrisiert der Randsummenausgleich 1 die spezifischen Verkehrsaufkommen für die Aktivitäten des Typs 1 und 2 (mit Bezug zum Wohnort bzw. zum Pflichtaktivitätenort). Somit gilt, dass das Quell- und Zielverkehrsaufkommen einer Verkehrszelle innerhalb eines verkehrlich geschlossenen Zeitraums (z.B. ein Tag) identisch sind. (SCHILLER (2007, S. 59))

Anschließend findet die Berechnung der Ziel- und Moduswahl statt, womit die endgültigen Verkehrsaufkommen der Typen 1 und 2 sowie das vorläufige Verkehrsaufkommen des Typs 3 (ohne Bezug zum Wohnort bzw. zum Pflichtaktivitätenort) bestimmt werden. Für Aktivitätenpaare des Typs 3 wird dazu das Gesamtverkehrsaufkommen bestimmt, das dann ebenfalls proportional zum Potenzial ihrer Siedlungsstrukturgrößen auf alle Quell- und Zielverkehrszellen aufgeteilt wird. Anschließend werden die Differenzen zwischen angezogenem und produziertem Verkehrsaufkommen ausgeglichen, indem die Verkehrsaufkommen von Aktivitätenpaaren vom Typ 3 (in der Regel das Aktivitätenpaar „Sonstiges-Sonstiges“) modifiziert werden (Randsummenausgleich 2⁸). Abschließend

⁸ Der Randsummenausgleich 2 findet nach SCHILLER (2004, S. 31) unter folgenden Bedingungen statt:

- Die Anzahl der Quellverkehrszellen ist identisch mit der Anzahl der Zielverkehrszellen.
- Die endgültigen Quell- und Zielverkehrsaufkommen von Aktivitätenpaaren der Typen 1 und 2 sind bekannt.
- Das Gesamtverkehrsaufkommen der Aktivitätenpaare vom Typ 3 ist klein genug, um die Berechnung nicht zu verfälschen.

findet eine Ziel- und Moduswahl für Aktivitätenpaare vom Typ 3 statt. (SCHILLER (2007, S. 59))

Ziel- und Moduswahl

Die EVA-Modelltheorie verwendet einen vollständig simultanen Modellansatz für die Ziel- und Moduswahl. Dazu wird das bilineare Gleichungssystem aus Formel (13) um modusspezifische Anpassungsfaktoren $f_{d_{gm}}$ erweitert.

$$d_{godm} = f(v_{godm}) \cdot f_{d_{go}}^p \cdot f_{d_{gd}}^a \cdot f_{d_{gm}} \quad (19)$$

mit

d_{godm} Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d mit dem Modus m

v_{godm} Nutzenfunktion v für eine Ortsveränderung der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d mit dem Modus m (siehe Formel (17))

$f(v_{godm})$ bewertete Nutzenfunktion v_{godm}

$f_{d_{go}}^p$ Anpassungsfaktoren für das quellseitige Verkehrsaufkommen zur Lösung des trilinearen Gleichungssystems

$f_{d_{gd}}^a$ Anpassungsfaktoren für das zieleitige Verkehrsaufkommen zur Lösung des trilinearen Gleichungssystems

$f_{d_{gm}}$ Anpassungsfaktoren für das modusseitige Verkehrsaufkommen zur Lösung des trilinearen Gleichungssystems

Wie schon das bilineare Gleichungssystem muss auch das trilineare Gleichungssystem mit Optimierungsalgorithmen wie FURNESS oder MULTI gelöst werden. Sie werden z.B. in SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 189 ff.) oder FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 291 ff.) detailliert beschrieben. Beim trilinearen Gleichungssystem gilt neben den bekannten Randsummenbedingungen eine Randsummenbedingung für die Wegeanzahl der einzelnen Modi:

$$\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{godm} = d_{gm} \quad (20)$$

mit

d_{godm} Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d mit dem Modus m

d_{gm} Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g mit dem Modus m

Z Menge der Verkehrszellen

Die Wegeanzahl der einzelnen Modi (Modal-Split) wird somit zur Lösung des Gleichungssystems benötigt. Hierbei werden zwei Fälle unterschieden (SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 258 ff.), SCHILLER (2007, S. 103)):

- Wird der Analysefall berechnet, so muss die Wegeanzahl der Modi d_{gm} vorgegeben werden. Sie kann aus empirischen oder theoretischen Untersuchungen abgeleitet werden. Nach SCHILLER (2017, S. 4) ist dies ein wichtiger Vorteil der EVA-Modelltheorie, da niemals sämtliche subjektive und objektive Einflussgrößen auf die Moduswahl im Verkehrsangebotsmodell abgebildet werden können.
- Für den Prognosezeitpunkt ist die Wegeanzahl der Modi d_{gm} unbekannt. Es wird angenommen, dass sich die Präferenzen der Verkehrsteilnehmenden hinsichtlich der einzelnen Modi (ausgedrückt durch die Anpassungsfaktoren $f_{d_{gm}}$) nicht ändern. Um die Gewichtung der Präferenzen in der Prognose zu berücksichtigen, werden die Anpassungsfaktoren $f_{d_{gm}}$ in Formel (19) durch Gewichtskonstanten c_{gm} ersetzt. Die Wegeanzahl der Modi d_{gm} ergibt sich aus der Lösung des entstehenden bilinearen Gleichungssystems.

$$d_{godm} = f(v_{godm}) \cdot f_{d_{go}^p} \cdot f_{d_{gd}^a} \cdot c_{gm} \quad (21)$$

$$c_{gm} = \frac{f_{d_{gm}}}{\sum_{m \in M} f_{d_{gm}}} \text{ wobei gilt: } \sum_{m \in M} c_{gm} = 1 \quad (22)$$

mit

d_{godm} Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d mit dem Modus m

v_{godm} Nutzenfunktion v für eine Ortsveränderung der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d mit dem Modus m (siehe Formel (17))

$f(v_{godm})$ bewertete Nutzenfunktion v_{godm}

$f_{d_{go}^p}$ Anpassungsfaktoren für das quellseitige Verkehrsaufkommen zur Lösung des bilinearen Gleichungssystems

$f_{d_{gd}^a}$ Anpassungsfaktoren für das zieleitige Verkehrsaufkommen zur Lösung des bilinearen Gleichungssystems

$f_{d_{gm}}$	Anpassungsfaktoren für das modusseitige Verkehrsaufkommen des Analysefalls
c_{gm}	Gewichtskonstante c des Modus m der Nachfragegruppe g

2.4.2.3 VISEM-Modelltheorie

VISEM (**V**erkehr **I**n **S**tädten **E**rzeugungs-**M**odell) ist die softwareseitige Umsetzung eines aktivitätenbasierten Wegekettenmodells in der Verkehrsplanungssoftware PTV VISUM (PTV (2018, S. 214 ff.)). Wie bei aktivitätenbasierten Einzelwegmodellen sind auch hier die Modellstufen Verkehrserzeugung, Zielwahl und Moduswahl vorhanden. Ziel- und Moduswahl werden hierarchisch simultan berechnet. Eine Umlegung ist nicht Teil der VISEM-Modelltheorie.

Verkehrserzeugung

Im Gegensatz zu aktivitätenbasierten Einzelwegmodellen werden bei aktivitätenbasierten Wegekettenmodellen nicht einzelne Wege, sondern ganze Aktivitätenketten erzeugt. Die Häufigkeiten der Aktivitätenketten können aus Wegetagebüchern abgeleitet werden und werden Mobilitätsraten genannt. Wie bereits in Kapitel 2.4.1.2 beschrieben, müssen lange Aktivitätenketten, die selten auftreten (z.B. Wohnen – Einkaufen – Einkaufen – Einkaufen – Wohnen) auf einfachere Ketten reduziert werden. Die Berechnung des Verkehrsaufkommens ist ähnlich der Berechnung im Kennwertmodell des Vier-Stufen-Algorithmus (siehe Kapitel 2.4.2.1). Einziger Unterschied ist, dass die produzierten und angezogenen Verkehrsaufkommen für alle Aktivitätenpaare einer Aktivitätenkette identisch sind. Das Verkehrsaufkommen jedes Aktivitätenpaares innerhalb einer Aktivitätenkette ergibt sich durch die Multiplikation der Mobilitätsrate der Aktivitätenkette mit der relevanten Personengruppengröße. Das Verkehrsaufkommen der gesamten Aktivitätenkette ergibt sich anschließend aus dem Verkehrsaufkommen der Aktivitätenpaare multipliziert mit der Anzahl der Aktivitätenpaare dieser Aktivitätenkette. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 74))

Ziel- und Moduswahl

Vor dem Hintergrund, dass die Angebotsqualität der Modi, mit denen ein Ziel erreicht werden kann, die Zielwahl beeinflusst, werden in der VISEM-Modelltheorie die Ziel- und Moduswahl über den hierarchisch simultanen Modellansatz des Nested-Logit-Modells mittels Log-Summen gekoppelt. Die Log-Summe ist die logarithmierte Summe des Nutzens über alle Modi für ein Ziel. Sie geht als Aufwand in die Zielwahl ein und kann ent-

sprechend ihres Einflusses mit einem Nest-Parameter gewichtet werden (siehe Formel (23) bis (26) mit dem Beispiel eines quelseitig fixierten und zieleitig gewichteten Nested-Logit-Modells). (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 87 ff.))

In der Zielwahl werden die Aktivitätenketten in Wegeketten überführt, indem den einzelnen Aktivitäten Aktivitätenorte bzw. Verkehrszellen zugeordnet werden. Da von geschlossenen Ketten (Beginn und Ende ist der Wohnort) ausgegangen wird, wird in der vorangehenden Verkehrserzeugung stets das Verkehrsaufkommen der Aktivitätenpaare mit Wohnortbezug berechnet. Wie bereits erwähnt haben die dazwischenliegenden Aktivitäten das gleiche Verkehrsaufkommen. Dementsprechend sind auch nur die Aktivitätenpaare mit Wohnortbezug fixiert. Das Potential der dazwischenliegenden Aktivitäten kann ggf. gewichtet werden. Außerdem kann mittels Rubberbanding eine Abhängigkeit der Nicht-Pflichtaktivitätenorte vom Wohnort bzw. vom Pflichtaktivitätenort berücksichtigt werden (siehe Kapitel 2.4.1.2). (PTV (2018, S. 218 ff., 230 ff.))

Die Moduswahl wird, wie in Kapitel 2.4.2.1 beschrieben, einstufig oder mehrstufig realisiert. Ob sich der gewählte Modus innerhalb einer Wegekette ändern kann, hängt davon ab, ob es sich um einen austauschbaren Modus (z.B. Fuß, Pkw-Mitfahrende, ÖV) oder einen nicht-austauschbaren Modus (z.B. Pkw-Selbstfahrende, Fahrrad) handelt. Wird auf dem ersten Weg ein nicht-austauschbarer Modus gewählt, finden alle Wege der Wegekette mit diesem Modus statt, unabhängig von den Aufwänden dieses Modus auf den weiteren Wegen. Wird ein austauschbarer Modus gewählt, wird für jeden Weg der Wegekette eine Moduswahl (exklusive der nicht-austauschbaren Modi) durchgeführt. (PTV (2018, S. 218 f.))

$$d_{godm} = p_{godm} \cdot d_{god} \quad (23)$$

mit

$$p_{godm} = \frac{\exp(v_{godm})}{\sum_{m \in M} \exp(v_{godm})} \quad (24)$$

$$d_{god} = d_{go}^p \frac{d_{gd}^a \cdot f(x_{god})}{\sum_{d \in Z} (d_{gd}^a \cdot f(x_{god}))} \quad (25)$$

$$f(x_{god}) = \exp\left(\beta_{go} \ln \sum_{m \in M} \exp(v_{godm})\right) \quad (26)$$

mit

d_{godm} Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d mit dem Modus m

p_{godm}	Wahrscheinlichkeit p für eine Ortsveränderung der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d mit dem Modus m
d_{god}	Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d
v_{godm}	Nutzenfunktion v für eine Ortsveränderung der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d mit dem Modus m (siehe Formel (17))
d_{go}^p	produzierte Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Quellverkehrszelle o
d_{gd}^a	angezogene Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Zielverkehrszelle d
β_{go}	Nest-Parameter der Nachfragegruppe g in der Quellverkehrszelle o
x_{god}	Log-Summe der Nutzen über alle Modi für eine Ortsveränderungen d zwischen Zelle o und Zelle d
$f(x_{god})$	bewertete Log-Summe x_{god}

2.4.2.4 Personengruppenübergreifender Randsummenausgleich

Neben den bereits erwähnten Randsummenausgleichen wird der sogenannte personengruppenübergreifende Randsummenausgleich in Kapitel 5 von Bedeutung sein, weswegen er hier näher erläutert wird. Personengruppenübergreifende Randsummenausgleiche können z.B. in PTV VISUM 18 (PTV (2018, S. 183 ff., 220 ff.)) mit den Modelltheorien EVA und VISEM berechnet werden.

Konkurrieren zwei oder mehr Personengruppen um die gleiche Siedlungsstrukturgröße, ist zu entscheiden, ob ein personengruppenübergreifender Randsummenausgleich zwischen den konkurrierenden Personengruppen stattfinden soll. Ohne einen personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich haben alle Personengruppen die gleichen Anteile am jeweiligen Ziel – unabhängig davon wie die Personen den Aufwand, das Ziel zu erreichen, bewerten. Diese Vernachlässigung ist vor allem dann von Nachteil, wenn sich das Zielwahlverhalten der Personengruppen durch ihre spezifischen Eigenschaften unterscheidet. In der Folge wird das Zielwahlverhalten ohne personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich nicht realistisch abgebildet. (SIMON ET AL. (2020, S. 9 f.))

Typische Beispiele für die Anwendung eines personengruppenübergreifenden Randsummenausgleichs sind

- Personengruppen, die nach Verkehrsmittelverfügbarkeit differenziert werden und auf eine gemeinsame Siedlungsstrukturgröße zugreifen (SIMON ET AL. (2020, S. 9 f.)),
- Teilzeiterwerbstätige, die im Vergleich zu Vollzeiterwerbstätigen eine kürzere Anfahrt zum Arbeitsplatz bevorzugen (siehe z.B. NOBIS & KUHNIMHOF (2018, S. 27, 29)), oder
- grenzüberschreitender Pendelverkehr, wobei Ausländer vor allem in den grenznahen Gebieten mit Inländern um Arbeitsplätze konkurrieren.

Abbildung 7 verdeutlicht die beiden letztgenannten Beispiele. Die jeweils linken Bilder zeigen die Modelle ohne personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich und die jeweils rechten Bilder zeigen die Modelle mit einem solchen Randsummenausgleich. Die Tortendiagramme in den Verkehrszellen der Aktivitätenorte zeigen jeweils die Aufteilung der Personengruppen, die diese Verkehrszelle als Ziel haben. Es zeigt sich, dass Modelle mit personengruppenübergreifendem Randsummenausgleich den Aufwand zur Erreichung eines Zieles personengruppenspezifisch berücksichtigen, während Modelle ohne personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich dies nicht tun. Aus diesem Grund ist der Anteil der Personengruppen bei letztgenannten Modellen in jeder Zielverkehrszelle gleich.

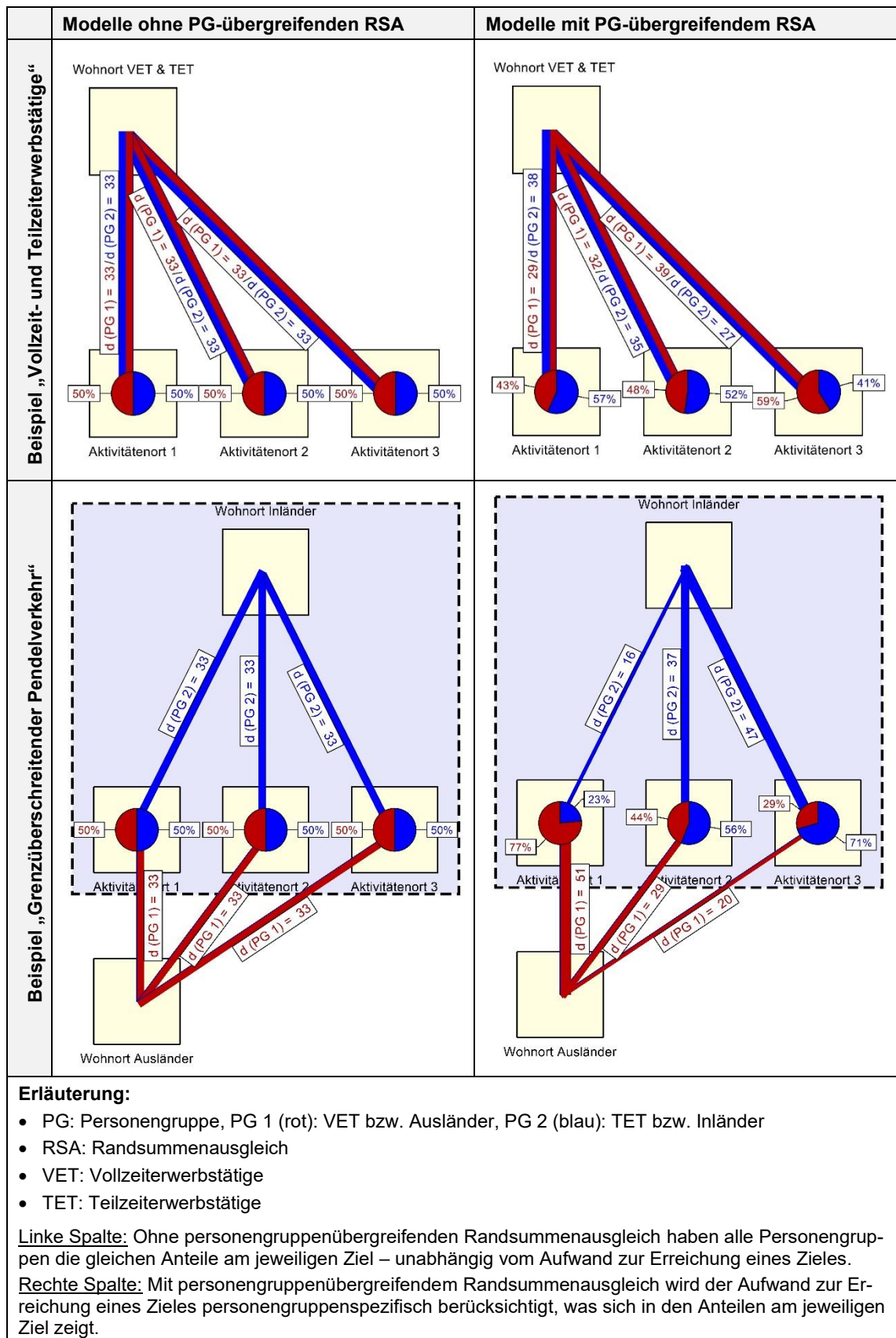


Abbildung 7: Beispielhafte Zielwahlmodelle ohne (links) und mit (rechts) personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich (Bildquelle: eigene Darstellung).

2.5 Herausforderungen bei der Umsetzung der Modelltheorie

Das bisherige Kapitel widmete sich ausgewählten theoretischen Grundlagen der Verkehrsnachfragemodellierung. In der Praxis werden Modelle aber häufig falsch eingesetzt bzw. es werden die Modellergebnisse missverständlich kommuniziert. Ein solches Vorgehen ist nicht gesellschaftsdienlich. SALTELLI ET AL. (2020, S. 482 ff.) fordern daher, sich folgende Punkte bewusst zu machen:

- Konsequenzen:
Verkehrsnachfragemodelle sind – wie alle Modelle – nur ein Abbild der Wirklichkeit. Das bedeutet, dass sie die Realität nie zu 100 % abbilden werden. Punktprognosen stellen hierbei nur einen möglichen Zustand da. Sie gehen gewissermaßen davon aus, dass alle Inputdaten (auch die des Bezugsfalles) und das zugrundeliegende Wirkungsmodell korrekt sind. Da dies unrealistische Annahmen sind, müssen Punktprognosen als unzuverlässig angesehen werden (MANZO ET AL. (2014, S. 138)). Auch nach SALTELLI ET AL. (2020, S. 482 ff.) sollte auf Punktprognosen verzichtet werden, um das Vertrauen in das Modell nicht zu schmälern. Allgemein sollten die Unsicherheiten eines Modells transparent gemacht werden, z.B. in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilung für Modellergebnisse oder in Form verschiedener Planfälle für wahrscheinliche Zukünfte. In jedem Fall sollten die Unsicherheiten und getroffenen Annahmen aber transparent benannt werden. Darüber hinaus müssen diese Unsicherheiten auch bei allen nachfolgenden Berechnungen (z.B. Lärm- und Abgasemissionen oder Kosten-Nutzen-Berechnungen) berücksichtigt werden. Bisher fehlen der Praxis (und häufig auch der Forschung) noch die Methoden und zum Teil auch die Bereitschaft, die daraus resultierenden Unsicherheiten transparent auszuweisen.
- Annahmen und Unwissen:
Modelle unterliegen vielen Unsicherheiten und Annahmen. Dies betrifft alle Eingangsdaten (für den Analysefall und in noch stärkerem Maße für den Bezugsfall), alle Modellparameter und auch die Modellstruktur (z.B. unbekannte Wirkungszusammenhänge). All diese Unsicherheiten und Annahmen sollten offengelegt werden. (SALTELLI ET AL. (2020, S. 482 ff.))
- Aussagekraft und Kontext:
Ursprünglich wurden Verkehrsnachfragemodelle entwickelt, um Alternativen für große Änderungen in der Verkehrsinfrastruktur – hauptsächlich für den motorisierten Individualverkehr – zu evaluieren (BATES (2010, S. 11)). Mit zunehmender Rechenkapazität und Datenverfügbarkeit haben sich die Einsatzbereiche und damit auch die Anforderungen an Verkehrsnachfragemodelle massiv erweitert. Tabelle 5 gibt diesbezüglich eine Übersicht über die Entwicklungen und Maßnahmen, die in Verkehrsnachfragemodellen abgebildet werden können. Diese Palette der Einsatzbereiche wird in Zukunft wahrscheinlich noch erweitert werden, z.B. durch die Abbildung von Mikromobilität mit E-Scootern, Ridesharing, automatisierten Fahrzeugen oder Lufttaxi. Kritisch ist hierbei, dass die (ohnehin nicht kommunizierten) Unsicherheiten der Modellergebnisse zunehmen, je weniger empirische Daten zu bzw. Erfahrungen mit

einer solchen Maßnahme bestehen oder je detaillierter die Auswertung wird. Es besteht dann die Gefahr, dass die analysierten Maßnahmeneffekte geringer sind als die Schwankungen, die aus den Unsicherheiten des Modells und der Eingangsdaten resultieren (HARTGEN (2013, S. 1146 ff.)).

Mit der steigenden Komplexität der Modelle kommt es zudem zu Herausforderungen in der Eingangs- und Vergleichsdatenbeschaffung, im Modellaufbau sowie in der Modellkalibrierung und -validierung. Ein weiteres Problem zunehmender Modellkomplexität ist, dass es wenig fachkundiges Personal gibt, das in der Lage ist, ein entsprechendes Modell aufzubauen und zu betreuen. (HARTGEN (2013, S. 1142 f.))

Zur Beurteilung der Aussagekraft eines Modells muss zudem offengelegt werden, für welche Einsatzzwecke es entwickelt wurde. Das Modell (bzw. seine Dokumentation) darf nicht nur Zahlenwerte liefern, sondern es muss auch eine Erläuterung der Werte und der zugrundeliegenden Annahmen bereitstellen (SALTELLI ET AL. (2020, S. 482 ff.)). Unter dem Aspekt der Aussagekraft eines Modells muss auch erwähnt werden, dass es menschliches Fehlverhalten gibt. Neben bewussten Täuschungen können auch Fehler entstehen, wenn Bezugsfälle mit einer zu einseitigen, zu voreingenommenen oder zu optimistischen Erwartungshaltung erzeugt werden.

Das folgende Kapitel 3 erläutert die oben erwähnten Unsicherheiten des Modells bzw. der Eingangsdaten im Detail.

Maßnahmen- klasse	Entwicklungen und Maßnahmen	Modellierbarkeit
Siedlungs- struktur	Demografische Effekte	+
	Erweiterung / Planung von Wohn-, Gewerbe- und Industriegebieten	+
	Singuläre Verkehrserzeuger z.B. Flughafen, Messe, Freizeitpark, Fußballstadien	+
Infrastruktur	Straßenneubau, -ausbau, -rückbau	+
	Linienetzplanung ÖV	+
	Bau von Park+Ride Verknüpfungspunkten	○
	Bau von Radverkehrsanlagen	○
Mobilitäts- werkzeuge	Änderung Motorisierungsgrad und ÖV-Zeitkartenbesitz	+
	Einführung neuer Mobilitätsangebote (Vehiclesharing, Ridesharing)	○
Ordnungs- politisch	Änderungen der zulässigen Geschwindigkeit	+
	Umweltzonen	○
	Parkraummanagement	○
	Durchfahrtsverbote	+
Kosten- beeinflussend	Fahrpreise	+
	Kraftstoffpreise	+
	Straßenbenutzungsgebühren	+
	Parkraumbewirtschaftung	○
ÖV-Betrieb	Taktveränderung	+
	Differenzierte Fahrplanänderung	+
	Änderung der Fahrzeugkapazität	○
Sharing- systeme	Vehiclesharing-Angebote (Pkw, Rad)	○
	Ridesharing-Angebote	○
	Verknüpfung von ÖV und Sharingsystemen	○
Verkehrs- technisch	Dimensionierung von Knotenpunkten und Verflechtungen	○
	Verkehrsleitsysteme	○
	Verkehrsmanagement, Baustellenmanagement	○
Logistik	Standorte für Güterverteilzentren und Güterverkehrszentren	○
	Logistische Strategien (City-Logistik)	○
Fahrzeug- technisch	Änderung der Fahrzeugflottenzusammensetzung	○
	Verfügbarkeit hochautomatisierter und automatisierter Fahrzeuge	○
Bewusstseins- bildend	Marketing, Incentives	-
Events	Planung besonderer Events	○
Legende: + mit einem Verkehrsnachfragemodell gut abbildbar ○ mit einem Verkehrsnachfragemodell eingeschränkt oder aufwändig abbildbar - mit einem Verkehrsnachfragemodell nicht oder nur schwer abbildbar		

Tabelle 5: Überblick über in Verkehrsnachfragemodellen abbildbare Entwicklungen und Maßnahmen (Quelle: Auszug aus FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 67)).

It is better to be vaguely right than exactly wrong.

Carveth Read in READ (1914, S. 310)

3 Abweichungen zwischen Modell und Realität

Modelle sind immer nur vereinfachte Abbildungen der Realität und unterliegen damit auch allen Unsicherheiten, die es in der (messbaren) Realität unausweichlich gibt. Eine vollständige Beschreibung aller Unsicherheiten ist selbst mit dem komplexesten Modell nicht möglich. Unsicherheiten beeinflussen somit auch die Bestandteile eines Verkehrsnachfragemodells. Dies führt zu Abweichungen zwischen den Modellergebnissen und der (messbaren) Realität, anhand derer letztlich die Güte des Modells bestimmt wird.

Dieses Kapitel erläutert die Arten und Ursachen von Unsicherheiten sowie Methoden die sie darzustellen. Damit soll so ein besseres Verständnis für das Vorhandensein von und den Umgang mit Unsicherheiten zustande kommen. Damit sollen zwei Ziele erreicht werden:

1. Modelle sollen zuverlässigere Ergebnisse liefern und
2. Modelle sollen trotz der Angabe von Unsicherheiten anwendbar und interpretierbar bleiben.

3.1 Begriffsdefinitionen

Um ein gemeinsames Verständnis für die im Folgenden verwendeten Begriffe zu entwickeln, müssen diese zunächst klar definiert werden. Hauptsächlich werden in der Fachliteratur die Begriffe Unsicherheit, Ungenauigkeit, Präzision, Richtigkeit und systematische Abweichung verwendet.

- **Unsicherheit** (engl.: uncertainty) beschreibt nach WALKER ET AL. (2003, S. 8) eine Abweichung vom unerreichbaren Ideal eines vollständigen deterministischen Wissens über das betreffende System. Sie bezieht sich explizit auf die Kenntnis über ein System und betrifft alle Teilbereiche der Modellierung, z.B. entstehen durch begrenztes Wissen oder dynamische Prozesse fehlerhafte Modelleingangs- und Validierungsdaten oder fehlerhafte Modellannahmen, die wiederum zu unsicheren Modellergebnissen führen.

WALKER ET AL. (2003) differenzieren Unsicherheit auf drei Ebenen:

- Der *Ort der Unsicherheit* bezieht sich auf das Auftreten von Unsicherheiten im Modellaufbau. WALKER ET AL. (2003, S. 9 ff.) und MANZO ET AL. (2014, S. 22 ff.) klassifizieren die Orte der Unsicherheit wie in Tabelle 6.
- Die *Stufe der Unsicherheit* gibt an, welches Ausmaß die Unsicherheit hat. Abbildung 8 zeigt sechs Unsicherheitsstufen nach WALKER ET AL. (2003, S. 12 f.). Die Stufe der Unsicherheit einer Variable kann mit dem Variationskoeffizienten (siehe Kapitel 3.4.2.1) quantifiziert werden (MANZO ET AL. (2015b, S. 313)).

- Mit der *Art der Unsicherheit* beschreiben WALKER ET AL. (2003, S. 13 f.) zwei Ausprägungen der Unsicherheit:
 - die erkenntnisbasierte Unsicherheit, aufgrund der Unvollkommenheit des Wissens, und
 - die variabilitätsbasierte Unsicherheit, aufgrund einer unvorhersehbaren Veränderlichkeit in natürlichen Prozessen, menschlichem Verhalten, gesellschaftlicher Dynamik und technologischen Entwicklungen.

Stadium im Modellaufbau	Bezugsobjekt	Beschreibung der Unsicherheit
Modelldefinition und -spezifikation	Kontext und Struktur	Unsicherheit hinsichtlich der angenommenen Theorie des Wirkungsmodells und hinsichtlich der Abgrenzung des Modells, z.B. <ul style="list-style-type: none"> • abzubildende Maßnahmen und Entwicklungen, • Größe des Untersuchungsraums, • abzubildende Alternativen.
	Implementierung	Unsicherheit hinsichtlich der technischen Implementierung, z.B. Fehler oder Ungenauigkeiten in Software und Hardware.
Modellkalibrierung	Eingangsdaten	Unsicherheit hinsichtlich der Daten des Analyse- und des Prognosezeitpunktes.
	Parameter	Unsicherheit hinsichtlich der Kalibrierungsmethoden, z.B. durch die Verwendung von Stichproben anstelle von Grundgesamtheiten und bei der Abwägung zwischen übernommenen oder geschätzten Parametern.
Modellvalidierung	Modellergebnisse	Jeder Bestandteil des Modells besitzt eine Unsicherheit, die sich ggf. über mehrere Modellstufen fortpflanzt. Das Modellergebnis beinhaltet diese kombinierte Unsicherheit.
	Validierungsdaten	Unsicherheit hinsichtlich der Daten des Analyse- und des Prognosezeitpunktes.

Tabelle 6: Ort der Unsicherheit in Anlehnung an WALKER ET AL. (2003, S. 9 ff.) und MANZO ET AL. (2014, S. 22 ff.).

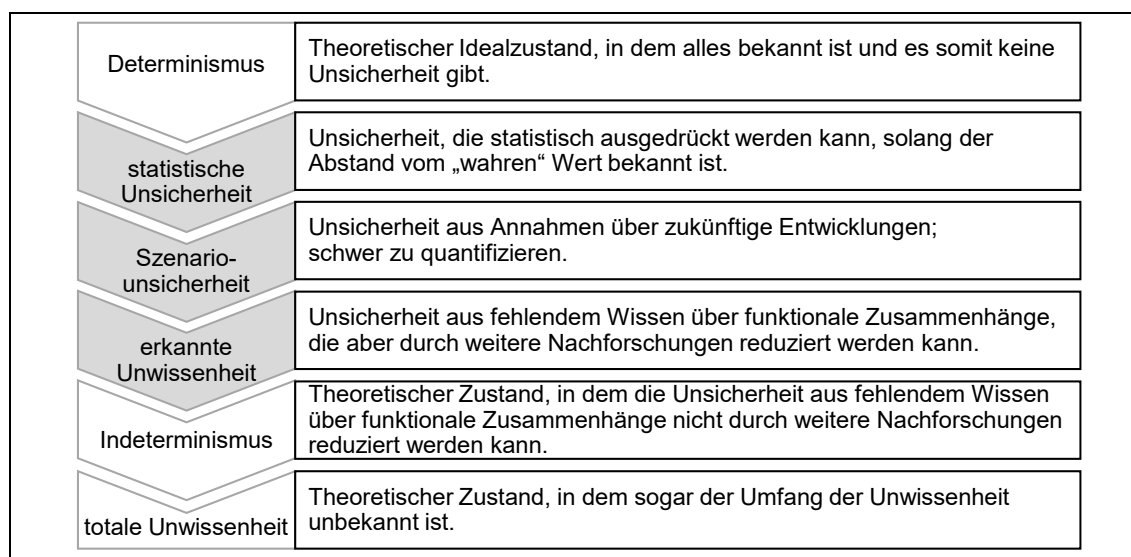


Abbildung 8: Stufen der Unsicherheit nach WALKER ET AL. (2003, S. 12 f.) (Bildquelle: eigene Darstellung).

- **Ungenauigkeit** (engl.: inaccuracy) ist nach NICOLAISEN & DRISCOLL (2014, S. 541) und DIN ISO 3534-2 (2013, S. 54 ff.) die quantifizierbare Abweichung zwischen „unsicherem“ Modellwert und „wahrem“ Erhebungswert (bzw. akzeptiertem Bezugswert). Ungenauigkeit ist die Folge von mangelnder Präzision und Richtigkeit (siehe Abbildung 9). Für den Vergleich von Modell und Erhebung gilt es unter anderem, den Zeitpunkt der Vergleichsdatenerhebung, den Abbildungszeitpunkt des Modells und den Zeitpunkt der Modellerstellung zu beachten. Ungenauigkeit kann z.B. mit der relativen Abweichung (siehe Kapitel 3.4.2.1) quantifiziert werden.
- **Präzision** (engl.: precision) bezeichnet die Streuung der Modellergebnisse aufgrund zufälliger Fehler (WALKER ET AL. (2003, S. 12)). Sie wird typischerweise mit der Standardabweichung quantifiziert (DIN ISO 3534-2 (2013, S. 55)).
- **Richtigkeit** (engl.: trueness) bezeichnet die ausgeprägte Tendenz von Modellergebnissen in eine bestimmte Richtung aufgrund systematischer Fehler (NICOLAISEN (2012, S. 29)). Sie wird in der Regel mit der **systematischen Abweichung** (engl.: bias), d.h. mit der Differenz des Erwartungswertes zum wahren Wert bzw. zum akzeptierten Bezugswert, quantifiziert (DIN ISO 3534-2 (2013, S. 55)).

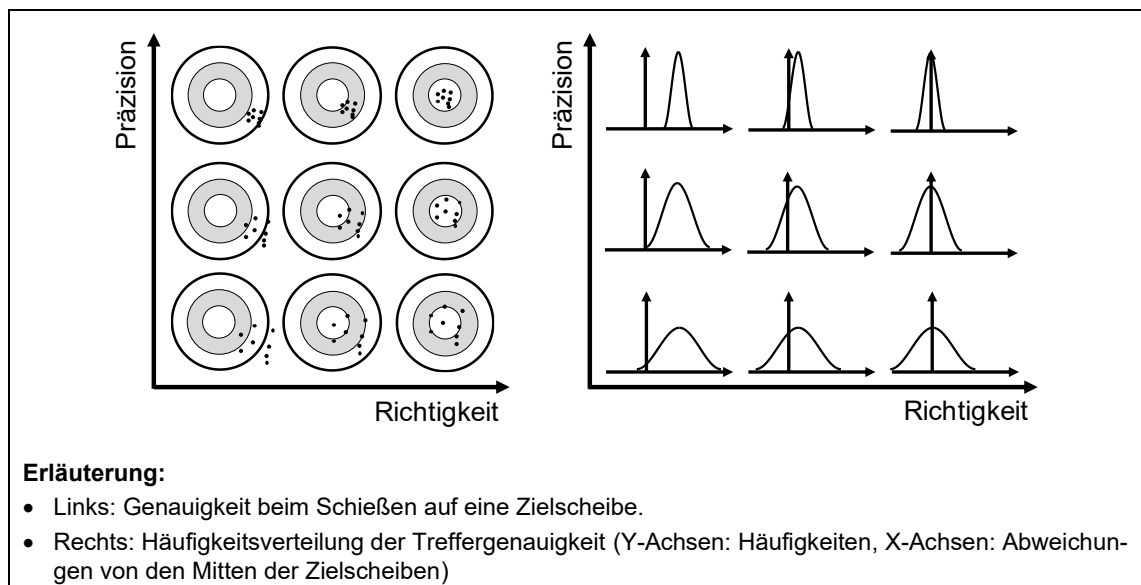


Abbildung 9: Schematische Darstellungen der Ungenauigkeit als Folge von mangelnder Präzision oder Richtigkeit. (Bildquellen: modifizierte Abbildung in Anlehnung an NICOLAISEN (2012, S. 29)).

Im Folgenden ist besonders die Unterscheidung zwischen Ungenauigkeit und Unsicherheit wichtig. Unsicherheiten sind in ihrem Auftreten nicht an einen Zeitpunkt gebunden. Ungenauigkeiten wiederum können nur festgestellt werden, wenn eine entsprechende Vergleichsgröße bereits vorliegt, z.B. eine erhobene Verkehrsstärke bei der Prüfung, wie gut ein prognostizierter Modellwert an einem Streckenquerschnitt mit der Realität übereinstimmt. Eine solche rückschauende Bewertung wird als **Ex-post-Analyse** oder auch

Prediction-Success-Test bezeichnet (WOHLTMANN & WÜBBENHORST (2020b)). Im Gegensatz dazu betrachtet eine **Ex-ante-Analyse** Wirkungszusammenhänge in der Zukunft (WOHLTMANN & WÜBBENHORST (2020a)).

Da der Haupteinsatzzweck von Verkehrsnachfragemodellen die Beschreibung von zukünftigem Mobilitätsverhalten unter der Annahme von Maßnahmen und Entwicklungen ist, sind Verkehrsnachfragemodelle in ihrem Standardanwendungsfall Ex-ante-Analysen. Andererseits finden aber auch Ex-post-Analysen während der Kalibrierung und Validierung eines Verkehrsnachfragemodells statt, da hier die Abweichungen zwischen Erhebungs- und Modellwerten bestimmt und minimiert werden. Das Ergebnis dieses Vergleichs wird als Modellgüte (engl.: goodness-of-fit) bezeichnet.

Darüber hinaus gibt es einige wissenschaftliche Untersuchungen zu Ex-Post-Analysen von Verkehrsnachfragemodellprognosen, d.h. Vergleiche einer Prognose mit einer später eingetretenen (gemessenen) Realität. Mithilfe solcher Ex-Post-Analysen können potenzielle Fehlerquellen in früheren Modellen identifiziert werden, um daraus Schlüsse für die Entwicklung neuer Modelle zu ziehen.

3.2 Erkenntnisse aus Ex-post-Analysen von Verkehrsnachfragemodellen der Praxis

Die nachfolgenden Analysen stellen Zusammenfassungen ausgewählter einzelner Untersuchungen (sogenannte Metaanalysen) dar. Obwohl einige Studien auch die Ungenauigkeit hinsichtlich der Kostenentwicklung bewerten, soll der Fokus hier nur auf der Verkehrsnachfrage liegen.

Ein wichtiger Punkt bei der nachträglichen Bewertung von Prognosen im Sinne von Ex-post-Analysen ist, dass aus Transparenzgründen die Prognose gewählt werden sollte, die zum Zeitpunkt einer Entscheidung für oder gegen eine Maßnahme die Grundlage dieser Entscheidung war. Ein weiterer Punkt, der beachtet werden sollte, ist das Vergleichsjahr. Gelegentlich werden Maßnahmeneffekte nicht sofort nach Einführung der Maßnahme modelliert, sondern mit einer gewissen Anlaufzeit. Die Annahme dieser Anlaufzeit birgt auch eine gewisse Unsicherheit in sich und muss bei Ex-post-Analysen berücksichtigt werden. Da es häufiger zu Verzögerungen bei Infrastrukturprojekten kommt, ist es auch nicht zielführend, zwingend das ursprüngliche Prognosejahr zu verwenden. Hier sollte für jeden Vergleich individuell entschieden werden. Entsprechende Anpassungen sollten unbedingt dokumentiert werden, was in der Praxis jedoch häufig nicht geschieht. (FLYVBJERG (2005, S. 524 ff.), NICOLAISEN & DRISCOLL (2014, S. 546 ff.))

Die betrachteten Metaanalysen untersuchen Ungenauigkeiten immer auf Projektebene. Dabei können für die Projektkategorien Straßenbauprojekte, Mautstraßenprojekte, Schienenverkehrsprojekte, Luftverkehrsprojekte und nicht realisierte Projekte folgende Schlüsse gezogen werden:

- Prognosegenauigkeit bei Straßenbauprojekten:
Viele Untersuchungen (z.B. FLYVBJERG ET AL. (2006, S. 9)⁹, PARTHASARATHI & LEVINSON (2010, S. 438 ff.)¹⁰ und NICOLAISEN (2012, S. 106)¹¹) kommen zu dem Ergebnis, dass die Verkehrsnachfrage von Straßenprojekten im Mittel leicht unterschätzt wird. Konkret wird die Nachfrage um 20 bis > 50 %¹² unterschätzt:
 - bei Straßenneubauprojekten mit neuen Verbindungsmöglichkeiten (z.B. die Ersetzung einer Fähre durch eine Brücke),
 - wenn trotz des Vorliegens von lokalen Prognosen aufgrund nationaler Prognosen entschieden wird,
 - bei der Nichtbeachtung von induziertem Verkehr¹³ und
 - bei der Beurteilung von Maßnahmen in kleinen Untersuchungsräumen.

Wird beim Straßenneubau eine zu große Verlagerung auf die neue Strecke angenommen oder werden andere Planungen, die Teil des Planfalls waren, nicht umgesetzt, treten eher Überschätzungen (um 20 bis 50 %¹²) der Nachfrage auf. Gute Übereinstimmungen zwischen Prognose und Erhebungswerten (von 20 % Unterschätzung bis 20 % Überschätzung¹²) traten bei Straßenausbauprojekten ohne größere Nachfrageänderungen und beim Streckenneubau in dünn besiedelten Räumen ohne größeres Verkehrsaufkommen auf. (NICOLAISEN (2012, S. 119))
- Prognosegenauigkeit bei Mautstraßenprojekten:
Die Erwartung an Mautstraßenprojekte ist eine größere Prognosegenauigkeit als für „normale“ Straßenprojekte, da die Abbildung der gegenseitigen Beeinflussung von positiven Wirkungen (neue Alternativen bei der Routenwahl) und negativen Wirkun-

⁹ FLYVBJERG ET AL. (2006) untersuchen 210 Modellprognosen für Infrastrukturprojekte im Zeitraum von 1969 bis 1998, davon 183 für Straßenbauprojekte und 27 für Schienenverkehrsprojekte. Die Untersuchungsräume teilen sich dabei auf folgende Länder auf: Dänemark, Schweden, Großbritannien, Frankreich und Deutschland.

¹⁰ PARTHASARATHI & LEVINSON (2010) vergleichen insgesamt 2.984 Zählstellen an 108 Straßen in Minnesota (USA) mit Prognosewerten im Zeitraum von 1962 bis 2010.

¹¹ NICOLAISEN (2012) untersucht 272 Modellprognosen für Infrastrukturprojekte im Zeitraum von ca. 1965 bis 2014, davon 236 für Straßenbauprojekte und 36 für Schienenverkehrsprojekte. Die Untersuchungsräume teilen sich dabei auf folgende Länder auf: Dänemark, Schweden, Großbritannien und Norwegen.

¹² Bereich der Über- bzw. Unterschätzung nach NICOLAISEN (2012, S. 119).

¹³ Aus den Angaben in der Literatur wird nicht immer deutlich, welche Definition von „induziertem Verkehr“ verwendet wird. Im Folgenden wird unter „induziertem Verkehr“ der primär induzierte Verkehr verstanden. Dieser „umfasst die Gesamtheit aller durch eine Maßnahme kurzfristig verursachten Verkehrsmengen- und Verkehrsaufwandsänderungen, das heißt, den gesamten verlagerten und neu hinzugekommenen Verkehr“ (FGSV (2005, S. 5)). Im Gegensatz dazu beschreibt sekundär induzierter Verkehr langfristige verkehrliche Entwicklungen aufgrund von siedlungsstrukturellen Veränderungen, die wiederum durch verkehrliche Maßnahmen ausgelöst werden. (FGSV (2005, S. 5))

gen (Nutzungskosten) eine herausfordernde Modellierungsaufgabe ist. Mit dieser Erwartung übereinstimmend zeigen z.B. LI & HENSHER (2010, S. 9)¹⁴ für australische Mautstraßenprojekte eine hohe Überschätzung der Nachfrage zwischen 30 und 50 %. Die Studie von BAEZA & VASSALLO (2012, S. 100 ff.)¹⁵ weist für spanische Mautstraßenprojekte eine Überschätzung von 44 % auf. Im Gegensatz dazu zeigt die Untersuchung von ODECK & WELDE (2017, S. 82)¹⁶ für norwegische Mautstraßenprojekte eine gute Prognosegenauigkeit von 4 % Unterschätzung, ohne systematische Abweichung. BAIN (2009, S. 472 ff.)¹⁷ wiederum attestiert Mautstraßenprojekten auf der ganzen Welt eine hohe Ungenauigkeit (von 85 % Unterschätzung bis zu 50 % Überschätzung) sowie eine weitreichende systematische Abweichung. Zusätzlich listet BAIN (2009, S. 481 f.) Unsicherheitsfaktoren für Mautstraßenprojekte auf, z.B. wird die Gefahr einer Fehleinschätzung bei Mautstraßen größer, je weniger Erfahrungen es mit Mautstraßen in den entsprechenden Ländern gibt.

- Prognosegenauigkeit im Schienenverkehr:
Während die Verkehrsnachfrage im Schienenverkehr systemweit relativ genau prognostiziert wird (ANDERSSON ET AL. (2017, S. 116)¹⁸ bezogen auf Schweden), kommen verschiedene Untersuchungen für die Prognosegenauigkeit auf Projektebene zu dem Ergebnis, dass die Verkehrsnachfrage erheblich überschätzt wird (z.B. HARTGEN (2013, S. 1137)¹⁹ oder NICOLAISEN (2012, S. 203)¹¹). Die Nachfrage wird bei neuen Schienenverbindungen in städtischen Räumen und guten ÖV-Anbindungen unterschätzt (um 20 bis 50 %¹²), während sie bei Inter-City-Verbindungen und Express-Linien sowie bei der Annahme großer Bündelungswirkungen von Maßnahmen im betroffenen Raum stark überschätzt (um 20 bis > 50 %¹²) wird. Gute Prognoseergebnisse (von 20 % Unterschätzung bis 20 % Überschätzung¹²) ergeben sich bei Ausbauprojekten von bestehenden Schienenstrecken ohne größere Nachfrageänderungen (NICOLAISEN (2012, S. 119, 205)). Zudem ist vor allem bei

¹⁴ LI & HENSHER (2010) untersuchen 40 Modellprognosen für acht Mautstrecken in Australien im Zeitraum von 1993 bis 2008.

¹⁵ BAEZA & VASSALLO (2012) untersuchen Modellprognosen für 15 Mautstrecken in Spanien im Zeitraum von ca. 2000 bis 2008.

¹⁶ ODECK & WELDE (2017) untersuchen Modellprognosen für 68 Mautstrecken in Norwegen im Zeitraum von 1975 bis 2013.

¹⁷ BAIN (2009) nimmt Bezug auf die vorangegangenen Studien BAIN & WILKINS (2002), BAIN & PLANTAGIE (2003), BAIN & PLANTAGIE (2004) und BAIN & POLAKOVIC (2005). In diesen Studien werden insgesamt 104 Modellprognosen für weltweite Mautstraßenprojekte im Zeitraum von 2002 bis 2005 untersucht.

¹⁸ ANDERSSON ET AL. (2017) untersuchen Modellprognosen für Straßenbau-, Schienenverkehrs- und Luftverkehrsprojekte in Schweden im Zeitraum von 1975 bis 2015. Die Anzahl der untersuchten Prognosen wird nicht ausgewiesen.

¹⁹ HARTGEN (2013) vergleicht mehrere Metastudien.

Schienenbauprojekten eine überzogene Erwartungshaltung, die sich in einer systematischen Abweichung äußert, problematisch (NICOLAISEN & DRISCOLL (2014, S. 546)²⁰).

- Prognosegenauigkeit im Luftverkehr:
ANDERSSON ET AL. (2017, S. 116)¹⁸ stellen für Schweden fest, dass die Nachfrage im Luftverkehr systematisch überschätzt wird. Dies wird auf die politische Deregulierung im Luftverkehrssektor zurückgeführt, die zu einem unerwarteten Rückgang des Angebotes geführt hat.
- Prognosegenauigkeit der Bezugsfälle (ohne modellierte Maßnahmen):
Eine häufig vergessene Kategorie sind Prognosen für Projekte, die nicht umgesetzt wurden. NICOLAISEN (2012, S. 203)¹¹ und NICOLAISEN & NÆSS (2015, S. 59 ff.)²¹ zeigen, dass Modell-Bezugsfälle (ohne modellierte Maßnahmen) die real erhobenen Verkehrsstärken systematisch überschätzen (im Mittel ca. 7 % Überschätzung). Die Ungenauigkeiten fallen insgesamt aber wesentlich geringer aus als bei realisierten Projekten.

Neben den einzelnen Projektkategorien werden auch zeitliche und räumliche Aspekte untersucht:

- Prognosegenauigkeit bei neueren Modellen:
FLYVBJERG ET AL. (2006, S. 12)⁹, NICOLAISEN (2012, S. 106)¹¹ und ODECK & WELDE (2017)¹⁶ stellen fest, dass sich Modellprognosen im Laufe der Jahre nicht verbessert haben.
- Prognosegenauigkeit hinsichtlich der Länge des Prognosezeitraums:
NICOLAISEN (2012, S. 111 f.)¹¹ zeigt, dass der zeitliche Abstand zwischen Prognoseerstellung und Prognosezeitpunkt keinen nachweisbaren Einfluss auf die Prognosegenauigkeit hat, selbst wenn in Einzelfällen die größten Abweichungen am weitesten in der Zukunft prognostiziert wurden.
- Prognosegenauigkeit bei Projekten im urbanen und im ländlichen Raum:
NICOLAISEN & DRISCOLL (2014, S. 546)²⁰ erkennen keinen Zusammenhang zwischen räumlicher Lage und Ungenauigkeit.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Verkehrsnachfrage von Straßenbauprojekten im Mittel unterschätzt wird, während die Verkehrsnachfrage von Mautstraßenprojekten, Schienenbauprojekten und Bezugsfällen ohne Maßnahmen im Mittel überschätzt wird. Die Ungenauigkeiten in den Projektkategorien streuen aber sehr stark. Daher gilt für das jeweilige Einzelprojekt, dass sich einerseits die konkrete systematische Abweichung nicht herausrechnen lässt und andererseits die in den Metastudien be-

²⁰ NICOLAISEN & DRISCOLL (2014) vergleichen mehrere Metastudien.

²¹ NICOLAISEN & NÆSS (2015) untersuchen 35 Modellprognosen für nicht realisierte Straßenbauprojekte zwischen 1985 und 2010 in Dänemark und Großbritannien.

stimmten Ungenauigkeitsangaben höchstens als grobe Angabe verstanden werden sollten (NICOLAISEN (2012, S. 203, 544 ff.)). Mögliche Ursachen für die Ungenauigkeiten der Prognosen werden in Kapitel 3.3 erläutert. Auffällig ist jedoch, dass sich die Ungenauigkeiten scheinbar nach Projektkategorie gruppieren. Die Autoren diverser Studien, z.B. FLYVBJERG ET AL. (2006, S. 16) oder NICOLAISEN & NÆSS (2015, S. 57) begründen dies mit einer voreingenommenen, unrealistisch optimistischen Erwartungshaltung gegenüber bestimmten Maßnahmen („optimism bias“, siehe Kapitel 3.3.1.3), um z.B. die Finanzierung von bestimmten Projekten zu rechtfertigen.

Juristische Prüfungen der Qualität von Modellprognosen

Prognosen von Verkehrsnachfragemodellen bilden die Entscheidungsgrundlage für die Realisierung von Infrastrukturprojekten. Sind die Prognosen – wie oben beschrieben – ungenau, besteht die Gefahr, dass suboptimale Investitionen getätigt werden. Dies trifft häufig die öffentliche Hand als Hauptbulasträger. Gerade bei privatwirtschaftlich finanzierten Projekten, sogenannten Private Public Partnership (PPP) Projekten, steht aber bei zu hohen Prognosen (und damit zu hohen Gewinnerwartungen) schnell die Überlebensfähigkeit des privatwirtschaftlichen Unternehmens in Frage. Daher ist es wenig verwunderlich, dass es international bereits diverse Gerichtsverfahren wegen ungenauer Prognosen bei Mautstraßenprojekten gab:

- Beispiel Australien: Die australische Firma Maunsells (später fusioniert mit AECOM) prognostizierte für den Clem7-Mauttunnel in Brisbane (Australien) (Baukosten: 3,2 Mrd. AUS-\$) im Jahr 2012 eine Verkehrsstärke von ca. 100.000 Fahrzeugen pro Tag. Tatsächlich gezählt wurden im Dezember 2012 aber nur ca. 27.000 Fahrzeuge pro Tag. Der Betreiber des Mauttunnels musste daraufhin Konkurs anmelden und strengte einen Schadenersatzprozess gegen den Ersteller der Modellprognose an. 2013 wurde der Tunnel mit 2,4 Mrd. AUS-\$ Verlust verkauft. 2015 erklärte sich AECOM bereit, 280 Mio. AUS-\$ an die Gläubiger zu zahlen. (CRUDE OIL PEAK (2015))
- Beispiel USA: Die Firma American Roads betrieb mehrere Mautstraßen im US-Bundestaat Alabama. Die Versicherungsgesellschaft Syncora Guarantee klagte gegen Macquarie Capital, den Mutterkonzern von American Roads, weil diese, aufgrund wissentlich überhöhter Verkehrsprognosen der australischen Firma Maunsells, Versicherungspolice erhalten hat. Die Versicherungspolice waren durch die falsch prognostizierten Mauteinnahmen von American Roads abgesichert und sollten die Tilgungs- und Zinszahlungen auf 500 Mio. US-\$ in Anleihen garantieren. American Roads ging 2013 wegen falscher Gewinnerwartungen erst Konkurs und daraufhin hochverschuldet in den Besitz von Syncora Guarantee über, die die Firma anschließend verkaufte. Die Klage wurde 2018 durch eine 38 Mio. US-\$-Zahlung von Macquarie Capital fallengelassen. (STUTTS (2019))

Dass Mautstraßenbetreiber in den USA wegen zu hoher Verkehrsprognosen Konkurs gehen, ist laut STUTTS (2019) kein Einzelfall.

- Beispiel Deutschland: In Deutschland gibt es nur wenige PPP-Mautstraßen und allgemein kaum Ex-post-Untersuchungen von Modellprognosen. Daher gibt es vergleichsweise wenige juristische Streitfälle zu diesem Thema. Ein Beispiel für eine nachträglich festgestellte ungenaue Modellprognose ist der Rostocker Warnowtunnel. Die mittlere tägliche Verkehrsstärke wurde in der Planungsphase mit ca. 25.000 Fahrzeugen pro Tag prognostiziert. Im Eröffnungsjahr 2003 waren es jedoch nur ca. 6.100 Fahrzeuge pro Tag und selbst 2017 lag die Zahl erst bei ca. 11.500 Fahrzeugen pro Tag. Um die Betreibergesellschaft vor der drohenden Insolvenz zu bewahren, wurde 2006 die Konzession zur Mauterhebung von 30 auf 50 Jahre verlängert. (OZ (2017))

Darüber hinaus gibt es aber durchaus juristische Streitfälle, beispielsweise bei der Abwägung zwischen Streckenneuplanungen (aufgrund von Modellprognosen) und Naturschutz (HAHN (2020, S. 11 ff.)). In anderen Fällen zweifeln Rechnungshöfe Modellergebnisse an. Zu erwähnen sind hier beispielsweise die Stellungnahme des RECHNUNGSHOF BADEN-WÜRTTEMBERG (2009) zu einer Kernstadtentlastungsstraße in Riedlingen oder die Kritik am Bundesverkehrswegeplan (BVWP) 2030. Letztgenannte Kritik bezieht sich auf die zu erwartenden Nutzeneffekte durch unplausible Zeitwertfunktionen (Value of Time), die in der Folge zu unzuverlässigen und nicht vergleichbaren Kosten-Nutzen-Verhältnissen (KNV) für die von den Ländern gemeldeten Straßenbauprojekte führen (BUNDESRECHNUNGSHOF (2016, S. 3 ff.), HAHN (2016, S. 5 ff.)).

Generell lässt sich festhalten, dass sich die Gerichte in Deutschland bei Verfahren zu Planfeststellungsbeschlüssen auf Punktprognosen stützen. Eine Abkehr von dieser Praxis ist derzeit nicht absehbar, auch wenn vermehrt Monitoringansätze eingesetzt werden. (HAHN (2020, S. 11 ff.))

Dieses Kapitel hat verdeutlicht, dass es in der Praxis zum Teil sehr deutliche Abweichungen zwischen Modellprognose und Realität gibt, die weitreichende Auswirkungen haben können. Die folgenden Kapitel 3.3 und 3.4 geben Hinweise, warum solche Abweichungen zu erwarten sind und wie sie reduziert oder zumindest ein Verständnis dafür geschaffen werden kann.

3.3 Ursachen für Unsicherheiten und Abweichungen bei Verkehrsnachfragemodellen

Alle Modelle sind Abstraktionen der Realität. Ihre Ergebnisse werden daher nie vollständig mit der Realität übereinstimmen. Die Modellergebnisse müssen somit immer diskutiert, unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen interpretiert und eingeordnet werden (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 236), VAN VUREN (2020)).

Im vorangegangenen Kapitel wird erläutert, dass die feststellbaren quantifizierbaren Abweichungen (= Ungenauigkeiten) die Folge von Unsicherheiten sind. Sie führen dazu,

dass Verkehrsnachfragemodelle die Wirklichkeit nicht immer optimal beschreiben. Die Ursachen dafür können vielfältig sein, z.B.:

- das Modell bildet die Ursache-Wirkungs-Beziehung falsch oder unzureichend ab,
- das Modell ist „zu grob“ um bestimmte Wirkungen zuverlässig zu quantifizieren,
- das Modell enthält Fehler durch die menschliche Wahrnehmung oder durch ungenaue Messungen,
- die im Modell hinterlegten Prognoseannahmen, z.B. regionale und nationale Entwicklungsannahmen, sind unsicher und erweisen sich im Nachhinein als unzutreffend.

Zahlreiche Studien haben Unsicherheiten und Fehler in Verkehrsnachfragemodellen untersucht, z.B. ZHAO & KOCKELMAN (2002), DE JONG ET AL. (2005), FLYVBJERG (2005), FLYVBJERG ET AL. (2006), LEMP & KOCKELMAN (2009), PARTHASARATHI & LEVINSON (2010) oder RASOULI & TIMMERMANS (2012). Das folgende Kapitel erläutert und gliedert die vielfältigen Fehler, die zu Abweichungen zwischen Modell und Realität führen können und gibt Beispiele für jede Fehlerklasse.

Die im Folgenden vorgestellte Klassifizierung basiert auf PESTEL ET AL. (2016, S. 659 ff.) bzw. dessen Fortschreibung in FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 176 ff.) und erweitert sie um die Erkenntnisse der oben aufgeführten Studien. Generell lassen sich Fehler, die bereits im Analysefall bestehen, und Fehler, die aus den Prognoseannahmen resultieren, unterscheiden.

3.3.1 Fehler im Analysefall

Allgemein können drei Oberklassen von Fehlern im Analysefall unterschieden werden: Modellfehler, Fehler in den Eingangsdaten und Fehler durch falsche Anwendung des Modells.

3.3.1.1 Modellfehler

Die Klasse „Modellfehler“ enthält Fehler, die aus einer zu großen Vereinfachung, unpassenden Annahmen über die Wirkungszusammenhänge oder einer unpassenden Modellstruktur resultieren.

Spezifikationsfehler

Eine Spezifikation legt Vorgaben (z.B. Funktion, Eigenschaften, Einsatzbedingungen) für das zu liefernde Produkt fest, z.B. in einem Lasten- oder Pflichtenheft (VDI 4003 (2007, S. 7 f.)). Ein Spezifikationsfehler tritt also auf, wenn sich die Modellspezifikation

nicht an den Modellanforderungen orientiert. Dies kann z.B. passieren, wenn Wirkungszusammenhänge im Modell nicht komplett verstanden werden (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 176)). Erfahrungsgemäß gibt es mit jedem neuen Modell neue Unklarheiten über die Spezifikation und somit Spezifikationsfehler. FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 317 ff.) geben einen Einblick, was in einer Spezifikation enthalten sein sollte. Ergänzend dazu zeigt die folgende (nicht vollständige) Auflistung häufige Probleme in der Praxis, die eine Spezifikation adressieren sollte:

- Welche Entscheidungen sollen modelliert werden und welche entscheidungsrelevanten Alternativen (Choice Set) werden berücksichtigt? Haben die Verkehrsteilnehmenden vollständige oder unvollständige Informationen über die verfügbaren Alternativen?
- Welche Aufwandskenngrößen beeinflussen Wahlentscheidungen und welchen Einfluss haben die einzelnen Aufwandskenngrößen? Eine häufige Fehlerquelle ist z.B. wenn erklärende Variablen vernachlässigt oder falsch gewichtet werden, während irrelevante (nicht-erklärende) Variablen berücksichtigt werden (CHATFIELD (1995, S. 421)). Zudem gilt es abzuwägen, ob eine weitere erklärende Variable in die Nutzenfunktion integriert wird, da zusätzliche erklärende Variablen die Aussagekraft des Modells zwar erhöhen können, zu viele Variablen die Aussagekraft des Modells aber reduzieren (TADI & KHASNABIS (1990, S. 1171)).
- Welche Modellstrukturen und Teilmodelle werden verwendet? Werden z.B. die Entscheidungen der Ziel- und der Moduswahl sequentiell oder simultan getroffen?
- Genügt es, einzelne Wege zu modellieren oder liefert die Kenntnis ganzer Wegeketten realistischere Ergebnisse?
- Ist es notwendig, Abstimmungsprozesse innerhalb eines Haushalts oder andere Restriktionen (Haushaltsbudget) zu berücksichtigen?
- Stehen die einzelnen Aktivitäten gleichberechtigt nebeneinander oder werden zuerst die Pflichtaktivitäten (Arbeiten, Ausbildung) geplant und dann die sonstigen Aktivitäten (Einkaufen, Freizeit) einbezogen?
- Wie werden Auswirkungen einer Maßnahme auf Verkehrssysteme, die nicht modelliert werden, berücksichtigt? (MACKIE & PRESTON (1998, S. 3))
- Wie groß ist der Planungs- und Untersuchungsraum? Welche Kenngrößen werden für den Zellbinnenverkehr angenommen?
- Soll bei Gleichgewichtsprozessen eine maximale Iterationszahl festgelegt werden oder soll ein anderes Konvergenzkriterium (z.B. Relative Gap²²) herangezogen werden? Eine unzureichende Konvergenz in Gleichgewichtsprozessen führt ggf. dazu,

²² „Der Relative Gap vergleicht den tatsächlichen Verkehrszeitaufwand im gesamten Netz mit einem hypothetischen minimalen Verkehrszeitaufwand, der sich ergibt, wenn alle Fahrzeuge die Fahrtzeit der kürzesten Route ihrer Quelle-Ziel-Relation nutzen könnten.“ (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 96))

dass Maßnahmeneffekte im „Rauschen“ des Modells untergehen. Hierbei gilt es zwischen Anforderungen an die numerische Genauigkeit und praktikablen Rechenzeiten abzuwägen.

- Welche Qualitätsanforderungen für welche Kenngrößen sind zu definieren? Wie streng sind die Vorgaben? Welche Abweichungen durch Korrekturverfahren, z.B. von Matrixkorrekturverfahren, sind zulässig?

Für Fehler dieser Fehlerklasse ist eine korrekte Quantifizierung wahrscheinlich erst nach ihrer Behebung möglich. Ihre Größenordnung kann prinzipiell durch Nachforschungen zu Wirkungszusammenhängen und – damit einhergehend – komplexere Modelle reduziert werden. Die führt jedoch zu einem nicht zu vernachlässigenden finanziellen und zeitlichen Aufwand und ggf. wird durch die zunehmende Komplexität der Gesamtfehler sogar erhöht. In jedem Fall hilft eine Verifikation (siehe Kapitel 4.3.1) bzw. eine externe Begutachtung der Modellspezifikation bei der Reduktion dieses Fehlers, wenn auch nicht bei seiner Eliminierung. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 176))

Abstraktionsfehler (Vereinfachung, Aggregation)

Ein Modell abstrahiert die reale Welt, um sie einfacher abbilden zu können. Aus dieser Vereinfachung resultieren aber Unsicherheiten in den Modellergebnissen. Beispiele für Abstraktionen sind Verkehrszellen, Anbindungsknoten oder die Abgrenzung des Modellraums. Diese Abstraktionen führen unter anderem dazu, dass der Zellbinnenverkehr keinen Beitrag zu Verkehrsstärken liefert, dass Straßen im Bereich von Anbindungen unrealistische Verkehrsstärken aufweisen können und dass Reisezeiten zwischen nahegelegenen Verkehrszellen von den Anbindungspunkten beeinflusst werden. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 176))

Auch über das Verhalten werden Annahmen getroffen, die zum Teil nicht realistisch sind. Beispielsweise nennt WILLUMSEN (2017) die Annahme des „homo economicus“, der alle gebotenen Alternativen berücksichtigt und dann die Alternative wählt, die seinen Nutzen maximiert. In der Realität haben individuelle Verkehrsteilnehmende auch eine individuelle Wahrnehmung, z.B. des Value of Time oder der Widerstände einer Ortsveränderung. Ihnen sind zudem selten alle verfügbaren Alternativen bekannt (selektive Wahrnehmung) und ihre Entscheidungen hängen zudem häufig von äußeren Ereignissen oder Gewohnheiten ab. Das führt unter anderem dazu, dass Widerstandsänderungen bei neuen Alternativen erst oberhalb einer gewissen Wahrnehmungsschwelle registriert werden (SIMON ET AL. (2020, S. 4 ff.)).

Auch durch die Aggregation von Daten entstehen Unsicherheiten, die sich ebenfalls den Abstraktionsfehlern zurechnen lassen. Dies betrifft alle Teilbereiche des Verkehrsnachfragemodells:

- Eingangsdaten: z.B. Befragung von Personen (niedrige Aggregation), um Aussagen auf der Ebene von Personengruppen (hohe Aggregation) zu erhalten,

- Eigenschaften des Angebotsmodells: z.B. ausschließliche Abbildung des Hauptstreckennetzes (hohe Aggregation), keine Modellierung von aufgelösten Knotenströmen mit entsprechenden Widerständen (niedrige Aggregation),
- Eigenschaften des Nachfragemodells:
 - räumliche Segmentierung: z.B. Aggregation in Verkehrszellen, die sich an statistischen Bezirken orientieren (hohe Aggregation) anstelle von baublockfeinen Verkehrszellen (niedrige Aggregation),
 - zeitliche Segmentierung: z.B. Abbildung von mittleren Werktagen (hohe Aggregation) anstatt einzelner Stunden (niedrige Aggregation) und
 - inhaltliche Segmentierung: z.B. Modellierung von Personengruppen oder Zusammenfassung von Aktivitäten (hohe Aggregation) und Vernachlässigung von Streuungen, z.B. bei den Mobilitätsraten oder dem Value of Time (niedrige Aggregation) oder
- Modellergebnisse (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 177)):
 - Aktivitätenwahl: z.B. die produzierten und angezogenen Wege je Wegezweck und Verkehrszelle (niedrige Aggregation) gegenüber den produzierten und angezogenen Wegen je Wegezweck (hohe Aggregation),
 - Zielwahl: z.B. die Anzahl der Ortsveränderungen je Wegezweck zwischen zwei Verkehrszellen (niedrige Aggregation) gegenüber der mittleren Reiseweite und Reisezeit je Wegezweck (hohe Aggregation),
 - Moduswahl: z.B. die Anzahl der Ortsveränderungen je Wegezweck und Modus zwischen zwei Verkehrszellen (niedrige Aggregation) gegenüber dem Modal-Split je Wegezweck (hohe Aggregation) und
 - Umlegung: z.B. die Anzahl der Ortsveränderungen je Modus und Route (niedrige Aggregation) gegenüber den Personenkilometern und Fahrzeugkilometern je Modus im gesamten Netz oder auf Verkehrswegekassen (hohe Aggregation).

Eine feinere Segmentierung von Angebot und Nachfrage scheint diesen Fehler zu reduzieren. Allerdings können dabei auch neue Fehler entstehen, wenn der entsprechende Mehraufwand nicht ordnungsgemäß bearbeitet wird oder die Daten nicht in der nötigen Granularität vorliegen. So zeigt bereits ALONSO (1968, S. 183 f.) in Abbildung 10, dass eine detailliertere Modellierung durchaus zu einer besseren Qualität, d.h. einer geringeren Unsicherheit, führt. Andererseits vermehren sich damit auch die Fehler der Eingangsdaten, weil sie ebenfalls feiner erhoben werden müssen. Somit kann es dazu kommen, dass die Eingangsdatenfehler bei einer feineren Spezifikation letztlich zu einem ungenaueren Modell führen. Anders ausgedrückt: wenn bekannt ist, dass die Datenqualität nicht gut ist (und auch nicht verbessert werden kann), sollte eine einfachere Spezifikation gewählt werden. WILLUMSEN (2016a) weist zudem darauf hin, dass ein feineres Modell im Analysefall zu einem unsichereren Modell im Bezugsfall führt, weil dann für mehr

Details Annahmen getroffen werden müssen. Dieses Phänomen hängt mit dem „Fluch der Dimensionalität“²³ bzw. der „Überanpassung“²⁴ zusammen.

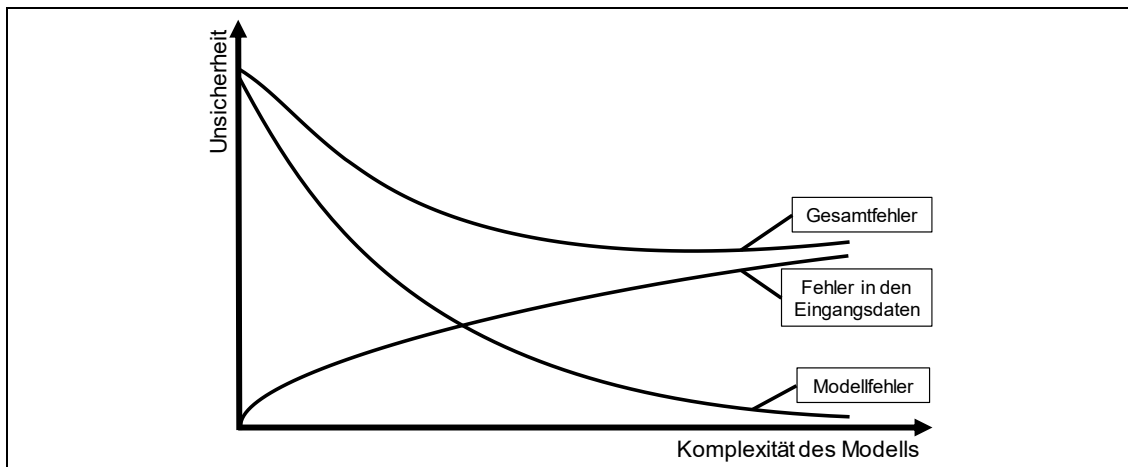


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Entwicklung von Fehlern bei zunehmender Modellkomplexität (Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an ALONSO (1968, S. 184)).

Abstraktions- und Aggregationsfehler sind eine Eigenschaft des Modells. Sie sind nur quantifizierbar, wenn es ein feiner strukturiertes und qualitativ hochwertiges Vergleichsmodell gäbe. Entsprechend ließe sich der Fehler reduzieren, wenn das Angebots- und Nachfragemodell feiner segmentiert werden. Dies setzt aber eine detailliertere Datenbasis voraus, ist zudem sehr ressourcenaufwändig und führt ggf. zu einer Erhöhung des Gesamtfehlers. Das Ziel muss es daher sein, einen Kompromiss zwischen hochaufgelöstem und stark abstrahiertem Modell zu finden.

Transferfehler

Transferfehler resultieren aus Modellparametern, die, unter der Annahme für den betrachteten Untersuchungsraum geeignet zu sein, in einem anderen zeitlichen oder räumlichen Kontext entwickelt wurden. Wie beim Abstraktionsfehler ist eine Quantifizierung dieses Fehlers nur möglich, wenn ein besseres Modell, d.h. ein Modell mit eigens geschätzten Parametern, vorliegt.

Entsprechend kann dieser Fehler für Parameter aus ähnlichen Untersuchungsräumen ggf. durch eine ergänzende oder erneute Kalibrierung auch reduziert werden. Für Modellparameter aus älteren Modellen – dies betrifft z.B. Modellprognosen – ist eine solche

²³ Der Fluch der Dimensionalität (engl.: curse of dimensionality) besagt, dass mit zunehmender Anzahl an abgebildeten Eigenschaften (Dimensionen), die nötige Datenmenge, um verlässliche Aussagen zu treffen, exponentiell zunimmt. (BELLMAN (1961, S. 94 f.))

²⁴ Überanpassung (engl.: overfitting) bedeutet, dass eine optimale Anpassung eines Modells an eine Stichprobe der Analysedaten keine Übertragbarkeit auf die Grundgesamtheit erlaubt und dass demzufolge keine Prognosefähigkeit gegeben ist. (BACKHAUS ET AL. (2011, S. 102))

erneute Kalibrierung nicht immer möglich, da für diesen Zeitpunkt ggf. keine Daten zur Verfügung stehen. Somit kann dieser Fehler nicht immer reduziert werden. (ORTÚZAR & WILLUMSEN (2011, S. 67 f.))

Implementierungsfehler

Dieser Fehler tritt auf, wenn die Modellspezifikation fehlerhaft umgesetzt wird (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 176)). WILLUMSEN (2016b) nennt Codierungsfehler, Fehler in Skripten und vergessene oder verkürzte Arbeitsschritte als Beispiele für Implementierungsfehler. Fehler dieser Fehlerklasse nehmen mit komplexer werdenden Modellen zu, eine korrekte Quantifizierung ist aber – wie bei allen Modellfehlern – erst nach ihrer Behebung möglich. Sie können durch gut (und auf dem aktuellen Wissensstand) geschultes Personal sowie interne und externe Review-Prozesse reduziert werden.

3.3.1.2 Fehler in den Eingangsdaten

Selbst wenn es ein Modell ohne Modellfehler geben würde, so ist dieses immer nur so gut wie seine Eingangsdaten. Diese unterliegen unumgänglich gewissen Fehlern, die in Abbildung 11 dargestellt sind und im Folgenden erläutert werden.

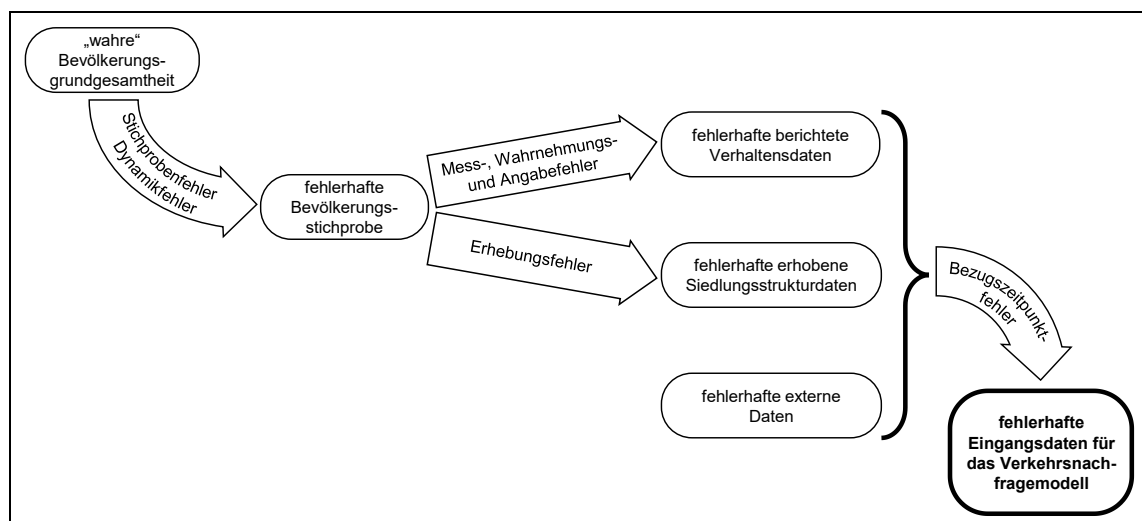


Abbildung 11: Fehlereinflüsse auf die Eingangsdaten eines Verkehrsnachfragemodells (Bildquelle: eigene Darstellung).

Stichprobenfehler

Die meisten Erhebungswerte beziehen sich nicht auf eine Erfassung der Grundgesamtheit (z.B. alle Einwohner eines Modellraums), sondern auf eine Zufallsstichprobe. Diese Zufallsstichprobe weist Abweichungen gegenüber dem wahren, unbekannten Wert der

Grundgesamtheit auf. Beispielweise beeinflusst das Umfragedesign in hohem Maße die Antwortrate und so kann z.B. eine Haushaltbefragung durch sehr aktive Haushalte verzerrt werden. Zudem sollte beachtet werden, dass mit Haushaltsbefragungen nur Einwohner des Untersuchungsraumes befragt werden und somit keine Informationen von Pendlern erhoben werden. (RASOULI & TIMMERMANS (2012, S. 4), FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 175 f.), FGSV (2018, S. 4))

Hinzu kommt, dass Datenerhebungen sehr ressourcenaufwendig sind (sowohl finanziell als auch zeitlich), weshalb der Erhebungsraum häufig möglichst eng gefasst wird. In der Folge kann dies dazu führen, dass ggf. relevante Teilräume ausgeschlossen werden. (MACKIE & PRESTON (1998, S. 2))

Das Konfidenzintervall einer Messgröße definiert einen Bereich, in dem der wahre Wert für ein vorgegebenes Konfidenzniveau (z.B. 95 %) liegt. Die relativen Abweichungen eines gemessenen Mittelwerts vom wahren, unbekannten Mittelwert sind bei kleinen Stichproben größer als bei großen Stichproben – sie nehmen aber auch bei steigendem Detaillierungsgrad der Befragung zu. Stichprobenfehler sind mit Methoden der Statistik quantifizierbar. Sie können sowohl zufällig als auch systematisch auftreten und lassen sich durch höhere Stichprobengrößen oder geeignete Gewichtungen reduzieren. Empfehlungen und Hinweise dazu sind unter anderem in den Empfehlungen für Verkehrserhebungen (EVE (FGSV (2012b)) bzw. deren Ergänzungen (FGSV (2018)) oder in AXHAUSEN (2019) zu finden. (RASOULI & TIMMERMANS (2012, S. 4), FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 176 f.))

Dynamikfehler

Dynamikfehler sind ein klassisches Beispiel für die variabilitätsbasierte Unsicherheit nach WALKER ET AL. (2003). Die an einem Tag erhobenen Daten entsprechen nur einer Stichprobe für die Grundgesamtheit aller Tage. Auch bei einer 100 %-Stichprobe schwanken die beobachteten Werte von Tag zu Tag, z.B. aufgrund wöchentlicher oder saisonaler Verhaltensmuster. Ebenso gibt es im Minuten- oder Stundenbereich Variationen, was z.B. für zeitlich sehr fein differenzierte Verkehrsnachfragemodelle relevant ist. All dies erschwert die Definition eines repräsentativen Erhebungszeitraums.

Durch bessere und längere Erhebungen können Dynamikfehler reduziert werden. Empfehlungen und Hinweise dazu sind ebenfalls in den Empfehlungen für Verkehrserhebungen (EVE (FGSV (2012b)) bzw. deren Ergänzungen (FGSV (2018)) oder in AXHAUSEN (2019) zu finden. Beispielsweise sollten die Erhebungstage auf längere Zeiträume (sechs Wochen oder mehr) verteilt werden, um zufällige Ereignisse, wie schlechte Witterungsbedingungen oder Großereignisse, zu minimieren. Außerdem sollte die Erhebung im Frühling oder Herbst sowie außerhalb der Ferien und nicht während Großveranstaltungen stattfinden. Dynamikfehler können mit Methoden der Statistik quantifiziert werden. (ORTÚZAR & WILLUMSEN (2011, S. 382 f.), WILLUMSEN (2017), FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 177), FGSV (2018, S. 3))

Messfehler bei Mobilitäts- und Verkehrsdaten

Jede Messung weist Fehler auf. Das betrifft die Erfassung der zurückgelegten Wege (Werden die Wege in der benötigten Granularität für alle Modi und für alle Aktivitäten berichtet?) mit den zugehörigen Reiseweiten (ohne / mit Geocodierung) und die Messung verkehrlicher Kenngrößen (z.B. Verkehrsaufkommen, Verkehrsstärke, Fahrtzeit). Messmethoden (webbasierte, persönliche oder schriftliche Befragung, ohne / mit GPS, manuelle / automatisierte Zählung), Messgeräte und Auswertemethoden haben zusätzlich einen großen Einfluss auf die resultierenden Erhebungswerte. Probanden einer Befragung machen wissentlich oder unwissentlich falsche Angaben: sie runden Entfernungs- und Zeitangaben, sie berichten keine kurzen Wege, weil sie sie für nicht-relevant halten oder es gibt schlicht Missverständnisse bezüglich der Intention mancher Fragen. Zudem nehmen sie Widerstände immer subjektiv gefärbt wahr und sie kennen selten alle verfügbaren Alternativen für eine Wahlentscheidung. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 176))

SAMMER ET AL. (2018, S. 650 ff.) stellen diesbezüglich fest, dass Wege zu Fuß, mit dem Rad oder als Pkw-Fahrende häufig unterrepräsentiert sind. Außerdem werden Pendelwege signifikant überschätzt, während Einkaufs- und Freizeitwege unterschätzt werden. Allgemein berichten sie von bis zu 30 % zu wenig erhobener Nachfrage im Personen- und Güterverkehr. Darüber hinaus stellen sie systematische Verzerrungen in Befragungen fest, die z.B. daher rühren, dass Personen, die nicht oder nur geringfügig mobil sind, bereitwilliger Angaben zu ihrem Mobilitätsverhalten machen.

Viele dieser Fehler hängen zudem mit Stichproben-, Dynamik- und Bezugszeitpunktfehlern oder auch Aggregationsfehlern zusammen. Messfehler bei Mobilitäts- und Verkehrsdaten können durch bessere Erhebungsmethoden teilweise reduziert werden. Auch hierfür finden sich Empfehlungen und Hinweise in den Empfehlungen für Verkehrserhebungen (EVE, FGSV (2012b)) bzw. deren Ergänzungen (FGSV (2018)) oder in AXHAUSEN (2019). Zusätzlich bietet es sich an, Probandenangaben kritisch zu prüfen und diese in einem Nachbearbeitungsschritt ggf. zu korrigieren. Beispielsweise können geocodierte Probandenangaben mit einem Verkehrsnachfragemodell überprüft bzw. korrigiert werden. Darüber hinaus empfehlen SAMMER ET AL. (2018, S. 655 ff.) spezielle Verfahren für die Imputation und Gewichtung von nicht berichteten Wegen (und ihrer Eigenschaften) und die Kombination der Erhebungsdaten mit unabhängigen Datenquellen (z.B. Daten von automatischen Dauerzählstellen, Fahrerbefragungen, Mautdaten).

Messfehler bei Siedlungsstrukturdaten

Ein Verkehrsnachfragemodell für den Personenverkehr bildet den Zusammenhang zwischen der Nachfrage von Einwohnern nach Aktivitäten und dem Verkehrsangebot ab. Als Ergebnis liefert es Ortsveränderungen und damit Verkehrsstärken. Diese hängen damit unmittelbar von den Siedlungsstrukturdaten ab, die aber immer unbekannte Ungenauigkeiten aufweisen werden. Bei den Einwohnerzahlen können amtliche Statistiken

Fehler aufgrund von Zweitwohnsitzen und Wochenendpendlern enthalten. Bei den Aktivitätenorten können viele Größen, wie Arbeitsplätze oder Orte für Freizeitaktivitäten nur abgeschätzt werden, weil die Daten entweder unter Verschluss gehalten werden oder weil schlicht keine Daten vorliegen. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 176))

Da es sich hierbei häufig um Daten handelt, die nicht selbst erhoben werden, ist die Größenordnung dieses Fehlers schwer abzuschätzen, wenn keine Unsicherheitsangaben mitgeliefert werden. Gegebenenfalls ist eine Abschätzung mittels systematischer Variation von Modellparametern und -variablen (siehe Kapitel 3.4.2.3) möglich. Um Fehler dieser Fehlerklasse zu reduzieren, kann die amtliche Statistik um Daten aus anderen Quellen oder Erhebungen ergänzt werden. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 176))

Fehler in externen Daten

Verkehrsangebotsdaten werden häufig nicht selbst erhoben, sondern von Dritten übermittelt, z.B. Streckennetzdaten, Knotenpunktsteuerungen, zulässige Abbiegeverbindungen, Maut-Preissysteme und Daten zu ÖV-Liniennetzen, Fahrplänen sowie Ticketpreiskstrukturen von ÖV-Betreibern. Trotzdem können diese Daten fehlerhaft sein. Zudem können Daten, die von Dritten geliefert werden, eine Nachbearbeitung erforderlich machen, z.B. das Zusammenführen von bestehenden Strecken mit neuen Streckenattributen aus anderen Datenquellen. Solche Nachbearbeitungsschritte sind ebenfalls fehleranfällig.

Ähnlich wie bei den Verkehrsangebotsdaten kommen viele Eingangsdaten eines Verkehrsnachfragemodells von Dritten, z.B. Daten zur Flächenentwicklung, Daten zur Verfügbarkeit von Mobilitätswerkzeugen auf Verkehrszellenebene, Daten zu externen Pendlerverkehren aus übergeordneten Modellen oder Verkehrsstärken an lokalen Zählstellen. Sofern hierbei keine Unsicherheitsangaben oder verschiedene Szenarien mitgeliefert werden, ist es als nicht involvierte Partei sehr schwer bis unmöglich, diese Fehler zu benennen oder abzuschätzen. Gegebenenfalls können die Fehler durch kritische Prüfungen oder vor-Ort-Besuche verringert werden (WILLUMSEN (2016c)).

Bezugszeitpunktfehler

Datenerhebungen sind sehr ressourcenaufwendig – sowohl finanziell als auch zeitlich, weshalb häufig auf ältere Daten zurückgegriffen wird, die ggf. nicht zum aktuellen Ausbauzustand oder Mobilitätsverhalten passen. Um valide Aussagen mit einem Verkehrsnachfragemodell treffen zu können, ist es aber sehr wichtig, dass die Modelleingangsdaten (Verkehrserhebungsdaten, Siedlungsstrukturdaten, Verkehrsangebotsdaten) miteinander harmonisieren. Das setzt voraus, dass die Daten möglichst aus dem gleichen Jahr stammen und dass die Rahmenbedingungen (z.B. temporäre Wirkungen von Baustellen, Eröffnung neuer Verkehrserzeuger oder Verkehrsanlagen im Bezugsjahr) einheitlich sind. Bei eigens durchgeführten Erhebungen muss besonders darauf geachtet

werden, dass zwischen der Planung der Erhebung und dem Vorliegen der Ergebnisse realistischweise mit einer Zeitspanne von ca. einem Jahr zu rechnen ist (FGSV (2018, S. 3)). Bezugszeitpunktfehler betreffen potenziell alle Eingangsdaten des Modells. Sie können durch eine gründliche Überprüfung der Eingangsdaten ggf. offengelegt und (wenn Daten für den gewünschten Zeitpunkt verfügbar sind) behoben werden. Die Größenordnung der Auswirkung von unerkannten Fehlern wäre jedoch erst nach ihrer Behebung ersichtlich. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 177))

3.3.1.3 Anwendungsfehler (Fehlinterpretation, Voreingenommenheit, Täuschung)

Durch eine falsche Anwendung des Modells, z.B. zur Berechnung der verkehrlichen Wirkungen nicht definierter Maßnahmen, können Modellergebnisse falsch oder irreführend werden. Gleiches gilt, wenn getroffene Annahmen für die Ergebnisinterpretation oder die Ergebnisunsicherheit verschwiegen, ignoriert oder fehlinterpretiert werden. Diese Fehler müssen nicht absichtlich passieren, es ist jedoch möglich, z.B. um bestimmte Maßnahmen zu rechtfertigen. Beispielsweise spekulieren FLYVBJERG ET AL. (2006, S. 16) und BAIN (2009, S. 479 ff.), dass dies bei kostenintensiven Eisenbahn- bzw. Mautstraßenprojekten vorkommen kann.

Besonders hervorzuheben sind hierbei Fehler, die im Englischen als „cognitive bias“, „optimism bias“ oder „appraisal bias“ bezeichnet werden. Sie beschreiben – willentlich oder unwillentlich – voreingenommene, unrealistisch optimistische Erwartungshaltungen gegenüber bestimmten Entwicklungen oder Maßnahmen. Dies geschieht meist durch eine einseitige, subjektive Sicht auf bestimmte Projekte, um deren Finanzierung zu rechtfertigen oder um ein (politisches) Ziel zu erreichen. Auch daher werden z.B. die Auswirkungen von Schienenverkehrsprojekten oder Mautstraßen häufig zu positiv betrachtet (siehe Kapitel 3.2). (MACKIE & PRESTON (1998, S. 5 f.), FLYVBJERG ET AL. (2006, S. 16), BAIN (2009, S. 473 f.), NICOLAISEN & NÆSS (2015, S. 57))

Die Größenordnung dieses Fehlers kann z.B. durch Referenzklassen (siehe Kapitel 3.4.1.2) abgeschätzt werden. Eine klar verständliche Dokumentation, die transparent alle Einsatzbereiche, Arbeitsschritte, Annahmen, Limitationen, Unsicherheiten etc. auflistet, hilft zudem Anwendungsfehler zu reduzieren. Des Weiteren helfen auch gut (und auf dem aktuellen Wissensstand) geschultes Personal, das Lernen aus bisherigen Modellen und ex-post-Analysen sowie interne und externe Review-Prozesse für die Modellanwendung und Modellergebnisinterpretation.

3.3.2 Fehler bei Prognoseannahmen

Diese Fehlerklasse beinhaltet Fehler aus unsicheren Annahmen über zukünftige Entwicklungen²⁵. Sie könnten daher sowohl den „Modellfehlern“ als auch den „Fehlern bei den Modelleingangsdaten“ zugerechnet werden. Sie beziehen sich aber immer auf den Bezugsfall.

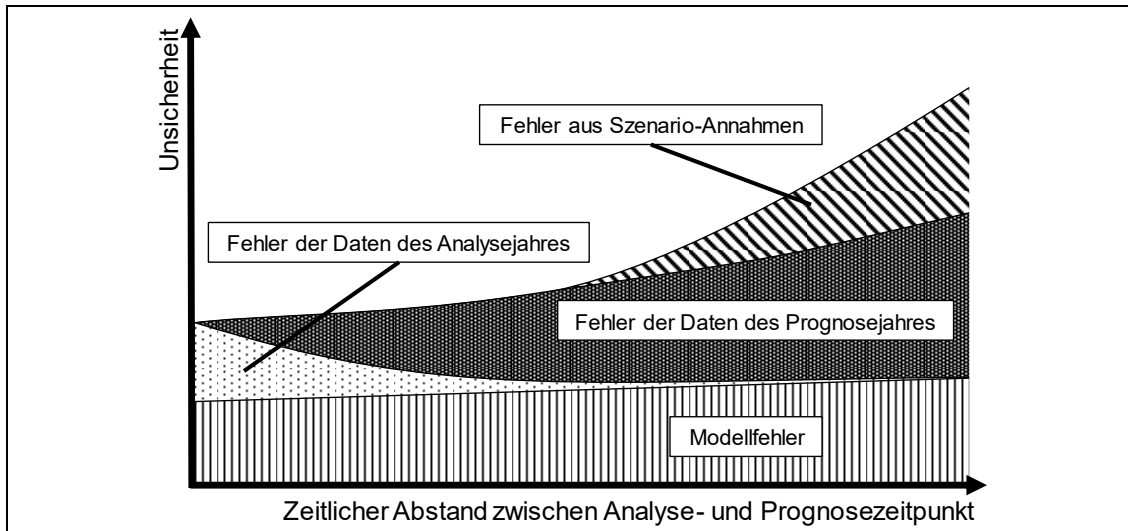


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Entwicklung von Fehlern (Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an WILLUMSEN (2016a)).

Fehler der Prognoseannahmen haben nach WILLUMSEN (2016a) vier Hauptfehlerquellen (siehe Abbildung 12):

- **Modellfehler (siehe Kapitel 3.3.1):**
Diese Fehlerklasse gibt es im Analyse- und im Bezugsfall des Modells. Allerdings können sich Präferenzen und Entscheidungsverhalten langfristig verändern, was zu einer Zunahme dieses Fehlers führt.
- **Fehler in den Daten des Analysejahres (siehe Kapitel 3.3.1.2):**
Jedes Modell enthält unvermeidlich Fehler dieser Klasse. Je älter die Daten werden, desto geringer wird ihr Einfluss, da in Bezugsfällen immer Daten für die Prognosezeitpunkte verwendet werden sollten. Diese wiederum hängen aber ggf. mit den Daten des Analysejahres zusammen, z.B. durch Fortschreibungen bzw. Trendentwicklungen.
- **Fehler in den Daten des Prognosezeitpunktes bzw. der Prognosezeitpunkte:**
Je weiter in der Zukunft ein Prognosezeitpunkt liegt, desto mehr Annahmen müssen getroffen werden und desto größer werden die Unsicherheiten.

²⁵ Auch eine naive Prognose, d.h. die Annahme, dass sich nichts ändert, ist nur eine Annahme über die zukünftige Entwicklung und unterliegt daher auch einer Unsicherheit.

- Fehler aus Planfall-Annahmen:

Planfälle (oder Szenarien) bilden die Zukunft unter der Annahme von eingetretenen Entwicklungen und Maßnahmen ab. Welche Entwicklungen und Maßnahmen bis zum Bezugszeitpunkt eingetreten sind bzw. realisiert werden ist aber bis zu einem bestimmten Maße ungewiss und birgt daher eine Unsicherheit.

Es gibt eine Vielzahl an unsicheren Entwicklungen, die direkten Einfluss (durch veränderte Eingangsdaten) oder indirekten Einfluss (durch unvorhergesehene Entwicklungen in Wirtschaft, Technologie oder Politik) auf das Modell haben. Zudem beeinflussen sich diese Entwicklungen gegenseitig, da z.B. politische Entscheidungsträger häufig eine Agenda verfolgen und für deren Erreichung entsprechende Maßnahmen veranlassen. Folgende (nicht abschließende) Auflistung in Tabelle 7 zeigt solche Unsicherheitsursachen. Für sie gilt es, für den Prognosezeitpunkt passende Annahmen (und ggf. auch Streubereiche) zu definieren.

Ein weiteres Beispiel für Prognoseannahmen sind die Modellparameter. Diese werden auf Grundlage von Verhaltensdaten kalibriert und daher gelten sie streng genommen nur für den Zeitpunkt, an dem die Daten erhoben werden. In der Praxis der Verkehrsnachfragemodellierung ist es aber üblich, die Parameter auch für den Prognosezeitpunkt unverändert zu lassen (siehe z.B. WebTAG (UK DfT (2018b, S. 6))). Sie werden also unter der Annahme verwendet, dass das erhobene Verhalten statisch ist und sich auch in Zukunft nicht ändert. Einzelne Individuen können ihre Präferenzen und ihr Verhalten aber durchaus ändern und je mehr Verkehrsteilnehmende dies tun, desto schlechter bilden die Parameter die Realität ab. Andererseits zeigen Zeitreihenauswertungen in Deutschland wie die des Deutschen Mobilitätspanels (MOP, ECKE ET AL. (2019, S. 15 ff.)), dass die Annahme von relativ stationärem Verhalten durchaus berechtigt ist. In anderen Ländern, wie z.B. Großbritannien, gibt es gegenläufige Trends. Dort sind in den vergangenen ca. 20 Jahren sowohl die Wegeanzahl (für den motorisierten Individualverkehr (MIV) und insgesamt) als auch die zurückgelegte Wegeweite und die benötigte Wegezeit gesunken (MARSDEN ET AL. (2018, S. 16)).

Unsicherheit hinsichtlich des Mobilitätsverhaltens	<ul style="list-style-type: none"> • Wie ändern sich Arbeitsformen (z.B. flexible Arbeitszeiten und -orte, Home-Office, staatlich geförderte Elternzeit, berufstätige Elternpaare) und welchen Einfluss hat das auf das realisierte Mobilitätsverhalten zum Prognosezeitpunkt? • Welche weiteren relevanten Verhaltensänderungen ergeben sich durch die Digitalisierung? Wie verändern sich z.B. Einkaufsverhalten (Online-Shopping / Home-Delivery) und Kommunikationsformen (z.B. Social Media)? Welchen Einfluss hat das auf das realisierte Mobilitätsverhalten zum Prognosezeitpunkt bzw. für welche Aktivitäten werden auch zukünftig noch physische Ortsveränderungen nötig sein? • Gibt es bei längeren Bauphasen von größeren Infrastrukturprojekten einen Gewöhnungseffekt, sodass sich das Verhalten der Reisenden nach Ende der Bauphase nicht auf die neuen und objektiv besseren Alternativen verlagert? (MACKIE & PRESTON (1998, S. 3))
Unsicherheit hinsichtlich der Verkehrsnachfrage	<ul style="list-style-type: none"> • Wie ist die demografische Entwicklung bis zum Prognosezeitpunkt? BAIN (2017, S. 39 ff.) zeigt z.B. den Einfluss des Fehlers bei Bevölkerungsprognosen auf Verkehrszellenebene. Der mittlere absolute Fehler nimmt hierbei mit der Länge des Prognosezeitraumes zu. Dies gilt ebenso für kleiner werdende Stichproben (durch feinere Verkehrszelleneinteilungen). Mit der Demografie hängen weitere Einwohnerattribute zusammen, die möglichst auf Verkehrszellenebene adressiert werden müssen: Wie verändern sich die Lebenserwartung, das Mobilitätsverhalten, die Haushaltszusammensetzungen, die Haushaltseinkommen, der Pkw- und Führerschein-Besitz? Welchen Einfluss hat die Stadt-Land-Migration („Landflucht“) und die Immigration? • Wie entwickelt sich die Flächennutzung und gibt es Nutzungsänderungen bei vorhandenen Bebauungen. Laut FLYVBJERG ET AL. (2006, S. 15 ff.) ist dies eine der häufigsten Erklärungen für Ungenauigkeiten in der Nachfrageprognose. • Wie entwickeln sich die Preise für Kraftstoffe, ÖV-Tickets und Mautstrecken? • Welche Auswirkungen haben globale, transnationale und nationale Entwicklungen in Wirtschaft und Politik (z.B. Wirtschaftskrisen, Kriege, Handelsabkommen, Entwicklung der EU, Brexit, globale Notstände wie die Covid19-Pandemie)? Was bedeutet dies konkret für den Untersuchungsraum hinsichtlich der Arbeitsplatzentwicklung auf Verkehrszellenebene und die Entwicklung des Pendelverkehrs?
Unsicherheit hinsichtlich des Verkehrsangebots	<ul style="list-style-type: none"> • Wie entwickelt sich das Verkehrsangebot bis zum Prognosezeitpunkt? Welche Annahmen werden für den ÖV-Betrieb (z.B. Takt, Ticketpreise, Anschlüsse zu anderen Linien) getroffen? Gibt es Priorisierungen von bestimmten Infrastrukturprojekten bzw. Verzögerungen und Änderungen in der Umsetzung von bereits beschlossenen Infrastrukturprojekten? Aufgrund fehlender Finanzierung, öffentlichen Widerstands oder sich ändernder Prioritäten entspricht das modellierte Verkehrsangebot häufig nicht der Realität im Bezugsfall (PARTHASARATHI & LEVINSON (2010, S. 436 ff.). • Wie entwickelt sich die Konkurrenzsituation zwischen mehreren neuen Verkehrsangeboten? Dies reicht von klassischen Fällen wie der Modellierung von Auswirkungen einer neuen Brücke bis hin zu neuen Technologien und Angebotsformen, z.B. automatisierte Fahrzeuge, Mikromobilität mit E-Scootern, Car- und Ridesharingangebote, Lufttaxis?

Tabelle 7: Mögliche Ursachen für Prognoseunsicherheiten.

Dass die Gegenwart die Projektion der Zukunft stark beeinflusst, zeigt sich im Frühjahr 2020 am Beispiel von diversen Diskussionen (WILLUMSEN (2020a), WILLUMSEN (2020b), VAN VUREN (2020)) zu den potenziellen Auswirkungen der Covid19-Pandemie auf die Verkehrsnachfragemodellierung durch langfristige Verhaltensänderungen. Als Beispiele für langfristige Veränderungen werden dort genannt:

- eine zunehmende Bereitschaft und Möglichkeit für Home-Office, Videokonferenzen und E-Learning,
- durch veränderte, ortsungebundene Arbeitsformen könnte eine Abkehr oder Umkehrung der „Landflucht“ stattfinden,

- aufgrund der resultierenden Wirtschaftskrise wird es strukturelle Änderungen in den Siedlungsstrukturdaten geben, wie wegfallende Arbeitsplätze und steigende Arbeitslosenzahlen,
- die unsicheren Auswirkungen auf den Pkw-Besitz,
- eine potenzielle Kompensation von Pendel- mit Freizeitwegen,
- dauerhafte Änderungen im Moduswahlverhalten (weniger ÖV-Massenverkehrsmittel, Rückkehr zum Individualverkehr (Pkw oder Fahrrad) und eine größere Unsicherheit bezüglich der angenommenen Akzeptanz von automatisierten Fahrzeugen und Ride-sharing-Angeboten),
- die unsichere Entwicklung von Öl- und Treibstoffpreisen und
- die bisherigen Annahmen über konstantes Mobilitätsverhalten oder über langfristige Trends wie z.B. die Tourismusentwicklung, die angepasst werden müssen.

Der Umgang mit den beschriebenen Unsicherheiten wird idealerweise in einer bindenden Richtlinie festgelegt. So geben z.B. in Großbritannien die WebTAG-Richtlinien (UK DfT (2018a, S. 3), UK DfT (2018b, S. 2 ff.)) Vorgaben und Hinweise für die Erstellung von Prognosen:

- Es sollte nicht nur ein Prognosezeitpunkt, sondern mehrere Zeitpunkte zwischen der Einführung einer Maßnahme und dem finalen Prognosezeitpunkt modelliert werden.
- Für Wirtschaftlichkeitsabschätzungen sollte der Prognosezeitpunkt möglichst weit in der Zukunft liegen. So sollen im Geltungsbereich der WebTAG-Richtlinien für Verkehrsinfrastrukturprojekte mit theoretisch „unbegrenzter“ Lebenszeit, z.B. Straßen-, Schienen- oder Flughafeninfrastruktur, Kosten-Nutzen-Abschätzungen für einen Zeitraum von 60 Jahren nach Eröffnung erstellt werden.
- Die Richtlinien geben auch konkrete Hinweise, welche Nachfrageentwicklungen im Standard-Bezugsfall und welche im Rahmen einer Szenarienanalyse (siehe Kapitel 3.4.2.3) zu berücksichtigen sind. Voneinander unabhängige Annahmen, sollten auch unabhängig voneinander geprüft werden.
- Die getroffenen Annahmen und alle bekannten Unsicherheiten müssen transparent in einem Unsicherheits-Logbuch aufgelistet und bewertet werden. Die Unsicherheiten sollen möglichst auch mit Streubereichen ihrer möglichen Ausprägungen (95 % Konfidenzintervall) quantifiziert oder zumindest qualifiziert werden.

Die Größenordnung dieser Fehlerklasse kann zum Teil durch die systematische Variation von Modellparametern- und variablen (siehe Kapitel 3.4.2.3) eingegrenzt werden. Durch die Bündelung von abhängigen, wahrscheinlichen Entwicklungen in Szenarien wird zudem die Unsicherheit der Prognose reduziert (HARTGEN (2013, S. 1141)). Bei der Abschätzung sollte außerdem beachtet werden, dass Prognosefehler nicht zufällig sind, sondern systematisch in Abhängigkeit des Modus wirken (FLYVBJERG (2005, S. 524)).

Zusammenfassung der Unsicherheiten und Abweichungen bei Verkehrsnachfragemodellen

Tabelle 8 zeigt einen zusammenfassenden Überblick über die Ursachen für die Unsicherheiten und Abweichungen bei Verkehrsnachfragemodellen. Die Bewertung der Quantifizierungs- und Reduzierungsmöglichkeiten basiert auf einer Abschätzung des Aufwandes und der Möglichkeit der Umsetzung (z.B. der Aufwand für die Beauftragung eines externen Reviews, für eine bessere Datenerhebung oder um ein feineres Modell zu bauen, damit der Abstraktionsfehler abgeschätzt werden kann).

		Quantifizierung	Reduzierung
Fehler im Analysefall: Modellfehler	Spezifikationsfehler	-	+
	Abstraktionsfehler	-	-
	Transferfehler	-	○ / -
	Implementierungsfehler	-	+
Fehler im Analysefall: Eingangsdatenfehler	Stichprobenfehler	+	○
	Dynamikfehler	+	○
	Messfehler bei Mobilitäts- und Verkehrsdaten	○	○
	Messfehler bei Siedlungsstrukturdaten	-	○ / -
	Fehler in externen Daten	-	-
	Bezugszeitpunktfehler	-	○
Fehler im Analysefall: Anwendungsfehler		○	+
Fehler bei Prognoseannahmen		-	-
Legende: - nur sehr eingeschränkt möglich bzw. sehr aufwendig ○ möglich, aber aufwendig + gut möglich bzw. durch Standardverfahren mit begrenztem Aufwand verbunden			

Tabelle 8: Übersicht über die Ursachen für Unsicherheiten und Abweichungen bei Verkehrsnachfragemodellen.

3.4 Methoden zur Bestimmung von Unsicherheiten

Die Erkenntnis, dass bestimmte Unsicherheiten bestehen, nützt nicht viel, wenn unklar ist, welchen Einfluss sie auf das Modellergebnis haben bzw. wie robust das Modell trotz der bestehenden Unsicherheiten ist. In Abbildung 13 wird dargestellt, wie sich die Stufen der Unsicherheit nach WALKER ET AL. (2003) qualifizieren bzw. quantifizieren lassen. Die erwähnten Methoden werden im Folgenden genauer vorgestellt.

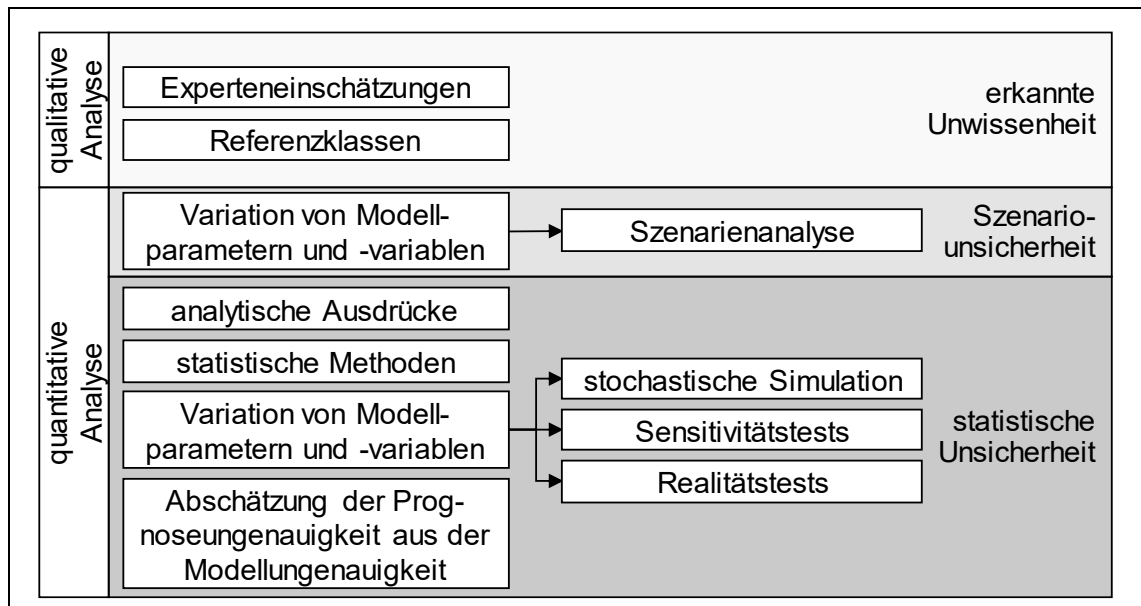


Abbildung 13: Methoden zur Bestimmung von Unsicherheiten (Bildquelle: eigene Darstellung in Anlehnung an MANZO ET AL. (2014, S. 27)).

3.4.1 Qualitative Analysen

Die erkannte Unwissenheit beschreibt die Unsicherheit aus fehlendem Wissen über funktionale Zusammenhänge. Diese Unsicherheit kann theoretisch durch weitere Nachforschungen reduziert werden, was aus diversen Gründen (z.B. finanzielle, zeitliche, technologische Gründe) aber häufig ausbleibt. Ihre Größenordnung kann aber qualitativ durch Experteneinschätzungen oder mittels Referenzklassen beschrieben werden. (MILLER & SZIMBA (2015, S. 70))

3.4.1.1 Experteneinschätzungen

Experteneinschätzungen basieren nach MILLER & SZIMBA (2015, S. 70) hauptsächlich auf der Erfahrung und der Intuition der Experten. Es ist daher ratsam, Expertenmeinungen möglichst strukturiert abzufragen. Beispielsweise schlagen LELEUR ET AL.

(2015, S. 365 ff.) hinsichtlich der Kombination von einzelnen Entwicklungen und Maßnahmen eine Kreuztabelle für die Plausibilitätsprüfung vor. Des Weiteren weisen LELEUR ET AL. (2015, S. 368 f.) darauf hin, dass verschiedene Studien zu dem Schluss kommen, dass selbst Experten nicht die komplette Bandbreite von möglichen Entwicklungen abschätzen können, sondern nur ca. 60 % der tatsächlichen Bandbreite für möglich halten. Dieses Ergebnis kann so interpretiert werden, dass die minimalen und maximalen Expertenschätzungen als 20 %- bzw. 80 %-Perzentil der möglichen Ausprägungen definiert werden.

Eine Möglichkeit, fachbereichsübergreifende Experten-Prognosen zu erstellen, ist z.B. ein Zukunftslabor, das Zukunftsszenarien für Gesellschaft, Energieversorgung, Digitalisierung, Arbeitswelt, Familienpolitik, Demografie, Verkehr, Raumordnung etc. entwickelt. Dabei sollten auch konkrete Maßnahmen und Entwicklungen auf kommunaler Ebene beachtet werden. (MARSDEN ET AL. (2018, S. 46 ff.))

3.4.1.2 Abschätzung mittels Referenzklassen

Die Abschätzung mittels Referenzklassen (engl.: Reference Class Forecasting) ist eine Methode zur Abschätzung der Unsicherheit einer konkreten Maßnahme. Dazu werden die berechneten Wirkungen der Maßnahme mit den Erfahrungen ähnlicher, vergleichbarer und bereits umgesetzter Maßnahmen verglichen. Weil die Planenden somit die Maßnahme „von außen“, ohne subjektive Empfindungen betrachten und Abweichungen zu ähnlichen Maßnahmen erklären müssen, können systematische Fehler durch Voreingenommenheit (siehe Kapitel 3.3.1.1) reduziert werden. Kern dieser Methode sind sogenannte Anpassungsfaktoren für die modellierte Nachfrage und die modellierten Kosten, die auf einer Auswertung vieler Ex-post-Analysen basieren. (LELEUR ET AL. (2015, S. 364), NICOLAISEN (2012, S. 212))

Nach FLYVBJERG & COWI (2004, S. 37), FLYVBJERG ET AL. (2006, S. 17) und NICOLAISEN (2012, S. 212) besitzt das Abschätzen mittels Referenzklassen aber mehrere Nachteile:

- Die betrachtete Maßnahme muss einer relevanten Maßnahmenkategorie zugeordnet werden. Für jede dieser Kategorien müssen ausreichend Daten zur Verfügung stehen, um statistisch bedeutsame Aussagen abzuleiten. Dies bedeutet, dass systematisch Ex-post-Analysen zu verschiedensten Maßnahmentypen angefertigt werden müssen und dass deren Ergebnisse von den entsprechenden Verantwortlichen einsehbar sein müssen.
- Da jede individuelle Maßnahme spezifische Eigenheiten besitzt, ist die Methode nur für aggregierte Modellergebnisse anwendbar. Genauso enthält jedes Modell individuelle Annahmen, die bei der Einordnung der spezifischen Maßnahme beachtet werden müssen.
- Die Methode liefert keine Aussagen zum Grund der Unsicherheit.

- Die Anpassungsfaktoren für die Kosten der Maßnahme könnten missbraucht werden, um z.B. das Projektbudget künstlich nach oben zu korrigieren.

Eine Abwandlung der klassischen Abschätzung mittels Referenzklassen wird von LELEUR ET AL. (2015) präsentiert, bei der sie die Anpassungsfaktoren zur Ableitung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen heranziehen, die dann z.B. in Monte-Carlo-Simulationen (siehe Kapitel 3.4.2.3) Einsatz finden können.

3.4.2 Quantitative Analysen

Im Gegensatz zur erkannten Unwissenheit können Szenariounsicherheit und statistische Unsicherheit quantifiziert werden. Dafür stehen diverse Maße, sogenannte Gütemaße, und mehrere Methoden zur Verfügung, die im Folgenden genauer erläutert werden.

3.4.2.1 Gütemaße für die Quantifizierung von Ungenauigkeiten

Um die Güte eines Modells zu bestimmen, entweder als Validitätsnachweis im Modell-aufbau oder zur Bestimmung der Ungenauigkeit im Rahmen von Ex-post-Analysen, werden Vergleichsdaten einer Referenz und des Modells benötigt. Die Abweichungen zwischen Referenz und Modell werden dann mit geeigneten statistischen Gütemaßen quantifiziert und bewertet. Der Vergleich von Modell- und Messwerten kann sich auf Einzelwerte, Mengen von Einzelwerten, Verteilungen und Matrizen beziehen. Zusätzlich können Modellergebnisse visuell geprüft werden. In der Literatur existieren diverse Gütemaße zur Quantifizierung von Abweichungen. Eine gute Übersicht gibt der Forschungsbericht von FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 178 ff.), auf den für weitere Informationen verwiesen wird. Im Folgenden werden die gebräuchlichsten und die für diese Arbeit relevanten Gütemaße kurz erläutert.

Gütemaße für Einzelwerte

Zwei einfache und gängige Methoden, die Differenz zweier Werte zu quantifizieren, sind die absolute und die relative Abweichung. Allerdings sind beide Methoden für eine analytische Bewertung nicht hilfreich. Ein festgelegter relativer Schwellenwert kann z.B. gleichzeitig akzeptable Abweichungen für kleine Wertebereiche und unakzeptabel große Abweichungen für große Wertebereiche bedeuten. So kann eine relative Abweichung von 50 % für die Überprüfung einer stündlichen Verkehrsstärke bei einer Nebenstraße mit nur 100 Fahrzeugen pro Stunde geeignet sein – nicht aber bei einer höheren Verkehrsstärke von 1.000 Fahrzeugen pro Stunde. Ebenso definiert eine absolute Abweichung von 50 Fahrzeugen pro Stunde einen geeigneten Schwellenwert für eine Zählstelle mit nur 100 Fahrzeugen pro Stunde. Andererseits wäre es viel zu anspruchsvoll,

den gleichen absoluten Schwellenwert für eine Zählstelle mit 1.000 Fahrzeugen zu fordern. Die Praxis zeigt, dass die absolute Abweichung ein geeignetes Maß für niedrige und die relative Abweichung ein geeignetes Maß für hohe Wertebereiche ist. Leider ist es schwierig zu sagen, ob ein Wert niedrig oder hoch ist. 1.000 Fahrzeuge sind ein hoher Stundenwert, aber ein niedriger Tageswert. (FRIEDRICH ET AL. (2019a, S. 723))

Um dieses Problem zu lösen, ist es möglich, die Zählwerte zu klassieren und für jede Verkehrsstärkenklasse eine akzeptable relative oder absolute Abweichung zu definieren. Dieser Ansatz wird beispielsweise in den britischen Richtlinien WebTAG Unit 3.1 (UK DfT (2014, S. 19)), in einem paneuropäischen Modellierungshandbuch (MOTOS (2007, S. 302)) sowie in einem Bericht des American National Cooperative Highway Research Program (NCHRP Report 255, PEDERSEN & SAMDAHL (1982, S. 41)) verfolgt. Ein weiterer Ansatz ist die Verwendung von Gütemaßen, die sowohl die relative als auch die absolute Abweichung berücksichtigen. Ein gebräuchliches Gütemaß, das diese Anforderung zur Beurteilung der stündlichen Verkehrsstärke erfüllt, ist der sogenannte *GEH*. Benannt ist dieser Wert nach Geoffrey E. Havers, der ihn in den 1970er Jahren in der Verkehrsplanung einführte. (FRIEDRICH ET AL. (2019a, S. 723))

Da der *GEH*-Wert nicht nur positive Eigenschaften aufweist (siehe Tabelle 9), entwickeln FRIEDRICH ET AL. (2019a, S. 727 ff.) auf dessen Grundlage ein neues Gütemaß für die Bewertung von Einzelwerten: den Scalable Quality Value (*SQV*).

Eigenschaft	$a = \sqrt{(m-c)^2}$ (27)	$r = \frac{\sqrt{(m-c)^2}}{c}$ (28)	$GEH = \sqrt{\frac{2 \cdot (m-c)^2}{m+c}}$ (29)	$SQV = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{(m-c)^2}{f \cdot c}}}$ (30)
Das Gütemaß ist universell für verschiedene Wertebereiche einsetzbar.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Je größer der Erhebungswert ist, desto größer ist die akzeptierte absolute Abweichung zwischen Erhebungs- und Modellwert.	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Je größer der Erhebungswert ist, desto kleiner ist die akzeptierte relative Abweichung zwischen Erhebungs- und Modellwert.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Das Gütemaß ist symmetrisch zum Erhebungswert.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Das Gütemaß hat eine sinnvolle oder keine Einheit.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Das Gütemaß hat einen Wertebereich zwischen 0 und 1.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Tabelle 9: Übersicht über verschiedene Gütemaße zur Bewertung von Einzelwertpaaren (Quelle: in Anlehnung an FRIEDRICH ET AL. (2019a, S. 728)).

mit

m	Modellwert
c	Erhebungswert
f	Skalierungsfaktor
a	absolute Abweichung ²⁶
r	relative Abweichung ²⁶
GEH	Gütemaß GEH (benannt Geoffrey E. Havers)
SQV	Gütemaß SQV (Scalable Quality Value)

Eine wichtige Eigenschaft des SQV -Wertes ist es, dass er sich durch den Skalierungsfaktor f auf verschiedene Mobilitätskenngrößen anwenden lässt, z.B. Verkehrsstärken pro Tag und pro Stunde, Anzahl der Wege pro Person, mittlere Reiseweite und -zeit pro Weg, mittlere Reiseweite und -zeit pro Person. Dabei orientiert sich der Skalierungsfaktor f an der typischen Größenordnung der Mobilitätskenngröße (siehe Tabelle 10).

Kenngröße	Größenordnung	Skalierungsfaktor f
Zahl der Personenwege pro Tag (gesamt, pro Modus, pro Zweck)	10^0	1
mittlere Wegelänge in Kilometer	10^1	10
Zeitdauer aller Wege pro Person und Tag in Minuten	10^2	100
Verkehrsstärke pro Stunde	10^3	1.000
Verkehrsstärke pro Tag	10^4	10.000

Tabelle 10: Skalierungsfaktor f für verschiedene Kenngrößen (Quelle: in Anlehnung an FRIEDRICH ET AL. (2019a, S. 729)).

Der Wertebereich des SQV -Wertes liegt zwischen 0 und 1. FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 184) schlagen die folgenden allgemeinen Qualitätsbereiche vor. Die konkreten Anforderungen an die Modellierung hängen jedoch von der betrachteten Mobilitätskenngröße ab.

- $1,00 \geq SQV \geq 0,90$: sehr große Übereinstimmung
- $0,90 > SQV \geq 0,85$: große Übereinstimmung
- $0,85 > SQV \geq 0,80$: mittlere Übereinstimmung
- $0,80 > SQV \geq 0,75$: akzeptable Übereinstimmung
- $SQV < 0,75$: unzureichende Übereinstimmung

²⁶ Die Berechnungsvorschriften (und dementsprechend auch ihre Berechnungsergebnisse) von absoluter und relativer Abweichung können in verschiedenen Veröffentlichungen von den hier dargestellten Formeln geringfügig abweichen.

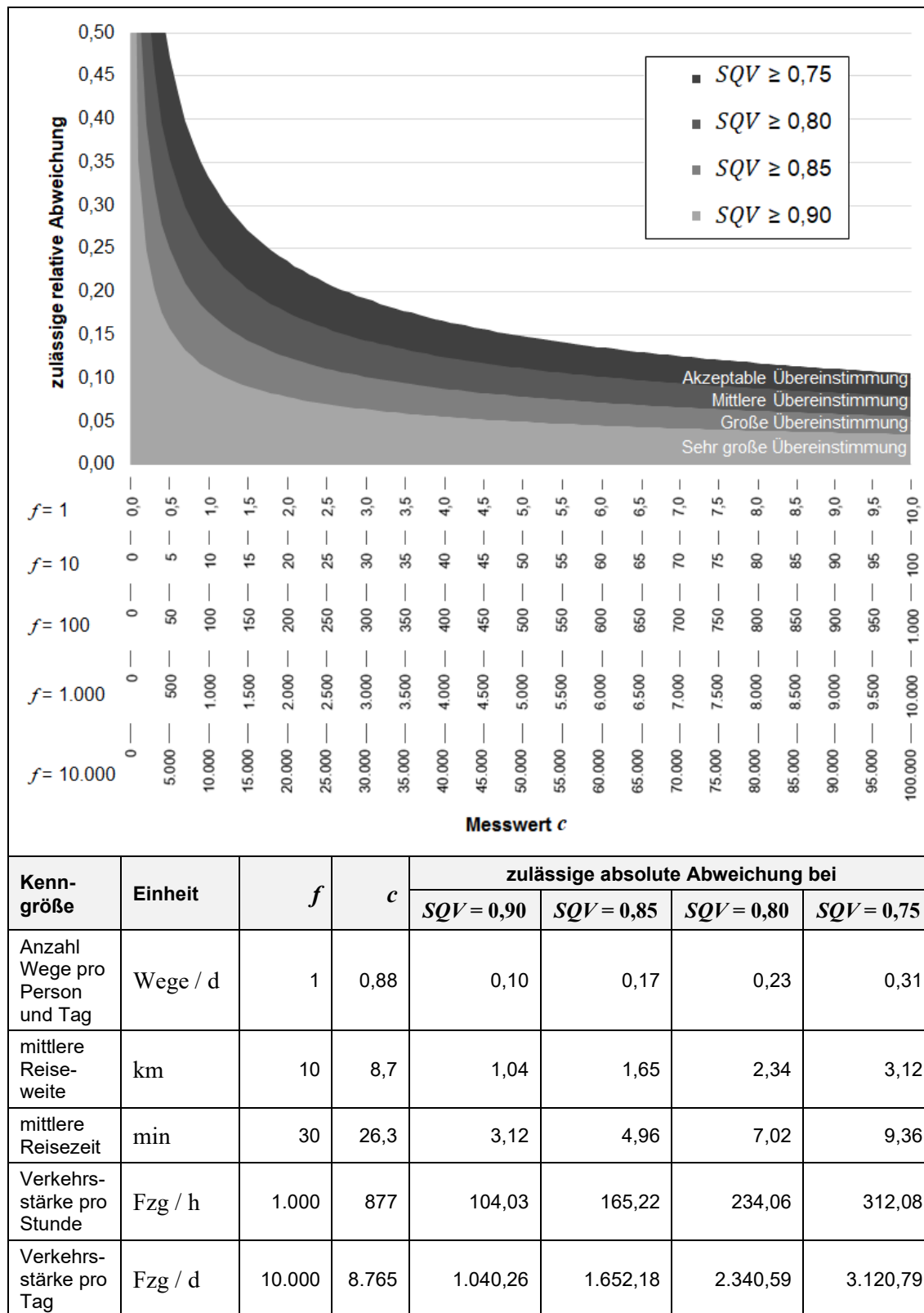


Abbildung 14: Beispielhafte Darstellung der maximal zulässigen Abweichung vom Erhebungswert c für die Gütebereiche des SQV -Werts. (Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 185)).

Abbildung 14 zeigt beispielhaft die maximal zulässige Abweichung vom Erhebungswert c für die Gütebereiche des SQV -Werts. Die x-Achse ändert sich dabei in Abhängigkeit des Skalierungsfaktors f .

Neben dem Gütemaß SQV schlagen FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 185 f.) ein Gütemaß zur Bewertung der Fahrtzeit zwischen zwei Punkten vor (siehe Abbildung 15). Für kurze Distanzen erscheint eine zunehmende absolute Abweichung zwischen berechneter und gemessener Fahrtzeit noch plausibel. Wenn diese Abweichung mit zunehmender Fahrtzeit aber immer weiter steigt, ist dies ein Indikator für einen systematischen Modellfehler.

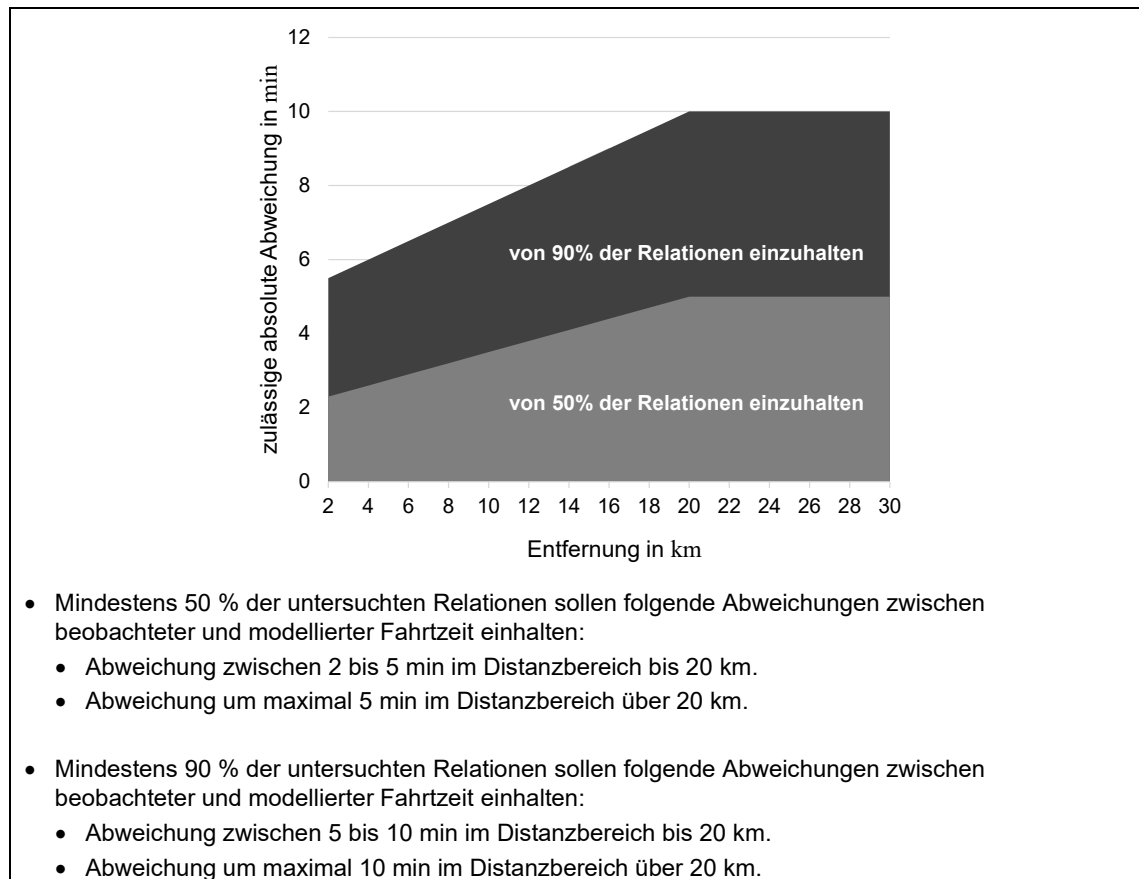


Abbildung 15: Bewertung der Abweichung für Einzelwerte von Fahrtzeiten (Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 186)).

Gütemaße für Mengen von Einzelwerten

Diese Gütemaße bewerten aggregierte Modellergebnisse, z.B. alle Strecken einer Straßenklasse. FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 178) nennen als Beispiele für diese Klasse von Gütemaßen unter anderem den Korrelationskoeffizienten (R) bzw. das Bestimmtheitsmaß (R^2), die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers ($RMSE$) und den Erklärungsqualitätsindikator (EQI). Aufgrund der Zusammenfassung mehrerer Elemente können

fehlerhafte Einzelwerte übersehen werden, obwohl sie z.B. aufgrund ihrer Lage von großer Bedeutung sind. Diese Gütemaße sollten daher nur ergänzend zu den Gütemaßen für die Einzelwerte herangezogen werden. Aus diesem Grund wird im Folgenden auch auf eine detaillierte Erläuterung verzichtet. Weitere Informationen zu Gütemaßen für Mengen von Einzelwerten finden sich in FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 178).

Die Gütemaße für Einzelwerte werden häufig in aggregierter Form ausgewertet. Dabei werden die Anteile der Wertepaare angegeben, deren Gütemaße in bestimmte Gütemaßklassen entfallen (z.B. $SQV < 0,75$, $0,75 \leq SQV < 0,80$, $0,80 \leq SQV < 0,85$, $0,85 \leq SQV < 0,90$, $SQV > 0,90$). Bei diesen aggregierten Auswertungen empfehlen FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 189 f.), nicht die Anzahl von Wertepaaren heranzuziehen, sondern die Wertepaare z.B. mit der Streckenlänge zu gewichten. Somit ist gewährleistet, dass der Anteil einer Klasse bei einer trivialen Netzänderung konstant bleibt (z.B. durch die Teilung einer Strecke in zwei Teilstrecken, siehe Abbildung 16).

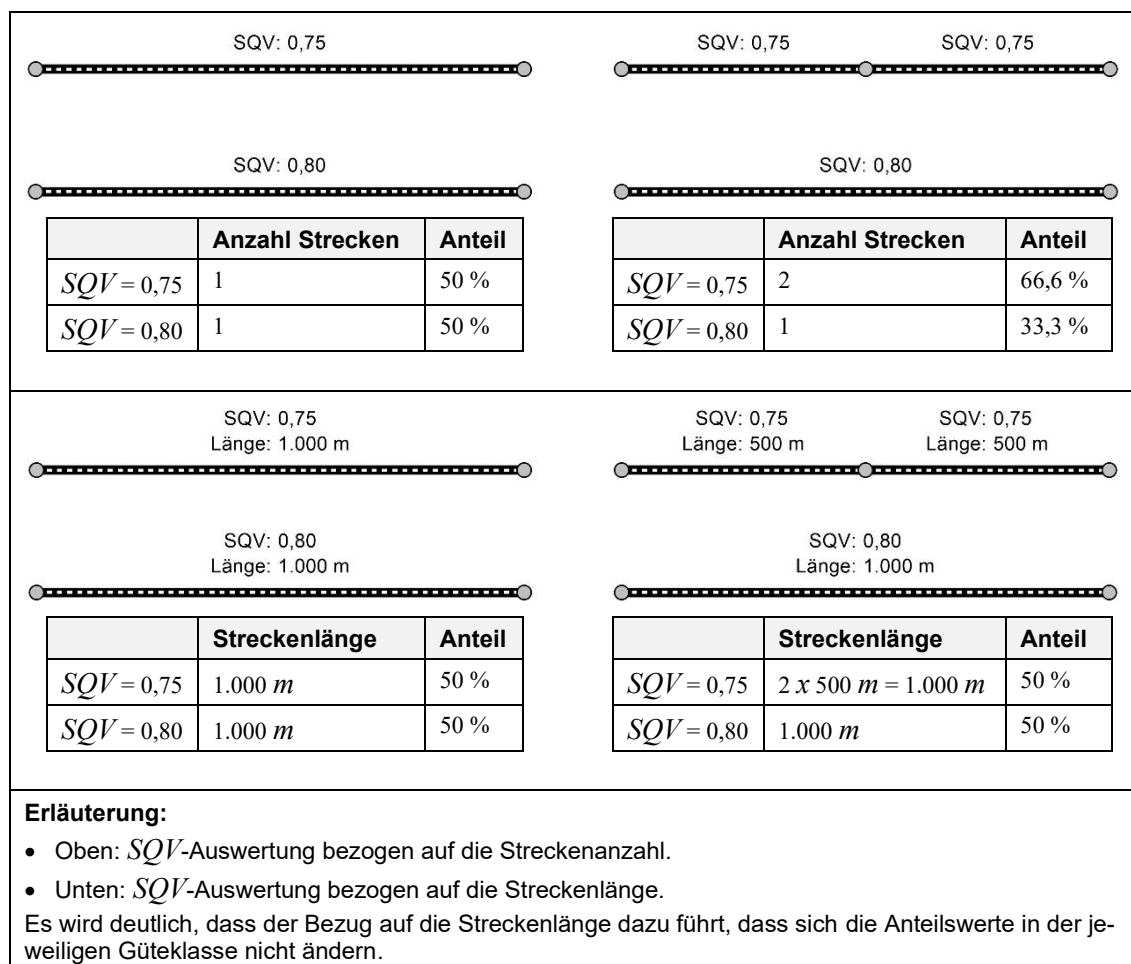


Abbildung 16: Beispielhafte SQV -Auswertung für den Fall, dass eine Strecke halbiert wird. (Bildquelle: FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 190)).

Gütemaße für Verteilungen

Das Ergebnis einer Prüfung der Übereinstimmung von zwei Verteilungen hängt in hohem Maße von der Klassierung der Daten ab. Um für verschiedene Modellregionen und -spezifikationen vergleichbare Gütemaße zu erhalten, ist es daher erforderlich, eine standardisierte Verteilungsklassierung zu verwenden. Speziell müssen folgende Punkte beachtet werden, die in PESTEL (2020, S. 3 ff.) detailliert erläutert werden:

- Die Kenngrößen, die zur Klassierung herangezogen werden, sollten modusunabhängig sein. Dafür bieten sich z.B. die Luftlinienentfernung, eine mittlere gewichtete Reisezeit oder eine mittlere Verkehrsleistung an.
- Als Referenzverteilung eignen sich Daten aus Erhebungen (z.B. Haushaltsbefragungen) oder Basis-Modellzustände. Ersteres für einen Vergleich von Modell und Erhebung, wobei die Unsicherheiten einer Erhebung berücksichtigt werden müssen, und letzteres für eine Analyse von Veränderungen durch modellierte Maßnahmen und Entwicklungen.
- Für den Vergleich dürfen nur Wege betrachtet werden, die Quelle und Ziel im Untersuchungsraum haben und die von Einwohnern des Untersuchungsraums getätigt werden.
- Für einen Vergleich im Zuge der Kalibrierung und Validierung sollten die Verteilungen zehn äquiquantile (= gleich besetzte) Klassen aufweisen.

Neben dem Vergleich von Lageparametern der Verteilungen zeigt PESTEL (2020, S. 9 ff.) bei einem Vergleich möglicher Verteilungsgütemaße, dass sich die Fehlerkomponenten des Ungleichheitskoeffizienten nach Theil zur Analyse von systematischen Unterschieden in den Mittelwerten (U^M), systematischen Unterschieden in den Varianzen (U^C) und unsystematischen Abweichungen (U^S) für eine detaillierte Gütebewertung eignen. Andere geeignete Gütemaße sind die relative Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers ($\%RMSE$), der relative mittlere absolute Fehler ($\%MAE$) oder das Coincidence Ratio (CR). Ein weiteres Gütemaß zur Beurteilung von Kenngrößenverteilungen ist der (nachfragegewichtete²⁷) mittlere SQV über alle Verteilungsklassen (engl.: mean weighted SQV $mwSQV$).

$$U^M = \frac{(\bar{x} - \bar{y})^2}{\frac{1}{K} \sum_{k \in K} (x_k - y_k)^2} \quad (31)$$

²⁷ Prinzipiell sind auch andere Gewichtungen möglich, z.B. die Klassenbreite oder die Verkehrsleistung pro Klasse.

$$U^S = \frac{(s_x - s_y)^2}{\frac{1}{K} \sum_{k \in K} (x_k - y_k)^2} \quad (32)$$

$$U^C = \frac{2 \cdot (1 - R) \cdot s_x \cdot s_y}{\frac{1}{K} \sum_{k \in K} (x_k - y_k)^2} \quad (33)$$

$$\%MAE = \frac{\sum_{k \in K} |x_k - y_k|}{\sum_{k \in K} x_k} \quad (34)$$

$$\%RMSE = \frac{\sqrt{K \cdot \sum_{k \in K} (x_k - y_k)^2}}{\sum_{k \in K} x_k} \quad (35)$$

$$CR = \frac{\sum_{k \in K} \min \{x_k^{rel}, y_k^{rel}\}}{\sum_{k \in K} \max \{x_k^{rel}, y_k^{rel}\}} \quad (36)$$

$$mwSQV = \sum_{k \in K} (SQV_k \cdot x_k^{rel}) \quad (37)$$

mit

U^M Fehler, der aus systematischen Unterschieden in den Mittelwerten resultiert

U^S Fehler, der aus systematischen Unterschieden in den Varianzen resultiert

U^C Fehler, der aus unsystematischen, zufälligen Fehlern resultiert

K Klassenanzahl

x_k, y_k Häufigkeiten der Verteilungen x bzw. y in Verteilungsklasse k

x_k^{rel}, y_k^{rel} relative Häufigkeiten der Verteilungen x bzw. y in Verteilungsklasse k

\bar{x}, \bar{y} Mittelwerte der Verteilungen x bzw. y über alle Klassen

s_x, s_y	Standardabweichungen der Verteilungen x bzw. y
R	Korrelationskoeffizient
$\%MAE$	relativer mittlerer absoluter Fehler
$\%RMSE$	relative Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers
CR	Coincidence Ratio
$mwSQV$	mittlerer, gewichteter SQV über alle Verteilungsklassen
SQV_k	SQV für die k . Verteilungsklasse
	$SQV_k = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{(x_k^{rel} - y_k^{rel})^2}{f \cdot x_k^{rel}}}}$
f	Skalierungsfaktor (hier: $f = 1 / K$)

Gütemaße für Matrizen

Generell sind Gütemaße für Matrizen bzw. Vergleiche von Matrizen in der Praxis nicht üblich. Da sie aber für die Beurteilung der durchgeführten Untersuchungen in Kapitel 5.3.2 notwendig sind, werden im Folgenden dennoch einige Gütemaße für Matrizenvergleiche erläutert.

Klassische Gütemaße für Datenreihen jeder Art (z.B. Verteilungen, Verkehrsstärkenmengen, Matrizen) sind der mittlere Fehler (ME , engl.: mean error), der mittlere absolute Fehler (MAE , engl.: mean absolute error) und die Wurzel des mittleren, quadrierten Fehlers ($RMSE$, engl.: root mean squared error).

Der ME gibt den mittleren Fehler zwischen Modell- und Erhebungswert an. Da sich bei der Berechnung positive und negative Abweichungen ausgleichen können, sagt allein ein geringer ME ($ME \rightarrow 0$) noch nichts über die Modellgüte. Andererseits ist ein hoher ME ein Indiz für eine systematische Über- oder Unterschätzung im Modell. (VANDEPUT (2019))

$$ME = \frac{1}{Z^2} \cdot \sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}^m - d_{od}^c \quad (38)$$

mit

ME mittlerer Fehler

d_{od}^c, d_{od}^m Nachfrage d zwischen den Verkehrszellen o und d der Referenzmatrix D^c bzw. Vergleichsmatrix D^m

Z Menge der Verkehrszellen

Der *MAE* ist wie der *ME* ein lineares Abweichungsmaß. Das bedeutet, dass alle Abweichungen gleich gewichtet werden. Dem gegenüber gewichtet der *RMSE* größere Abweichungen stärker (VANDEPUT (2019)). *ME*, *MAE* und *RMSE* besitzen die gleiche Einheit wie die Datenreihen, die sie vergleichen. Um ihre Ausprägung beurteilen zu können, sollten Charakteristika der Matrizen (z.B. Einheit, Mittelwert und Standardabweichung) angegeben werden. Alternativ können die Gütemaße auf eine vergleichbare Einheit skaliert werden, indem sie mit der mittleren Nachfrage je Relation dividiert werden. Die resultierenden Werte werden im Folgenden mit *%MAE* und *%RMSE* bezeichnet^{28,29}.

$$MAE = \frac{1}{Z^2} \cdot \sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} |d_{od}^m - d_{od}^c| \quad (39)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{Z^2} \cdot \sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} (d_{od}^m - d_{od}^c)^2} = \frac{1}{Z} \sqrt{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} (d_{od}^m - d_{od}^c)^2} \quad (40)$$

$$\%MAE = \frac{MAE}{\frac{1}{Z^2} \cdot \sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}^c} = \frac{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} |d_{od}^m - d_{od}^c|}{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}^c} \quad (41)$$

$$\%RMSE = \frac{RMSE}{\frac{1}{Z^2} \cdot \sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}^c} = \frac{Z \cdot \sqrt{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} (d_{od}^m - d_{od}^c)^2}}{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}^c} \quad (42)$$

mit

<i>MAE</i>	mittlerer absoluter Fehler
<i>RMSE</i>	Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers
<i>%MAE</i>	relativer mittlerer absoluter Fehler
<i>%RMSE</i>	relative Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers

²⁸ In Abweichung zu Formel (34) und (35) gilt die dargestellte Rechenvorschrift für Matrizen.

²⁹ Zusätzlich zum *%MAE* gibt es noch den *MAPE* (engl.: mean absolute percentage error), der den mittleren relativen Fehler angibt. Laut VANDEPUT (2019) weist dieses Gütemaß problematische Eigenschaften auf, z.B. gewichtet es große Fehler bei niedrigen Nachfragewerten besonders stark. Daher sollte der *MAPE* nicht verwendet und vor allem nicht mit dem *%MAE* verwechselt werden. Dies gilt analog für den *MPE* (engl.: mean percentage error) statt dem *ME* und den *RMSPE* (engl.: root mean squared percentage error) anstelle des *%RMSE*.

d_{od}^c, d_{od}^m Nachfrage d zwischen den Verkehrszellen o und d der Referenzmatrix D^c bzw. Vergleichsmatrix D^m

Z Anzahl bzw. Menge der Verkehrszellen

Ein guter MAE ($MAE \rightarrow 0$) stellt sich ein, wenn die Mediane der zu vergleichenden Wertemengen übereinstimmen. Dies macht ihn zwar robust gegenüber Ausreißern, andererseits reagiert er schlecht auf systematische Fehler. Ein guter $RMSE$ ($RMSE \rightarrow 0$) wird erreicht, wenn die Mittelwerte der zu vergleichenden Wertemengen übereinstimmen. Er reagiert damit auf systematische Abweichungen, ist aber wenig robust gegenüber Ausreißern. (VANDEPUT (2019))

Neben diesen etablierten Matrixgütemaßen stellen FRIEDRICH ET AL. (2019c) weitere Matrixgütemaße auf Basis des Gütemaßes Scalable Quality Value SQV (siehe Kapitel 3.4.2.1 bzw. Formel (30)) vor:

- mittlerer SQV aus normierten Matrixsummen:
 c und m werden hier als Wegeanzahl pro Einwohner und Zeiteinheit (z.B. Tag) interpretiert. Für den Skalierungsfaktor f des SQV (Formel (30)) wird ein Wert angenommen, der ungefähr der mittleren Wegeanzahl (bzw. der mittleren Verkehrsleistung oder dem mittleren Verkehrszeitaufwand) pro Einwohner und Zeiteinheit (z.B. Tag) entspricht. FRIEDRICH ET AL. (2019c) empfehlen $f = c$. Dabei muss aber berücksichtigt werden, dass das Gütemaß SQV somit den Kehrwert der relativen Abweichung zwischen m und c ausdrückt. Je besser die beiden Matrizen übereinstimmen bzw. je geringer ihre Abweichungen sind, desto mehr nähert sich das Gütemaß SQV dem Wert 1 an.

$$SQV = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{(m - c)^2}{f \cdot c}}} \quad (30)$$

mit

SQV Gütemaß SQV

c Wegeanzahl pro Einwohner und Zeiteinheit der Referenzmatrix

$$c = \frac{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}^c}{\sum_{o \in Z} z_o} = \frac{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}^c}{\sum_{o \in Z} EW_o}$$

m Wegeanzahl pro Einwohner und Zeiteinheit der Vergleichsmatrix³⁰

$$m = \frac{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}^c + |d_{od}^c - d_{od}^m|}{\sum_{o \in Z} z_{ok}} = \frac{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}^c + |d_{od}^c - d_{od}^m|}{\sum_{o \in Z} z_{o,EW}}$$

f Skalierungsfaktor (hier: $f = c$)

d_{od}^c, d_{od}^m Nachfrage d zwischen den Verkehrszellen o und d der Referenzmatrix D^c bzw. Vergleichsmatrix D^m

z_{ok} Wert z einer Siedlungsstrukturgröße k (hier: Einwohnerzahl EW) in der Quellverkehrszelle o

Z Menge der Verkehrszellen

- mittlerer, gewichteter SQV über alle Matrixelemente ($mwSQV$):

Es wird zunächst das Gütemaß SQV (Formel (30)) für jedes Matrixelementepaar berechnet. Damit der Skalierungsfaktor³¹ f möglichst universell ist, werden relative Häufigkeiten der Nachfragematrizen verwendet. Damit kann der Skalierungsfaktor f als Kehrwert der quadrierten Verkehrszellenanzahl³² Z geschrieben werden. Anschließend wird ein gewichteter Mittelwert über die SQV gebildet, wobei die relativen Häufigkeiten der Referenzmatrix als Gewichte fungieren³³. Der Wertebereich des $mwSQV$ ist identisch mit dem des SQV ($(0;1]$).

$$mwSQV = \sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} (SQV_{od} \cdot d_{od}^{c,rel}) \quad (43)$$

mit

$mwSQV$ mittlerer, gewichteter SQV über alle Matrixelemente

d_{od}^c, d_{od}^m absolute Nachfrage d zwischen den Verkehrszellen o und d der Referenzmatrix D^c bzw. Vergleichsmatrix D^m

³⁰ Es wird auf eine analoge Berechnung zu c verzichtet, da sonst im Falle einer Normierung der Matrixsummen bereits ein ideales Ergebnis erreicht wäre, was nicht im Sinne des Gütemaßes ist. (FRIEDRICH ET AL. (2019c))

³¹ Bei der Verwendung dieses Wertes muss beachtet werden, dass sich bei der Auswertung von Teilräumen die betrachtete Zellenanzahl und somit der Skalierungsfaktor f ändert. Für solche Auswertungen muss demzufolge zunächst der Skalierungsfaktor und im Anschluss das Gütemaß neu bestimmt werden. (FRIEDRICH ET AL. (2019c))

³² Dieser Wert ergibt sich, wenn der Skalierungsfaktor als mittlere, relative Wegehäufigkeit betrachtet wird: die Summe aller relativen Wegehäufigkeiten (in Summe = 1) dividiert durch die Anzahl der Matrixrelationen. (FRIEDRICH ET AL. (2019c))

³³ Prinzipiell sind auch andere Gewichtungen möglich, z.B. die Luftlinienentfernung oder die Verkehrsleistung pro Quelle-Ziel-Relation.

$d_{od}^{c,rel}$, $d_{od}^{m,rel}$ relative Nachfrage d zwischen den Verkehrszellen o und d der Referenzmatrix D^c bzw. Vergleichsmatrix D^m

$$d_{od}^{c,rel} = \frac{d_{od}^c}{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}^c} \quad \text{bzw.} \quad d_{od}^{m,rel} = \frac{d_{od}^m}{\sum_{o \in Z} \sum_{d \in Z} d_{od}^m}$$

SQV_{od} SQV für eine Ortsveränderung zwischen den Verkehrszellen o und d

$$SQV_{od} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{(d_{od}^{m,rel} - d_{od}^{c,rel})^2}{f \cdot d_{od}^{c,rel}}}}$$

f Skalierungsfaktor (hier: $f = 1 / Z^2$)

Z Anzahl bzw. Menge der Verkehrszellen

- $mwSQV$ einer Bestwegumlegung auf einem Dreiecksnetz zwischen den Verkehrszellen:

Im Unterschied zu einer klassischen Umlegung im bestehenden Streckennetz findet eine Bestwegumlegung³⁴ auf einem Dreiecksnetz statt, was in einem vorbereitenden Arbeitsschritt zwischen den Verkehrszellen erzeugt wird. Hierfür bietet sich eine Delaunay-Triangulation³⁵ an.

Umgelegt werden dann die relative Referenz- und die Vergleichsmatrix. Anschließend wird die Umlegungsgüte mit dem SQV (Formel (30)) bestimmt und mit der umgelegten (relativen) Referenzverkehrsstärke gewichtet³⁶. Als Skalierungsfaktor f wird der Kehrwert der Dreiecksstreckenanzahl S verwendet.

$$mwSQV = \sum_{s \in S} (SQV_s \cdot c_s^{rel}) \quad (44)$$

mit

$mwSQV$ mittlerer, gewichteter SQV über alle Strecken im Dreiecksnetz

³⁴ Bestwegumlegungen sind eine Sonderform der Sukzessivumlegungen, die die Nachfrage iterativ und teilweise auf das Netz umlegen. Sie brechen nach einer vorgegebenen Anzahl an Iterationen ohne Prüfung des Gleichgewichtszustands ab. Eine Bestwegumlegung besteht aus nur einer Iteration, bei der 100% der Nachfrage umgelegt werden. (PTV (2018, S. 415 f.))

³⁵ Eine Delaunay-Triangulation vernetzt zwei beliebige Punkte p und q der Punktmenge S , wenn für sie ein Kreis existiert, der durch p und q verläuft, aber keinen anderen Punkt von S in seinem Inneren oder auf seiner Grenze hat. (AURENHAMMER ET AL. (2013, S. 12))

³⁶ Prinzipiell sind auch andere Gewichtungen möglich, z.B. die Streckenlänge oder die Verkehrsleistung der jeweiligen Strecke.

SQV_s SQV für die Strecke s

$$SQV_s = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{(m_s^{rel} - c_s^{rel})^2}{f \cdot c_s^{rel}}}}$$

c_s^{rel}, m_s^{rel} Verkehrsstärke des Referenz- (c) bzw. Vergleichsmodells (m) auf Strecke s , wobei die relative Nachfrage umgelegt wird

f Skalierungsfaktor (hier: $f = 1 / S$)

S Anzahl an Strecken im Dreiecksnetz

Wie in Tabelle 11 dargestellt, nimmt die Anzahl an zu vergleichenden Matrixrelationen mit der Anzahl an Verkehrszellen quadratisch zu. Dem gegenüber nimmt die Anzahl der zu vergleichenden Dreiecksstrecken nur linear zu (AURENHAMMER ET AL. (2013, S. 11)³⁷).

Vorteilhaft an dieser Auswertungsmethode ist, dass der räumliche Bezug der Verkehrszellen erhalten bleibt, dass weniger Elemente als bei einer Umlegung im wirklichen Verkehrsnetz verglichen werden müssen und dass weniger Vergleichsoperationen als bei einem Vergleich der einzelnen Matrixelemente getätigt werden müssen. Nachteilig sind die zusätzlichen Rechenschritte (Dreiecksnetzerzeugung und Umlegung), die sich negativ auf die Rechenzeit auswirken.

³⁷ Abweichend zur Berechnungsvorschrift von AURENHAMMER ET AL. (2013, S. 11) wird die Anzahl der Strecken verdoppelt, da es sich im konkreten Fall eines Verkehrsnetzmodells um gerichtete Graphen handelt.

Anzahl der Vergleichselemente bei Matrixrelationen	
$N = n^2$	(45)
Anzahl der Vergleichselemente bei Dreiecksstrecken	
$N = 2 \cdot (3 \cdot n - 3 - n_k)$	(46)
<ul style="list-style-type: none"> Sonderfall 1 (minimale Anzahl): alle Knoten liegen am (konvexen) Rand: 	
$N_{\min} = 2 \cdot (2 \cdot n - 3) \quad ; \quad n_k = n$	(47)
<ul style="list-style-type: none"> Sonderfall 2 (maximale Anzahl): nur 3 Knoten liegen am (konvexen) Rand: 	
$N_{\max} = 2 \cdot (3 \cdot n - 6) \quad ; \quad n_k = 3$	(48)
mit N Anzahl der Vergleichselemente n Anzahl der Verkehrszellen, Minimum für Dreiecksnetz: $n_{\min} = 3$ n_k Anzahl der Verkehrszellen am konvexen Rand	

Tabelle 11: Gegenüberstellung der Anzahl der Vergleichselemente bei Matrixrelationen und Dreiecksstrecken.

Visuelle Analysemethoden

Neben den bisher genannten Gütemaßen, die eine Gütebewertung anhand eines konkreten Wertes zulassen, ist es in der Praxis üblich, graphische Analysen anzustellen. Beispiele³⁸ hierfür sind:

- Verkehrsstärkekarten und Verkehrsstärkedifferenzkarten,
- Spinnenauswertungen,
- Auswertungen ausgewählter Routenfahrzeiten,
- Chord-Diagramm-Auswertungen,
- Heatmap-Auswertungen oder
- Quell- / Zielverkehrsauswertungen.

³⁸ Eine detaillierte Beschreibung der Methoden ist in FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 198 ff.) zu finden.

3.4.2.2 Analytische Ausdrücke

Die Idee analytischer Ausdrücke ist, dass die Streuung der Modellergebnisse direkt aus der Streuung der Modelleingangsdaten ableitbar ist. Im Vergleich zu stochastischen Simulationen (siehe Kapitel 3.4.2.3) sind Berechnungsaufwand und Rechenzeit geringer. Außerdem ist es mit nur einem Modelldurchlauf möglich, Aussagen zu Ursache und Größenordnung von Unsicherheiten zu machen. Die Methode scheint jedoch für kombinierte Modelle wie den Vier-Stufen-Algorithmus nur bedingt geeignet, weil dabei die Unsicherheiten verschiedener Teilmodelle kombiniert werden müssen. Hinzu kommt, dass es mit steigender Modellkomplexität schnell sehr aufwendig und damit ineffektiv wird, analytische Ausdrücke zu formulieren. (REZAEESTAKHRUIE (2017, S. 31), MANZO ET AL. (2014, S. 29))

3.4.2.3 Variation von Modellparametern und -variablen

Es gibt diverse Herangehensweisen, um Modellparameter und -variablen zu variieren, z.B. mit Sensitivitäts- und Realitätstests, mit Szenarien oder mit stochastischen Simulationen. Im Gegensatz zu analytischen Ausdrücken sind diese Variationsansätze für alle Modellarten geeignet – unabhängig von Modelldefinition und -spezifikation (siehe Tabelle 6 (S. 42); MANZO ET AL. (2014, S. 138)). Im Kern geht es in allen der im Folgenden vorgestellten Methoden darum, dass kritische Variablen und Parametern identifiziert werden. Kritisch bedeutet hierbei, dass Abweichungen vom angenommenen Erwartungswert der Variable bzw. des Parameters zu großen Änderungen in den Modellergebnissen und somit ggf. zu anderen verkehrlichen oder ökonomischen Bewertungen führen (MILLER & SZIMBA (2015, S. 66)). Allgemein haben diese Variationsansätze den Nachteil, dass der Modellfehler unbeachtet bleibt und sich somit weiterhin auf das Modellergebnis auswirkt, aber nicht explizit ausgewiesen wird (REZAEESTAKHRUIE (2017, S. 26)).

Sensitivitätstests

Sensitivitätstests prüfen, ob die Wirkungen eines Modells in einer erwartbaren Größenordnung liegen, wenn einzelne Modellparameter in systematischer und kontrollierter Weise verändert werden. Die Modellvariablen bleiben bei dieser Auswertung unverändert. Die Wirkungen des Tests werden in Bezug auf die Erhebungsdaten bestimmt. Zur Quantifizierung können die in Kapitel 4.3.5 beschriebenen Kenngrößen herangezogen werden. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 209 ff.))

Realitätstests

Realitätstests prüfen, ob die Wirkungen eines Modells in einer erwartbaren Größenordnung liegen, wenn einzelne Modellvariablen (z.B. des Verkehrsangebots oder der Siedlungsstrukturdaten) in systematischer und kontrollierter Weise verändert werden. Die Modellparameter bleiben bei dieser Auswertung unverändert. Anschließend werden die Nachfrageänderungen (in Form von Elastizitäten) bestimmt. Nach WebTAG (UK DfT (2017, S. 46)) berechnet sich die Preiselastizität ε nach:

$$\varepsilon = \frac{\ln\left(\frac{d_t}{d_{t-1}}\right)}{\ln\left(\frac{x_t}{x_{t-1}}\right)} \quad (49)$$

mit

ε Preiselastizität

d_t, d_{t-1} Nachfrage nach bzw. vor der Änderung

x_t, x_{t-1} Kenngröße nach bzw. vor der Änderung (hier: Kosten)

Die berechneten Elastizitäten werden mit erwarteten Elastizitäten verglichen. RIESER ET AL. (2018, S. 234 ff.) geben eine gute Übersicht über die Erwartungen für verschiedene Realitätstests inklusive der notwendigen Vorgehensweise für die Durchführung der Tests. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 209 ff.))

Szenarienanalysen

Im Gegensatz zu den univariaten Sensitivitäts- und Realitätstests, wo jeweils einzelne Parameter oder Variablen gezielt variiert werden, beschreibt die Szenarienanalyse die gleichzeitige Variation mehrerer Parameter und Variablen. Hierbei ist allerdings auf Korrelationen zwischen den variierten Parametern und Variablen zu achten. Durch die gemeinsame Variation können Trends und Entwicklungen realistischer abgebildet werden. (MILLER & SZIMBA (2015, S. 68), REZAEESTAKHRUIE (2017, S. 26), MARSDEN ET AL. (2018, S. 42))

Die britische Richtlinie WebTAG Unit M4 (UK DfT (2018b, S. 5 ff.)) fordert mindestens drei Szenarien: das optimistische (Wachstums-) Szenario, das mittlere (Haupt-) Szenario und das pessimistische (Schrumpfungs-) Szenario. Sie gibt zudem Empfehlungen, wie solche Szenarien aufzubauen sind:

- mittleres (Haupt-) Szenario:
Dieses Szenario sollte auf beschlossenen Bauvorhaben und unparteiischen, sicheren Annahmen beruhen. Es sollte in sich konsistent, realistisch und plausibel sein. Dieses

Szenario ist die beste Entscheidungsgrundlage bei dem aktuell verfügbaren Kenntnisstand. Dennoch sollten die Wirkungen von Maßnahmen (z.B. verkehrliche, ökologische und ökonomische Sinnhaftigkeit) unter anderen Annahmen, d.h. in den anderen Szenarien, geprüft werden.

- optimistisches (Wachstums-) Szenario:
Dieses Szenario sollte eine mit der Zeit zunehmende Nachfrage berücksichtigen. Die zunehmende Nachfrage steht für die mit der Zeit größer werdende Unsicherheit. Das Verkehrsangebot sollte identisch mit dem des mittleren (Haupt-) Szenarios sein.
- pessimistisches (Schrumpfs-) Szenario:
Dieses Szenario sollte eine mit der Zeit abnehmende Nachfrage berücksichtigen. Die abnehmende Nachfrage steht für die mit der Zeit größer werdende Unsicherheit. Das Verkehrsangebot sollte identisch mit dem des mittleren (Haupt-) Szenarios sein.

Klassische Punktprognosen in der Verkehrsnachfragemodellierung nehmen an, dass sich die Zukunft nur (unterschiedlich stark) in eine Richtung entwickelt. Mittels Szenarien können darüber hinaus verschiedene mögliche Entwicklungsrichtungen systematisch abgebildet werden (siehe Abbildung 17). Innerhalb eines Szenarios werden wahrscheinlich parallel ablaufende Entwicklungen, die die Mobilität beeinflussen können, gebündelt. Die einzelnen Entwicklungen müssen dabei konsistent zusammenpassen. Durch die Betrachtung von gegenläufigen Entwicklungsannahmen in mehreren Szenarien und den Vergleich untereinander (und mit dem Ausgangszustand) ergibt sich ein erweitertes Verständnis über das zugrundeliegende Wirkungsmodell und seine Plausibilität. Zudem ergeben sich somit Auswirkungsbandbreiten potenzieller Entwicklungen, auch wenn unklar ist, welche Entwicklung am wahrscheinlichsten eintritt. (LYONS (2014, S. 6 ff.), PHLEPS ET AL. (2015, S. 3), MARSDEN ET AL. (2018, S. 34 ff.), VAN VUREN (2020))

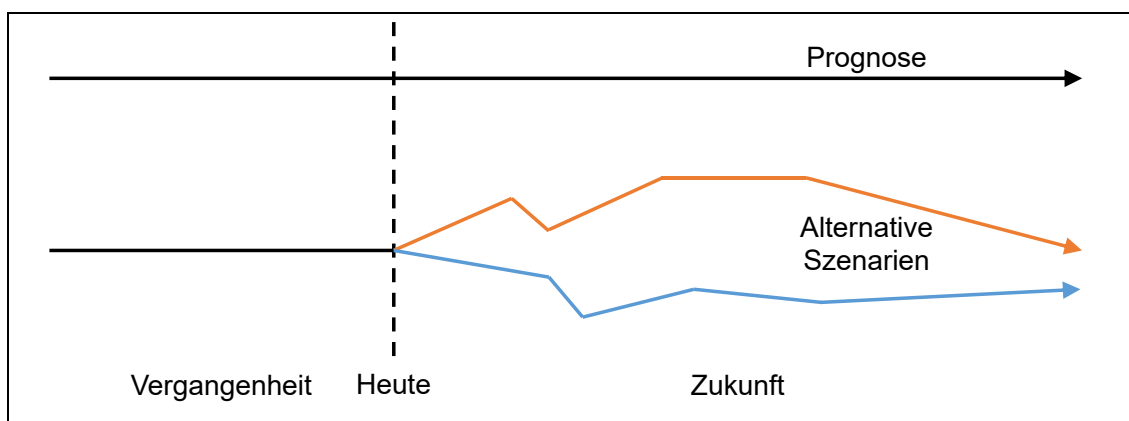


Abbildung 17: Unterschied zwischen (Punkt-) Prognosen und Szenarien (Bildquelle: in Anlehnung an PHLEPS ET AL. (2015, S. 4 f.))

Die Modellergebnisse der einzelnen Szenarien müssen immer auf Konsistenz und Plausibilität hin untersucht werden. Da es keine Referenzdaten für alle Szenarienausprägungen geben kann, muss hierbei auf verkehrsplanerische Erfahrung und Experteneinschätzungen zurückgegriffen werden.

Stochastische Simulationen

Stochastische Simulationen sind eine weitere Methode, um Unsicherheiten zu quantifizieren. Dabei werden wiederholt zufällige Parameter- oder Variablenausprägungen aus einer Eingangsverteilung gezogen, bis die sich ergebende Verteilung der Ergebnisse statistisch signifikant ist. Durch die Zufälligkeit der variierten Größen sind die sich ergebenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen frei von Subjektivität. Somit kann jedem Modellergebnis eine Eintrittswahrscheinlichkeit zugeordnet werden. (REZAEESTAKHRUIE (2017, S. 28 ff.), MANZO ET AL. (2014, S. 29 ff.))

Im Folgenden werden zwei methodische Ansätze der stochastischen Simulation vorgestellt:

- **Monte-Carlo-Simulation** ist eine Simulationsmethode, die eine Streuung der Eingangsdaten mittels einer Wahrscheinlichkeitsverteilung berücksichtigt, aus der in einem sich wiederholenden Prozess Ausprägungen der Eingangsdaten gezogen werden. Mit diesen zufälligen Eingangsdaten werden Modellergebnisse berechnet. Dieser Prozess wiederholt sich so oft, bis Aussagen zur Streuung oder der Verteilung der Modellergebnisse möglich sind. Neben univariaten Eingangsdatenverteilungen ist es auch möglich, mehrere unsichere Eingangsdaten mit multivariaten Verteilungen simultan zu untersuchen. In jedem Fall muss bei mehreren untersuchten Einflussgrößen deren gegenseitige Korrelation beachtet werden (REZAEESTAKHRUIE (2017, S. 29), KRISHNAMURTHY & KOCKELMAN (2003, S. 219 ff.), MANZO ET AL. (2014, S. 32)).

Welchen Einfluss die Annahmen über Streuung und Verteilungsform der Eingangsdaten auf umgelegte Verkehrsstärken haben, wird z.B. von MANZO ET AL. (2015a, S. 64) untersucht. Sie analysieren den Einfluss verschiedener Formen von Verteilungen (Normalverteilung, Lognormalverteilung) und schlussfolgern daraus, dass die Verteilungsform, im Gegensatz zur Netzauslastung oder der Umlegungsmethode, einen geringen Einfluss auf das Ergebnis hat.

Die Methode der Monte-Carlo-Simulation benötigt für statistisch signifikante Aussagen eine hohe Anzahl an zufälligen Wiederholungen und damit eine hohe Rechenzeit. Durch spezielle Auswahlverfahren der Eingangsdaten oder andere Modifikationen ist es möglich, Monte-Carlo-Simulationen effizienter zu gestalten. Damit werden weiterhin eine gute Annäherung an die tatsächliche Verteilung der Modellergebnisse bei weniger Zufallsziehungen und Rechenzeit möglich. RASOULI & TIMMERMANS (2012, S. 21) und MANZO ET AL. (2014, S. 32 f.) geben hierfür gute Zusammenfassungen.

- Im Gegensatz zur Monte-Carlo-Simulation werden für **Resampling**-Ansätze keine Informationen über die Streuung der Eingangsgrößen benötigt (MANZO ET AL. (2014, S. 33)). Bekannte Resampling-Verfahren sind Jackknifing und Bootstrapping. Beide Verfahren fanden schon Anwendung bei der Quantifizierung von Unsicherheiten in Verkehrsnachfragemodellen:

- Als **Bootstrapping** wird eine Methode zur Quantifizierung von Unsicherheiten bezeichnet, die für die Parameter- bzw. Modellschätzung wiederholt zufällig mit Zurücklegen aus einem Referenzdatensatz zieht (REZAEESTAKHRUIE (2017, S. 30)). Beispielsweise verwendet HUGOSSON (2005) diese Methode im „Swedish National Travel Demand Forecasting System (SAMPERS)“ um die Unsicherheiten einer Zielwahlmatrix und des Value of Time zu berechnen.
- Beim **Jackknifing** wird der Parameter bzw. das Modell wiederholt geschätzt und der zugrundeliegende Datensatz wird bei jeder Wiederholung reduziert (MANZO ET AL. (2014, S. 33)). Jackknifing wird z.B. von ARMOOGUM ET AL. (2009) verwendet, um den Einfluss der Unsicherheit von langfristigen Bevölkerungsprognosen auf die Ergebnisse der Verkehrsnachfragemodelle von Paris und Montreal zu bestimmen.

Der große Vorteil von stochastischen Simulationen gegenüber Sensitivitäts- / Realitätstests und Szenarienanalysen ist, dass theoretisch unendlich viele Parameter- und Variablenkombinationen berechnet werden können, um damit eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Modellergebnisse zu approximieren. Für multivariante Analysen ist zu beachten, dass Korrelationen der Modelleingangsdaten beachtet werden (DE JONG ET AL. (2005, S. 2)).

Verkehrsnachfragemodelle auf dem derzeitigen Stand der Technik sind in der Regel sehr fein spezifiziert, d.h. sie bilden Verkehrsangebot und -nachfrage sehr differenziert ab und haben eine Vielzahl an Parametern und Variablen. In der Folge ist bereits ein einzelner Modellberechnungsdurchlauf sehr zeitaufwendig, besonders wenn die Nachfrage auf das Verkehrsnetz umgelegt wird. Für solche Modelle erscheinen sowohl analytische Ausdrücke als auch stochastische Simulationen nicht praktikabel. Es ist bereits im Analysefall nicht möglich, die Unsicherheit aller Parameter und Variablen zu quantifizieren. Selbst wenn dies gelänge oder sich Annahmen treffen ließen, die den Fehler nicht noch vergrößern, wäre es in der Praxis unmöglich, analytische Ausdrücke zu formulieren, die alle Unsicherheiten und Korrelationen berücksichtigen, oder stochastische Simulationen für alle (relevanten) Kombinationen von Unsicherheitsfaktoren mit der notwendigen Anzahl an Simulationsdurchläufen zu berechnen.

Dieses Problem wird dadurch behoben, dass sich auf wenige, speziell definierte Parameter- und Variablenausprägungen konzentriert wird, um eine überschlägige Abschätzung der Unsicherheiten liefern zu können. Drei Möglichkeiten, die Auswirkungen von Unsicherheiten mit vergleichsweise wenig Aufwand abzuschätzen, sind Sensitivitätstests, Realitätstests und Szenarienanalysen. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Simulationsmethoden haben diese Ansätze jedoch den Nachteil, dass sie keine Eintrittswahrscheinlichkeiten berechnen, sondern jeden definierten Testfall gleich gewichten (MANZO ET AL. (2014, S. 29 ff.)). Sie schätzen lediglich die – im Idealfall – minimalen und maximalen Auswirkungen definierter Einzelfälle ab. Die Auswahl der Parameter und Variablen sowie deren Ausprägung sind zudem subjektiv geprägt (wie bereits in Kapitel 3.3.1.1 erläutert) und häufig nur durch Annahmen begründet. Dies ist problematisch, weil dadurch die Gefahr besteht, dass relevante Einflussgrößen vernachlässigt oder

nicht in vollem Umfang beachtet werden. Diese Problematik wird mit einer steigenden Anzahl an Tests verringert (wobei darauf geachtet werden sollte, besonders die „Ränder“ der Annahmen zu untersuchen), im Gegenzug steigt aber der Aufwand für die Durchführung einer Unsicherheitsanalyse. Als Kompromiss können in einem zweistufigen Prozess zunächst die besonders kritischen³⁹ Parameter und Variablen herausgefunden werden, um diese dann intensiv zu untersuchen.

3.4.2.4 Abschätzung der Prognoseungenauigkeit aus der Analyseungenauigkeit

Mit dem Vergleich von Modell- und Erhebungsergebnissen werden Modellungenauigkeiten quantifiziert (siehe Kapitel 3.2). Eine Methode, aus diesen Modellungenauigkeiten des Analysefalls Rückschlüsse auf die Prognoseungenauigkeit zu ziehen, wird z.B. von FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 214 ff.) oder SAMMER ET AL. (2012, S. 93 ff.) vorgestellt.

Eine Quantifizierung des absoluten Analysefallfehlers⁴⁰ f_a^M ist nach FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 214 ff.) für Straßenklassen oder Verkehrsstärkekassen durch Vergleiche mit den Erhebungsdaten möglich. Die Autoren schlagen, basierend auf der Berechnungsvorschrift für überschlägige Konfidenzintervalle von Verkehrsnachfragemodellerngebnisse (siehe SAMMER ET AL. (2012, S. 93 ff.)), drei Berechnungsmethoden mit den Gütemaßen SQV , $RMSE$ oder $\%RMSE$ vor (siehe Kapitel 3.4.2.1). Es wird angenommen, dass sich die Modellfehler und die Eingangsdatenfehler des Analysefalls im Bezugsfall nicht ändern und somit für die Prognose übernommen werden können.

$$f_a^M = \frac{(1 - SQV) \sqrt{f} \sqrt{m_{\text{Prognose}}}}{SQV} \quad (50)$$

mit

f_a^M absoluter, mittlerer Modellfehler (hier: auf Basis des Gütemaßes SQV)

SQV (mittleres oder gefordertes) Gütemaß SQV

f Skalierungsfaktor des Gütemaßes SQV

m Kenngröße der Verkehrsplanung

m_{Prognose} Modellprognose

³⁹ Kritisch bedeutet hierbei, dass Abweichung vom angenommenen Erwartungswert der Variable bzw. des Parameters zu großen Änderungen in den Modellergebnissen und somit ggf. zu anderen verkehrlichen oder ökonomischen Bewertungen führen (MILLER & SZIMBA (2015, S. 66)).

⁴⁰ Der Analysefallfehler setzt sich aus Modellfehler und Eingangsdatenfehler zusammen.

Auf Netzelementebene definiert die Streuung von Sensitivitätstestergebnissen, bezogen auf das Modellergebnis des Bezugsfalls, den relativen Prognoseannahmenfehler f_r^P . Zur Abschätzung der minimalen und maximalen Abweichung sollten jene Sensitivitätstests herangezogen werden, die die geringste bzw. die höchste Verkehrsleistung im Netz ergeben. Obwohl für unabhängige Variablen eine multiplikative Verknüpfung denkbar wäre, wird aufgrund der nichtlinearen Wirkungszusammenhänge eines mehrstufigen Verkehrsnachfragemodells davon abgeraten. (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 214 ff.))

$$f_{r,t}^P = \frac{m_{Prognose,t}}{m_{Prognose}} \quad (51)$$

mit

$f_{r,t}^P$ relativer Prognoseannahmenfehler des Sensitivitätstest t

m Kenngröße der Verkehrsplanung

$m_{Prognose}$ Modellprognose ohne Sensitivitätsannahmen

$m_{Prognose,t}$ Modellprognose mit Sensitivitätsannahmen t

Für die Abschätzung der minimalen und maximalen Prognoseungenauigkeit werden die Bezugsfallergebnisse auf Netzelementebene mit dem absoluten Analysefallfehler (additiv) und dem Prognoseannahmenfehler (multiplikativ) verrechnet. Welche Fehler konkret berücksichtigt werden sollen, muss für jede Modellanwendung entschieden werden (siehe Tabelle 12). Es sollten immer die Wirkungen einer „normalen“ Punktprognose mit den Wirkungen einer angepassten Prognose verglichen werden. (SAMMER ET AL. (2012, S. 93 ff.), FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 214 ff.))

Anpassung des Prognosewertes		Beispiele für Modellanwendungen
Prognosewert des Bezugsfalles mit negativem Analysefallfehler und minimalem Prognoseannahmefehler $m_{\text{Prognose}}^- = (m_{\text{Modell}} - f_a^M) \cdot f_{r,t=\min}^P \quad (52)$	<ul style="list-style-type: none"> Erlöse aus Fahrgeldern oder Straßenbenutzungsgebühren Wirkungen für volkswirtschaftliche Untersuchungen
	... mit negativem Analysefallfehler $m_{\text{Prognose}}^- = (m_{\text{Modell}} - f_a^M) \quad (53)$	
	... ohne Anpassung (Punktprognose) $m_{\text{Prognose}} = m_{\text{Modell}} \quad (54)$	
	... mit positivem Analysefallfehler $m_{\text{Prognose}}^+ = (m_{\text{Modell}} + f_a^M) \quad (55)$	<ul style="list-style-type: none"> Verkehrsstärken für Leistungsfähigkeitsuntersuchungen, Lärmberechnungen oder Schadstoffemissionsberechnungen Wirkungen für volkswirtschaftliche Untersuchungen
	... mit positivem Analysefallfehler und maximalen Prognoseannahmefehler $m_{\text{Prognose}}^+ = (m_{\text{Modell}} + f_a^M) \cdot f_{r,t=\max}^P \quad (56)$	

Tabelle 12: Prognosewertanpassung in Abhängigkeit der Modellanwendung (in Anlehnung FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 214 ff.)).

mit

m	Kenngröße der Verkehrsplanung
m_{Modell}	„normale“ (Punkt-) Modellprognose
m_{Prognose}	Modellprognose
m_{Prognose}^-	minimale Modellprognose
m_{Prognose}^+	maximale Modellprognose
f_a^M	absoluter, mittlerer Modellfehler
$f_{r,t=\min}^P$	minimaler, relativer Prognoseannahmefehler
$f_{r,t=\max}^P$	maximaler, relativer Prognoseannahmefehler

Die hier beschriebene Abschätzungsmethode eignet sich, um aufzuzeigen, dass Unsicherheiten bestehen und in welcher ungefähren Größenordnung sie liegen. Zudem ist sie relativ einfach umzusetzen. Sie hat jedoch folgende Nachteile:

- Allgemein sind mit der Methode keine Aussagen über die Ursache der Fehler und Aussagen zu Größenordnungen der Teilfehler möglich.

- Die Annahme für den Analysefallfehler, dass der Eingangsdatenfehler konstant bleibt, ist kritisch zu betrachten, da die Prognoseannahmen einer hohen Unsicherheit unterliegen (siehe Kapitel 3.3.1.3). Unsichere Eingangsdaten werden zudem auch mit dem Prognoseannahmenfehler abgedeckt. Es besteht also die Gefahr, dass dieser Fehleranteil doppelt in die Abschätzung einfließt.
- Die Auswahl der Sensitivitätstests für den Prognoseannahmenfehler ist subjektiv und deckt niemals alle möglichen Sensitivitätstests ab (siehe Kapitel 3.4.2.3). Zudem wäre eine Ausweitung der Methode auf Realitätstests oder komplexere Szenarien anstrebenswert, die dann aber im Prognoseannahmenfehler berücksichtigt werden müssten.

3.4.2.5 Fehlerfortpflanzung

Eine Besonderheit von Verkehrsnachfragemodellen gegenüber Modellen allgemein ist, dass sie sich aus verschiedenen Teilmodellen zusammensetzen. Dabei weist jedes Teilmodell Unsicherheiten auf. ALONSO (1968, S. 178) nutzt ein einfaches Beispiel um die Entwicklung von Unsicherheiten in mehrstufigen Prozessen zu erläutern: wenn jede Modellstufe eine 80 %-ige Sicherheit (oder 20 %-ige Unsicherheit) aufweist und von abhängigen Ereigniswahrscheinlichkeiten ausgegangen wird, dann ist die Sicherheit nach vier Stufen auf $0,8^4 = 0,41$, also 41 % gesunken bzw. die Unsicherheit ist auf 59 % gestiegen.

Verschiedene Studien haben versucht, die Entwicklung von Unsicherheiten in einem Verkehrsnachfragemodell über die einzelnen Modellstufen hinweg zu analysieren. Dabei erzeugen unsichere Eingangsdaten ein unsicheres Modellergebnis, was wiederum den Input (neben den unsicheren externen Eingangsdaten) für die nächste Modellstufe liefert. In Abbildung 18 ist eine solche Entwicklung von Unsicherheiten in einem Verkehrsnachfragemodell schematisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Unsicherheitsverteilungen in jeder Stufe verändern.

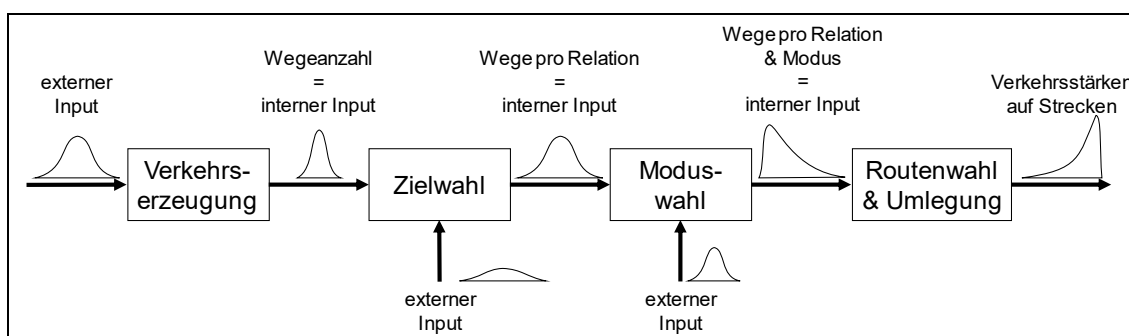


Abbildung 18: Schematische Darstellung der Fehlerfortpflanzung im Vier-Stufen-Algorithmus (Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an REZAEESTAKHRUIE (2017, S. 25)).

In diesem Zusammenhang weist SIMON (2018) auf sogenannte Konvexitätseffekte hin. Abbildung 19 zeigt hierfür schematisch, dass es aufgrund der Konvexität der Funktion zu Abweichungen bei der Schiefe und der Streuung der Unsicherheitsverteilungen von Eingangsvariable und Modellergebnis kommt.

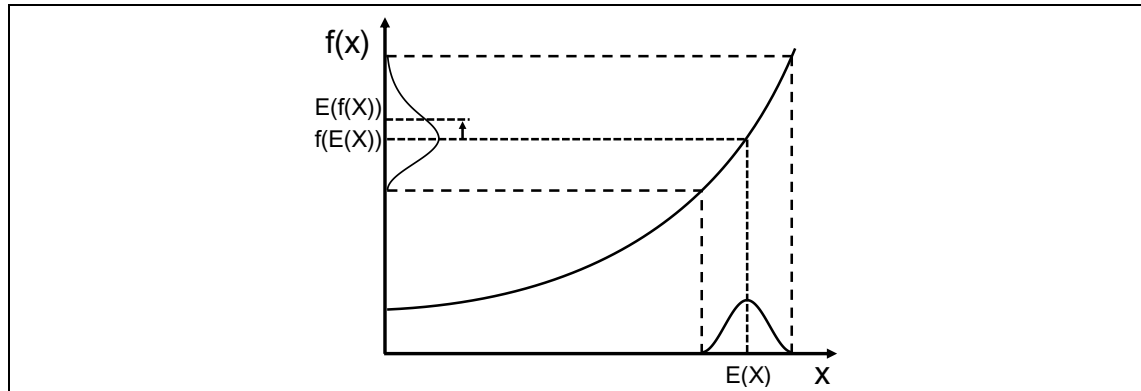


Abbildung 19: Schematische Darstellung von Konvexitätseffekten (Bildquelle: SIMON (2018)).

Die Unsicherheit der Teilmodelle wird unter anderem durch die Anzahl der Alternativen bestimmt. Die Anzahl der Alternativen im gesamten Modell steigt multiplikativ mit jedem Teilmodell (Wegezwecke \times Zielverkehrszellen \times Modi \times Routen). Mit der Anzahl der Alternativen reduziert sich aber auch die Anzahl der Ortsveränderungen pro Alternative, womit größere relative Abweichungen zu erwarten sind. Im Ergebnis führt dies dazu, dass sich die Fehler über die Modellstufen hinweg verstärken, während es gleichzeitig aber auch den gegenteiligen Effekt gibt, dass sich die Fehler durch Gleichgewichtsmechanismen reduzieren. (ZHAO & KOCKELMAN (2002, S. 10), FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 177)).

Häufig werden für die Quantifizierung der Fehlerfortpflanzung Ansätze der stochastischen Simulation verwendet. Beispielweise betrachten ZHAO & KOCKELMAN (2002) die Fehlerfortpflanzung von Fehlern bei Eingangsdaten, die in 100 Simulationen variiert werden, im Verlauf des Vier-Stufen-Algorithmus. Der Fehler nimmt von Verkehrserzeugung, über Zielwahl, bis zur Moduswahl zu (da die Anzahl der Wege pro Quelle-Ziel-Relation abnimmt). In der Umlegung nimmt der Fehler auf Streckenebene ab, da sich hier verschiedene Routen überlagern und es Rückkopplungen zwischen angebotener Kapazität und Verkehrsnachfrage gibt. Als Fazit schließen die Autoren, dass Modelleingangsdaten und -ergebnisse die gleiche Unsicherheit aufweisen. Demzufolge ist die Unsicherheit der Modelleingangsdaten die Hauptquelle für Unsicherheiten im Modell und selbst einfache Regressionen zwischen Modelleingangsdaten und -ergebnissen hätten eine hohe Aussagekraft. (ZHAO & KOCKELMAN (2002, S. 10 f.))

REZAEESTAKHRUIE (2017) schlägt eine Methodik vor, die die Fortpflanzung von Fehlern in einem Vier-Stufen-Algorithmus mittels analytischer Ausdrücke ermöglicht. Damit kann die Streuung der Modellergebnisse aus der Streuung der Eingangsgrößen abgeleitet werden. Zudem wird der Modellfehler, der im Laufe der Validierung bestimmt wird, mit in

die Bestimmung des Gesamtfehlers einbezogen. Nach REZAEESTAKHRUIE (2017, S. 89 f.) ist die Methodik theoretisch auch für andere Modellansätze als den Vier-Stufen-Algorithmus umsetzbar, jedoch bedarf es hierfür noch weiterer Nachforschungen und letztlich auch immensen Implementierungsaufwand. Eine Verallgemeinerung dieses Ansatzes gestaltet sich auch deswegen schwierig, weil bei unterschiedlichen Modellen unterschiedliche Fehler beachtet werden müssen (REZAEESTAKHRUIE (2017, S. 24)).

RASOULI & TIMMERMANS (2012, S. 19) weisen darauf hin, dass die Effekte der Fehlerfortpflanzung in mikroskopischen Verkehrsnachfragemodellen (siehe Kapitel 2.4.1) von den oben beschriebenen Erfahrungen mit makroskopischen Modellen abweichen können, weil dort unter anderem andere Entscheidungen modelliert werden oder andere Randbedingungen eingehalten werden müssen.

3.4.3 Darstellung der Unsicherheiten

Eine Möglichkeit, Unsicherheiten darzustellen, ist eine Auflistung in der Dokumentation des Modells. Die britische Richtlinie WebTAG (UK DfT (2018b, S. 2 ff.)) schreibt hierfür ein spezielles Unsicherheits-Logbuch als Teil der Modelldokumentation vor. Darin werden alle bekannten Unsicherheiten im Analyse- und Bezugsfall für alle Szenarien aufgelistet und bewertet. Es enthält somit alle bekannten Eingangsdatenfehler und Modellannahmen (Modellfehler und Prognosefehler) – idealerweise auch mit Streubereichen möglicher Ausprägungen (95 % Konfidenzintervall).

Ein anderes nützliches Hilfsmittel für eine systematische Darstellung von Unsicherheiten sind Unsicherheitsmatrizen. Das Ziel hinter diesem Ansatz ist, für alle auftretenden Unsicherheiten den Ort, die Stufe und die Art der Unsicherheit (nach WALKER ET AL. (2003); siehe Kapitel 3.1) sichtbar und damit bewusst zu machen. Die Matrix kann im Rahmen von Voruntersuchung (z.B. für die Modellstruktur), der Modellanwendung (z.B. für Ergebnisuntersuchungen) und des Qualitätsmanagementprozesses (z.B. für externe Verifizierungen der Modellspezifikation) Anwendung finden. Tabelle 13 zeigt den Aufbau einer Unsicherheitsmatrix. In die leeren Felder sind die jeweiligen Unsicherheiten einzutragen, wobei es durchaus Überlappungen zwischen den jeweiligen Feldern geben kann. (WALKER ET AL. (2003, S. 14 f.))

			Stufe der Unsicherheit			Art der Unsicherheit	
			statistische Unsicherheit	Szenario-unsicherheit	erkannte Unwissenheit	erkenntnis-basierte Unsicherheit	variabilitäts-basierte Unsicherheit
Ort der Unsicherheit	Modelldefinition und -spezifikation	Kontext und Struktur					
		Implementierung					
	Modellkalibrierung	Eingangsdaten					
		Parameter					
	Modellvalidierung	Modellergebnisse					
		Validierungsdaten					

Tabelle 13: Aufbau einer Unsicherheitsmatrix (in Anlehnung an WALKER ET AL. (2003, S. 15) und MANZO ET AL. (2014, S. 22 ff.)).

3.5 Vorschläge zur Vermeidung und Kommunikation von Unsicherheiten in der Modellierung

Zum Abschluss des Kapitels werden – basierend auf HARTGEN (2013, S. 1133) – zwei Herangehensweisen beschrieben, wie zukünftig mit Modellunsicherheiten umgegangen werden kann. Beide Herangehensweisen können und sollen parallel stattfinden.

- Technische und organisatorische Verbesserungen: diese beinhalten die Reduktion von Modellunsicherheiten durch verbesserte Modelle. Dies beinhaltet z.B. bessere Spezifikationen, Datengrundlagen oder Methoden sowie die Verbesserung der Organisation des Modellaufbaus durch systematische Prozesse. HARTGEN (2013, S. 1133) bezeichnet diese Herangehensweise als „Hybris“.
- Kommunikative Verbesserungen: diese beinhalten hauptsächlich die Akzeptanz von Modellunsicherheiten sowie deren transparente Darstellung und die Ausweisung ihrer Auswirkungen auf die Entscheidungsfindung. HARTGEN (2013, S. 1133) bezeichnet diese Herangehensweise als „Demut“.

Technische und organisatorische Verbesserungen

Verkehrsnachfragemodelle werden in der Wissenschaft und Praxis ständig weiterentwickelt, um reales Mobilitätsverhalten besser abzubilden. SIMON ET AL. (2020, S. 3) nennen beispielsweise folgende Entwicklungen:

- die Berücksichtigung von Aufwandsschwellen und Verlustaversion,
- die Abbildung von Verfügbarkeit und Beschaffungswahl von Mobilitätswerkzeugen,
- die Abbildung einer tageszeitabhängigen Ziel- und Moduswahl,

- die Differenzierung von Personengruppen nach Verkehrsmittelverfügbarkeit und die Abbildung gruppenübergreifender Randsummenbedingungen,
- die Modellierung einer vorgelagerten Zielwahl bei Pflichtaktivitäten,
- die Berücksichtigung von Kapazitäten im ÖV,
- die Modellierung von On-Demand-Angeboten als Teil des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV),
- das Bündeln von Fahrwünschen beim Ridesharing,
- die Umlaufbildung für geteilte Fahrzeugflotten,
- die Modellierung von Netzmodellen für den Radverkehr und
- ggf. auch die Anwendung von mikroskopischen oder hybriden Verkehrsnachfragemodellen (siehe Kapitel 2.4.1).

Bei all dem sollte beachtet werden, dass es sehr ressourcenaufwendig sein kann, Verbesserungen in bestehende Modelle zu implementieren und dass dadurch auch Abweichungen zu bisherigen Modellergebnissen auftreten können. (ORTÚZAR & WILLUMSEN (2011, S. 387 f.), FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 169 f.)). Zudem sollten auch die Modellerweiterungen ihre Unsicherheiten klar ausweisen und im Idealfall auch quantifizieren.

Es zeigt sich aktuell, dass die Modelle und die Fragestellungen, die das Modell beantworten soll, immer komplexer werden. Angesichts dieser Entwicklung sei nochmals auf den in Abbildung 10 (S. 54) dargestellten Zusammenhang hingewiesen: mit zunehmender Komplexität sinkt zunächst die Unsicherheit des Modells aufgrund eines kleiner werdenden Modellfehlers. Doch je komplexer es wird, desto mehr wirkt sich ein zunehmender Eingangsdatenfehler auf das Modellergebnis aus. (ALONSO (1968, S. 183 f.))

Neben den modelltheoretischen Weiterentwicklungen können auch bessere Eingangsdaten als „technische“ Verbesserung gesehen werden. ALONSO (1968, S. 182) nennt beispielsweise zwei einfache Regeln zur Reduzierung der Eingangsdatenfehler:

1. Konzentration auf die wichtigen (signifikanten) Variablen und
2. Konzentration auf die Variablen, die in der Regel große Fehler aufweisen.

Vor diesem Hintergrund ist auch die Auswertung von „Big Data“ ein Schlüssel für zielgerichtete Weiterentwicklungen. MILLER (2020, S. 32) führt hierzu an, dass diese riesigen Datenmengen von dynamischen Zeitreihendaten ein großes Potenzial besitzen, Verhalten realistischer abzubilden, auch wenn hierbei durchaus Nachteile auftreten, z.B.:

- Anonymisierung der Daten, sodass keine Informationen über den Reisenden bekannt sind,
- das genutzte Verkehrsmittel und der Wegezweck sind häufig nicht erfasst und müssen nachträglich ermittelt werden,
- zeitlich und räumlich sind die Daten zum Teil sehr grob aufgelöst oder

- es sind meistens aufwändige Vorarbeiten an den Daten nötig, z.B. Zusammenführung, Plausibilisierung und Bereinigung der Daten.

Eine weitere technische Verbesserung ist die zunehmende Rechenleistung von Computern. Heutige Modelle haben häufig sehr lange Rechenzeiten, daher können sie nur sehr bedingt für schnelle Abschätzungen oder häufig zu wiederholende Modellläufe (z.B. stochastische Simulationen, siehe Kapitel 3.4.2.3) verwendet werden. Durch soft- und hardwareseitige Weiterentwicklungen, z.B. dem verteilten Rechnen in Clustern (MILLER (2020, S. 42), dem Einsatz künstlicher Intelligenz oder Kollaborationsmöglichkeiten mehrerer Modellbearbeiter, entsteht hier großes Potenzial. Zusätzlich regen z.B. MARSDEN ET AL. (2018, S. 46) oder MILLER (2020, S. 43) an, als Alternative zu teuren kommerziellen Softwareprodukten Open-Source-Software zu entwickeln. Sie versprechen sich davon, dass sich deren nutzungsgetriebene Entwicklung positiv auf die häufig mangelnde Flexibilität bei der Implementierung neuer Ideen auswirkt. Zudem böte sie eine standardisierte Umgebung für vergleichbare Modellapplikationen.

Organisatorische Verbesserungen beziehen sich auf alle Prozesse um den Aufbau und die Arbeit mit Verkehrsnachfragemodellen. Beispielsweise kann die Etablierung von internen und externen Prüfungen (Reviews) Fehler und Unsicherheit reduzieren. Generell sorgt auch eine gute Organisation von Arbeitsprozessen für eine Arbeitsatmosphäre, die potenziell weniger fehleranfällig ist. WILLUMSEN (2016b), FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 240 ff.) und MILLER (2020, S. 43) nennen hierfür folgende Beispiele:

- den Umgang zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer,
- die finanziellen Kalkulationen von Auftraggebern und -nehmern, die sich häufig konträr zum Ziel eines qualitativ hochwertigen (und entsprechend geprüften) Modells darstellen,
- die Bereitstellung von fachkundigem (und regelmäßig geschultem) Personal sowie die auftraggeberseitige Erkenntnis, dass solches Personal rar ist,
- ein ehrlicher und offener Austausch über Probleme der Praxis (z.B. fehlende Standards zum Datenaustausch, Datenbereinigung, Fehlerbeseitigung) und den Umgang damit, da es höchst ineffizient ist, wenn jeder dieselben Erfahrungen sammeln muss sowie
- keine Verengung des fachlichen Diskurses auf die neuesten akademischen Weiterentwicklungen, um die Anforderungen der Praxis nicht aus den Augen zu verlieren.

Konkrete technische Weiterentwicklungen wären die Quantifizierung bzw. Qualifizierung von Unsicherheiten. Dafür werden in diesem Kapitel verschiedene Methoden vorgestellt, beispielsweise die qualifizierende Abschätzung und Modellanpassung mittels Referenzklassen. Diese Methode ermöglicht es, aus den Erfahrungen der Vergangenheit zu lernen. Sie kann aber nur zur Anwendung gelangen, wenn eine entsprechende Datenbasis zur Verfügung steht, d.h. wenn sich systematische Ex-post-Analysen von Modellprognosen etablieren.

Für die Quantifizierung wird unter anderem die Szenarienanalyse vorgestellt. Um geeignete Szenarien bzw. langfristige Entwicklungen abbilden zu können, schlagen MARSDEN ET AL. (2018, S. 46 ff.) die Einrichtung eines staatlichen Zukunftslabors vor, welches es z.B. bereits in den Niederlanden gibt (MARSDEN ET AL. (2018, S. 43), VERROEN (2017)). Ein solches Zukunftslabor entwickelt ministerienübergreifend Zukunftsszenarien für Gesellschaft, Energieversorgung, Digitalisierung, Arbeitswelt, Familienpolitik, Demografie, Verkehr, Raumentwicklung etc. Die konkreten Maßnahmen und Entwicklungen auf kommunaler Ebene sollten dabei ebenfalls beachtet werden. Folgende Studien zeigen beispielhaft, wie solche Szenarien aussehen können:

- PHLEPS ET AL. (2015) haben auf Basis der Einschätzung von 55 Experten zwei Szenarien für die Mobilität in Deutschland im Jahr 2035 entwickelt, indem sie sechs Einflussfaktoren berücksichtigen: Demografie, Verkehrspolitik, Energie, Wirtschaft, Einstellungen und Technologie. Die entwickelten Szenarien sind:
 - Musterschüler: „Eine innovationsfreudige und konkurrenzfähige Wirtschaft, höhere Infrastrukturinvestitionen sowie ein ökologischeres Verhalten als Teil des Lifestyles beeinflussen die Mobilität nachhaltig.“ (PHLEPS ET AL. (2015, S. XIV f.))
 - Mut zur Lücke: „Eine gesättigte Zufriedenheit mindert die Anstrengungen, adverse Rahmenbedingungen wie den demografischen Wandel auszugleichen. Rationalisierung und Funktionalisierung prägen das Mobilitätsgeschehen.“ (PHLEPS ET AL. (2015, S. XVI f.))
- LYONS (2014, S. 8) zeigt ein Beispiel für die staatliche Bündelung von einzelnen Maßnahmen und Entwicklungen in Szenarien im „Future Demand“-Projekt des neuseeländischen Verkehrsministeriums. Es werden zwei Hauptunsicherheiten untersucht („Bevorzugte Erreichbarkeit (physisch / virtuell)“ und „Relative Energiekosten (hoch / niedrig)“). Anhand der Ausprägungen der Unsicherheiten werden vier Szenarien für die Verkehrsnachfrage im Jahr 2042 abgeleitet.

Die szenariobasierte Herangehensweise hätte den Vorteil, dass sie den politischen Entscheidern eine Grundlage böte, um eine gesamtgesellschaftliche Vision aktiv und gezielt zu verfolgen (engl.: „decide and provide“⁴¹). Damit könnte der z.B. von VAN VUREN (2020) kritisierte „predict and provide“-Ansatz⁴² abgelöst werden. Letztgenannter Ansatz kommt im Bereich der Verkehrsplanung klassischerweise zur Anwendung. In Kombination mit (unsicheren) Punktprognosen bedeutet dies, dass die Planung allein von der (unsicher) prognostizierten Nachfrage abhängt.

Wenn Unsicherheiten der Modelle kommuniziert werden, müssten viele (standardisierte) Prozesse, die auf Modellergebnissen aufbauen, angepasst werden. Denn nur wenn die Unsicherheitsinformationen auch berücksichtigt werden und eine Abkehr von Entschei-

⁴¹ Übersetzung: entscheiden und bereitstellen

⁴² Übersetzung: vorhersagen und bereitstellen

dungen aufgrund eines Mittelwerts bzw. Hauptszenarios stattfindet, werden Unsicherheiten von Modellen nicht mehr als lästiges Übel oder gar Mangel des Modells wahrgenommen werden.

Kommunikative Verbesserungen

Die Erkenntnis, dass Punktprognosen (oder die Verwendung von Szenarien) ungeeignet sind, um die modellinhärenten Unsicherheiten abzubilden, ist nicht neu und wurde bereits von ALONSO (1968, S. 190) angemahnt. Die mediale Aufmerksamkeit für Modellrechnungen und ihre Unsicherheiten im Zuge der Covid19-Pandemie (siehe z.B. SALTELLI ET AL. (2020)) kann durchaus dazu führen, dass solche Unsicherheitsbereiche zukünftig auch für Verkehrsnachfragemodellergebnisse gefordert werden. Dieses Kapitel hat jedoch dargestellt, dass eine genaue Quantifizierung in der Praxis nur schwer umsetzbar ist.

Ungeachtet dessen sollten unsichere Annahmen transparent dokumentiert und kommuniziert werden. Eine gute Dokumentation hilft, ein Verständnis für das Modell und seine Wirkungszusammenhänge aufzubauen, was wiederum zu einer gesteigerten Bereitschaft führt, den Modellergebnissen zu vertrauen (PARTHASARATHI & LEVINSON (2010, S. 441), siehe auch Kapitel 4.3.6). Die britische Richtlinie WebTAG (UK DfT (2018b, S. 2 ff.)) schreibt z.B. das bereits erwähnte Unsicherheits-Logbuch als Teil der Modelldokumentation vor, dass alle bekannten Unsicherheiten im Analyse- und Bezugsfall für alle Szenarien transparent auflistet und bewertet. Manche Fehler sind absehbar (z.B. mangelhafte Datengrundlagen), zum Teil treten sie aber auch plötzlich im Modellierungsprozess auf. FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 204) schlagen daher vor, dass ein Vorgehen für die Fehlerbehandlung zwischen Auftraggeber und -nehmer vereinbart wird. Dies beinhaltet unter anderem eine Dokumentation aller bekannten Fehler, um während der Modellvalidierung Erklärungen für mögliche Qualitätseinbußen zu haben. Zudem sollten auch die Einsatzzwecke des Modells, die verwendeten Wirkungszusammenhänge und die Modelllimitationen transparent benannt werden.

FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 217) weisen darauf hin, dass es in der (deutschen) Verkehrsplanungspraxis bisher keine Erfahrungen mit Unsicherheitsangaben gibt. Gerade bei sehr großen Fehlern kann es zu Situationen kommen, in denen eine Maßnahme ohne dargestellten Prognosefehler geeignet, mit dargestelltem Prognosefehler aber ungeeignet ist. Diese Art der Transparenz muss den politischen Entscheidern und der Öffentlichkeit gut kommuniziert werden, ohne dass es zu Verunsicherungen kommt. Ähnliche Argumente gegen die Angabe von Unsicherheiten werden durch MARSDEN ET AL. (2018, S. 41) aufgezählt:

- Unsicherheitsangaben untergraben Expertenwissen, das die Entscheidungsfindung eigentlich stützen soll oder
- Unsicherheitsangaben bedeuten zusätzlichen Aufwand, der nicht wertgeschätzt wird, weil die nachfolgenden Prozesse nur eine Punktprognose benutzen.

Andererseits bedeutet das Verschweigen von Unsicherheiten nicht, dass keine Unsicherheiten bestehen. Nach RASOULI & TIMMERMANS (2012, S. 2) sollten Unsicherheiten des Modells thematisiert werden, wenn:

- unterschiedliche Ansichten zu einer geplanten Maßnahme bestehen, während das Modell eine Variante klar bevorzugt,
- hohe finanzielle, politische oder gesellschaftliche Risiken bestehen,
- Kosten und Nutzen fragwürdig erscheinen oder
- das ganze Modell angezweifelt wird.

Es ist daher von entscheidender Bedeutung, dass die Unsicherheiten, die in einem Verkehrsnachfragemodell implizit enthalten sind, an Planende und politische Entscheidungsträger kommuniziert und diese Informationen nicht vorenthalten werden. Die kommunikative Herausforderung ist somit, Unsicherheitsangaben nicht als Mangel des Modells, sondern als Informationsgewinn darzulegen. (LEMP & KOCKELMAN (2009, S. 14 f.), MARSDEN ET AL. (2018, S. 41))

Die Angabe von Unsicherheitsbereichen wird zwangsläufig Konsequenzen für den Entscheidungsprozess haben. SAMMER (2020) nennt hierfür mögliche Reaktionen auf die Kommunikation von Unsicherheiten (bezogen auf konkrete Maßnahmen):

- Es findet ein Monitoring der umgesetzten Maßnahme statt und im Überschreitungsfall eines bestimmten Grenzwertes muss steuernd eingegriffen werden.
- Die Maßnahme wird um einen Sicherheitsaufschlag ergänzt, sodass der Überschreitungsfall eines bestimmten Grenzwertes unwahrscheinlicher wird. Dadurch wird jedoch eine Überdimensionierung und damit ein ineffizienter Ressourceneinsatz wahrscheinlich.
- In jedem Fall müssen die Unsicherheitsverteilungen in nachfolgenden Berechnungen berücksichtigt werden, z.B. im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung oder einer Lärmschutzanalyse.

Letztlich läuft die Debatte über Unsicherheitsangaben auf eine generelle Frage hinaus: Sollte der Einfluss von Modellen in Entscheidungsprozessen reduziert werden, weil z.B. die langfristigen Unsicherheiten in der Nachfrage zu groß sind, um damit rationale Entscheidungen zu treffen? Diese Entwicklung wird durchaus in der Fachwelt diskutiert z.B. von HARTGEN (2013, S. 1153 f.) oder MARSDEN (2017). Allerdings mangelt es an praxistauglichen Alternativen. FRIEDRICH (2015) nennt diesbezüglich die (subjektive) Erfahrung von Planenden oder Ableitung aus einfachen verkehrlichen Zusammenhängen. Beide Alternativen scheitern an der Abschätzung komplexer Zusammenhänge. Aus diesem Grund sind Modelle trotz ihrer Nachteile (z.B. große Unsicherheiten und Ergebnisse, die von Experten interpretiert werden müssen) eine mächtige Entscheidungshilfe.

Eine ganz andere Möglichkeit, die Vertrauenswürdigkeit von Modellen zu erhöhen, wäre nach HARTGEN (2013, S. 1153 f.) die Verpflichtung von Modellierenden auf einen Kodex

der Berufsethik, wie ihn z.B. die „Society for Modeling & Simulation“ (SCS (2019)), vorschlägt. Eine Übersetzung dieses Kodex ist in Anhang 2 zu finden. In Auszügen steht darin:

- Ich werde die Qualität von Produkten und / oder Dienstleistungen durch den Einsatz geeigneter Methoden und Technologien sicherstellen.
- Ich werde kritische professionelle Überprüfung suchen, anwenden und anbieten.
- Ich werde alle Annahmen zum Systementwurf sowie bekannte Einschränkungen und Probleme gegenüber den autorisierten Parteien vollständig offenlegen.
- Ich werde vor der Akzeptanz von Modellierungs- und Simulationsergebnissen warnen, wenn es keine ausreichenden Beweise für eine gründliche Validierung und Verifizierung gibt.
- Ich werde gründliche und unvoreingenommene Interpretationen und Bewertungen der Ergebnisse von Modellierungs- und Simulationsstudien gewährleisten.

In diesem Kapitel sind die verschiedenen Gründe für Abweichungen und Unsicherheiten von Modellen vorgestellt worden. Es wurde darauf eingegangen, wie Abweichungen und Unsicherheiten zu bestimmen sind. Dabei wurde deutlich, dass es verschiedene Möglichkeiten gibt, Unsicherheiten relativ genau zu quantifizieren. Jedoch wurden die stochastischen Simulationen und analytischen Ausdrücke sowie eine komplette Modellierung der Fehlerfortpflanzung als nicht praktikabel eingeschätzt. Dies liegt an der Vielzahl von Unsicherheitsfaktoren, die auf große, komplexe Modelle wirken (z.B. Unsicherheiten aus dem Modellaufbau, Unsicherheiten für alle Arten von Eingangsdaten und Unsicherheiten aller Prognoseannahmen). Zusätzlich sind die Größenordnungen der Unsicherheiten häufig unbekannt. Als aufwandsärmere Alternativen wurden Sensitivitäts- und Realitätstest sowie Szenarienanalysen vorgestellt. Der verringerte Aufwand wird zwar mit einer geringeren Aussagekraft erkaufte, aber trotzdem sind Szenarienanalysen eine praktikable Möglichkeit, Unsicherheiten abzubilden.

Transport modellers are inveterate optimists. We underestimate how long it would take to develop our models and overestimate how accurate and reliable forecasts based on their outputs will be. We dismiss the possibility that errors will remain even in the most frequently used model; after all, we have spent long days and nights calibrating and validating our work and this effort supports our optimism.

Luis G. Willumsen in WILLUMSEN (2016c)

4 Qualitätsmanagement von Verkehrsnachfragemodellen

Da Verkehrsnachfragemodelle eine wichtige Grundlage für viele weitreichende Entscheidungen sind, muss eine gewisse Qualität ihrer Ergebnisse erwartet werden können. Dieses Kapitel definiert zunächst relevante Begriffe im Zusammenhang mit Qualität und stellt im Anschluss den Qualitätsmanagementprozess nach PESTEL ET AL. (2016) vor.

4.1 Definitionen bezüglich Qualität

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen“ von RIESER ET AL. (2018, S. 59 ff.) wurden Fachleute auf dem Gebiet der Verkehrsmodellierung gebeten, den Begriff „Modellqualität“ zu definieren. Die 38 erhaltenen Antworten machen deutlich, dass sich Modellqualität durchaus verschieden interpretieren lässt. Die Bandbreite der Antworten erstreckt sich von einer guten Anpassung zwischen Modell- und Erhebungswerten (z.B. „Geringe Abweichungen von empirischen Vergleichsdaten [...]“) bis zur Aussage, dass ein realistisches Modellverhalten wichtiger als die Abbildung der Erhebungswerte ist (z.B. „Good fit on base year not enough [sic] and may be misleading“⁴³). Häufig wird auch Bezug auf die Prognosefähigkeit genommen (z.B. „Model quality is [sic] ability to accurately predict transport (traffic) conditions in a given future moment“⁴⁴) oder es werden klare Regeln bzw. Richtlinien genannt (z.B. „Abweichung zwischen Verkehrszählung und Modellierung kleiner gleich 10 %“, „Meets webtag guidance standards“⁴⁵). Teilweise werden auch die Nachvollziehbarkeit und die transparente Angabe von Unsicherheiten als Qualitätskriterium herangezogen (z.B. „[...] Das Modell sollte verständlich sein, eine entsprechend verständliche Dokumentation muss vorhanden sein. Die Schwächen und Stärken sind bekannt und eindeutig ausgewiesen“, „[...] Der Modellbauer muss in der Lage sein [sic] ein Vertrauensintervall zu den Prognosewerten zu liefern [...]“).

⁴³ Übersetzung: Eine gute Übereinstimmung des Analysejahres ist nicht ausreichend und eventuell sogar fehlleitend.

⁴⁴ Übersetzung: Modellqualität ist die Fähigkeit, Verkehrszustände zu einem gegebenen zukünftigen Zeitpunkt akkurat zu prognostizieren.

⁴⁵ Übersetzung: Erfüllt die Standards der Richtlinie WebTAG.

Aus dem Spektrum der unterschiedlichen Antworten wird deutlich, dass der Begriff Modellqualität zunächst klar abgegrenzt werden muss. Die DIN EN ISO 9000:2015 (2015) definiert Grundlagen und Begriffe von Qualitätsmanagementsystemen. Laut dieser Norm ist **Qualität** als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts [z.B. ein Produkt, eine Dienstleistung, ein Prozess] Anforderungen erfüllt“, definiert (DIN EN ISO 9000:2015 (2015, S. 39 ff.)). Dementsprechend ist **Modellqualität** der Grad, mit dem ein Satz modellinhärenter Qualitätsmerkmale definierte Qualitätsanforderungen erfüllt. Eine Auflistung der Begriffsdefinitionen und ihrer Entsprechung in der Verkehrsnachfragemodellierung findet sich in Tabelle 14. Dort werden in Anlehnung an FRIEDRICH (2010, S. 5) auch weitere qualitätsrelevante Begriffe aufgenommen. Dadurch wird z.B. die Doppelrolle des Modellierenden – als Lieferant und Kunde – deutlich.

Begriff	Definition nach DIN EN ISO 9000:2015 (2015)	Beispiel
Qualität	Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts [Qualitäts-] Anforderungen erfüllt.	<ul style="list-style-type: none"> Erfüllung / Nichterfüllung der Anforderungen an das Gütemaß für modellierte Verkehrsstärken.
Qualitätsmerkmale	Inhärente Eigenschaften eines Objekts, die sich auf [Qualitäts-] Anforderungen beziehen.	<ul style="list-style-type: none"> Abweichung zwischen modellierten und erhobenen Verkehrsstärken.
Qualitätsanforderungen	Erfordernis oder Erwartung [bezüglich der Qualität], das oder die festgelegt, üblicherweise vorausgesetzt oder verpflichtend ist.	<ul style="list-style-type: none"> Ein definiertes Gütemaß für modellierte Verkehrsstärken soll für 85 % der Zählstellen eingehalten werden.
Fehler	[Allgemeine] Nichterfüllung einer Anforderung.	<ul style="list-style-type: none"> Nichterfüllung der Anforderungen an das Gütemaß für modellierte Verkehrsstärken.
Mangel	Nichterfüllung einer Anforderung in Bezug auf einen beabsichtigten oder festgelegten Gebrauch.	<ul style="list-style-type: none"> Nichterfüllung der Anforderungen an das Gütemaß für modellierte Verkehrsstärken, um damit Knotenströme hinreichend genau abzubilden.
Lieferant	Organisation ⁴⁶ , die ein Produkt oder eine Dienstleistung bereitstellt.	<ul style="list-style-type: none"> Modellierende sind Lieferanten des Software-Produktes „Verkehrsnachfragemodell“, das in einer Dienstleistung erstellt wird. Gleichzeitig sind sie auch Kunden des Produktes „Modellierungssoftware“, die vom Softwarehersteller geliefert wird. Die Gesellschaft ist Datenlieferant (Daten = Produkt), da sie mit ihren Antworten im Rahmen von Haushaltsbefragungen Informationen zum Mobilitätsverhalten bereitstellt (Erhebung = Dienstleistung). Verkehrsengeieure, die mit den Ergebnissen des Produktes „Verkehrsnachfragemodell“ das Verkehrsangebot planen, sind Kunden, die eine vom Modellierenden erbrachte Dienstleistung empfangen.
Kunde	Person oder Organisation ⁴⁶ , die ein Produkt oder eine Dienstleistung empfängt oder empfangen könnte, welches oder welche für diese Person oder Organisation vorgesehen ist oder von ihr gefordert wird.	
Produkt	Ergebnis einer Organisation ⁴⁶ , das ohne jegliche Transaktion zwischen Organisation und Kunden erzeugt werden kann. Produktkategorien sind: <ul style="list-style-type: none"> verfahrenstechnische Produkte Hardware Software 	
Dienstleistung	Ergebnis einer Organisation ⁴⁶ mit mindestens einer Tätigkeit, die notwendigerweise zwischen der Organisation und dem Kunden ausgeführt wird.	

Tabelle 14: Begriffe der DIN EN ISO 9000:2015 (2015) bezogen auf die Qualität von Verkehrsnachfragemodellen (aktualisierte und erweiterte Auflistung auf Grundlage von FRIEDRICH (2010, S. 5)).

Neben dem Begriff Qualität ist auch Qualitätsmanagement ein fest definierter Ausdruck. **Qualitätsmanagement** beschreibt „aufeinander abgestimmte Tätigkeiten zum Führen und Steuern einer Organisation⁴⁶“ bezüglich Qualität (DIN EN ISO 9000:2015 (2015, S. 31)). Folgende Prinzipien gelten für die grundlegende Konzeption eines Qualitätsmanagements (DIN EN ISO 9000:2015 (2015, S. 13 ff.)):

- Kundenorientierung:
„Der Hauptschwerpunkt des Qualitätsmanagements liegt in der Erfüllung der Kundenanforderungen und dem Bestreben, die Kundenerwartungen zu übertreffen.“
- Führung:
„Führungskräfte auf allen Ebenen schaffen die Übereinstimmung von Zweck und Ausrichtung sowie Bedingungen, unter denen Personen sich für die Erreichung der Qualitätsziele der Organisation engagieren.“
- Engagement von Personen:
„Kompetente, befugte und engagierte Personen auf allen Ebenen in der gesamten Organisation sind wesentlich, um die Fähigkeit der Organisation zu verbessern, Werte zu schaffen und zu erbringen.“
- Prozessorientierter Ansatz:
„Beständige und vorhersehbare Ergebnisse werden wirksamer und effizienter erzielt, wenn Tätigkeiten als zusammenhängende Prozesse, die als kohärentes System funktionieren, verstanden, geführt und gesteuert werden.“
- Verbesserung:
„Erfolgreiche Organisationen legen fortlaufend einen Schwerpunkt auf Verbesserung.“
- Faktengestützte Entscheidungsfindung:
„Entscheidungen auf Grundlage der Analyse und Auswertung von Daten und Informationen führen wahrscheinlich eher zu den gewünschten Ergebnissen.“
- Beziehungsmanagement:
„Für nachhaltigen Erfolg führen und steuern Organisationen ihre Beziehungen mit relevanten interessierten Parteien, z.B. Anbietern.“

Das Qualitätsmanagement umfasst die Arbeitsschritte **Qualitätsplanung**, **Qualitätssteuerung**, **Qualitätssicherung** und **Qualitätsverbesserung**. Diese Begriffe werden in Tabelle 15 definiert und anhand von Beispielen aus der Verkehrsnachfragemodellierung verdeutlicht. Die Arbeitsschritte können in dieser Reihenfolge auch mehrfach nacheinander in einem sogenannten Deming-Zyklus durchgeführt werden, um auf den Erkenntnissen des vorherigen Durchlaufs aufzubauen. (BOLTZE ET AL. (2014, S. 609), DIN EN ISO 9000:2015 (2015, S. 31 f.))

⁴⁶ Organisation ist definiert als „Person oder Personengruppe, die eigene Funktionen mit Verantwortlichkeiten, Befugnissen und Beziehungen hat, um ihre Ziele zu erreichen“ (DIN EN ISO 9000:2015 (2015, S. 27)).

Begriff	Definition nach DIN EN ISO 9000:2015 (2015)	Beispiel
Qualitätsmanagement	Aufeinander abgestimmte Tätigkeiten zum Führen und Steuern einer Organisation.	<ul style="list-style-type: none"> Koordination der Aufgaben von Qualitätsplanung, -steuerung, -sicherung und -verbesserung.
Qualitätsplanung	Festlegung von Qualitätszielen sowie von Ausführungsprozessen und Ressourcen zum Erreichen der Qualitätsziele.	<ul style="list-style-type: none"> Ermittlung der Beteiligten und ihrer Anforderungen Definition von Gütemaßen für die Beurteilung der Modellqualität und Arbeitsschritte, um die vorgeschriebene Qualität zu erreichen, inkl. der zeitlichen und personellen Zuordnung der Arbeitsschritte.
Qualitätssteuerung	Teil des Qualitätsmanagements, der auf die Erfüllung von Qualitätsanforderungen gerichtet ist.	<ul style="list-style-type: none"> Durchführung der Arbeitsschritte im Kalibrierungsprozess.
Qualitäts-sicherung	Erzeugen von Vertrauen, dass die Qualitätsanforderungen erfüllt werden.	<ul style="list-style-type: none"> Prüfen und dokumentieren der Modellergebnisse im Validierungsprozess.
Qualitätsverbesserung	Erhöhung der Eignung zur Erfüllung der Qualitätsanforderungen.	<ul style="list-style-type: none"> Erneute Kalibrierungsschleife, um die Qualität zu erhöhen.

Tabelle 15: Begriffe der DIN EN ISO 9000:2015 (2015) bezogen auf den Begriff Qualitätsmanagement.

4.2 Allgemeine Anforderungen an Verkehrsnachfragemodelle

Die Qualitätsanforderungen, die an ein Verkehrsnachfragemodell gestellt werden, können sehr spezifisch sein, z.B. dass ein bestimmtes Gütemaß eingehalten werden soll. Es gibt aber auch diverse allgemeingültige Qualitätsanforderungen an Verkehrsnachfragemodelle. Unter Einbeziehung von Vorarbeiten (z.B. KÖHLER ET AL. (2001, S. 46 ff.) oder HERKT ET AL. (2008, S. 15 ff.)) und von Diskussionen im FGSV-Arbeitskreis 1.2.6. „Konzeption und Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen des Personenverkehrs“ werden im Forschungsprojekt „Anforderungen an städtische Verkehrsnachfragemodelle“ (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 172 ff.)) folgende Anforderungen herausgearbeitet:

- Wirklichkeitstreue,
- Transparenz und
- Operabilität.

Damit ein Verkehrsnachfragemodell nach FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 172 ff.) wirklichkeitstreu ist, müssen sowohl die Modelleingangsdaten, die Modellergebnisse als auch das Modellverhalten mit der Datenerhebung bzw. den Erwartungen an das Modell übereinstimmen:

- Die Modelleingangsdaten müssen auf systematische und unsystematische Fehler geprüft werden. Kapitel 4.3.2 erläutert dies im Detail.

- Die Modellergebnisse müssen mit Kontrolldaten überprüft werden. Kontrolldaten sind hierbei personenbezogene Daten zum Mobilitätsverhalten aus Befragungen (Häufigkeiten von Ortsveränderungen, Reiseweiten und Reisezeiten differenziert nach Modus), Verkehrsstärken an Zählstellen und Fahrtzeiten zwischen ausgewählten Punkten im Netz. Diese Überprüfung bezieht sich meist auf den Analysefall des Modells, da nur für diesen Zustand Kontrolldaten vorliegen. Eine aufwendigere Prüfmethode ist das sogenannte „Backcasting“ (Rückwärtsprognose), bei dem ein in der Vergangenheit liegender Zustand reproduziert wird. Weitere Informationen zur Überprüfung der Modellergebnisse finden sich in Kapitel 4.3.5.
- Die Prüfung des Modellverhaltens soll sicherstellen, dass das Modell maßnahmenempfindlich ist und damit die modellierten Maßnahmen und Entwicklungen gut abbilden kann. Hierfür werden Sensitivitäts-, Realitäts- und Konsistenztests verwendet (siehe Kapitel 4.3.5).

Damit ein Verkehrsnachfragemodell nach FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 172 ff.) transparent ist, muss es von unabhängigen Dritten kontrolliert werden können. Dazu müssen die Punkte der folgenden Auflistung so erläutert oder zur Verfügung gestellt werden, dass das Modell nachvollziehbar und reproduzierbar ist:

- Modellannahmen,
- Modellaufbau,
- technische Umsetzung (inkl. der verwendeten Software),
- Berechnungsalgorithmen,
- wesentliche Modelleingangsdaten, -parameter und -ergebnisse und
- Validierungsvorgehen, -ergebnisse und Aussagegenauigkeit des Modells.

Damit ein Verkehrsnachfragemodell nach FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 172 ff.) operabel ist, muss es für den vorhergesehenen Einsatzbereich anwendbar sein. Dafür muss es die zu untersuchenden Entwicklungen und Maßnahmen mit vertretbarem Aufwand (z.B. mit praktikabler Rechenzeit ohne zu große Genauigkeitseinbußen) abbilden können. Zudem muss es reproduzierbare Ergebnisse liefern und mit geringem Aufwand aktualisierbar sein. Um anwendungsbedingte Fehler zu reduzieren, sollten Bearbeitungs-, Berechnungs- und Auswertungsschritte möglichst automatisiert und in jedem Fall dokumentiert werden.

Die genannten allgemeingültigen Anforderungen müssen immer erfüllt sein. Um sie und die weiteren spezifischen Qualitätsanforderungen zu befriedigen, bedarf es eines Qualitätsmanagementprozesses, der im nächsten Kapitel erläutert wird.

4.3 Qualitätsmanagementprozess

Die folgende Beschreibung des Qualitätsmanagementprozesses bei der Erstellung von Verkehrsnachfragemodellen basiert auf PESTEL ET AL. (2016, S. 664 ff.) bzw. dessen Fortschreibung in FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 201 ff.)⁴⁷.

Um eine angemessene Güte eines Verkehrsnachfragemodells zu gewährleisten, ist ein möglichst standardisiertes Qualitätsmanagement erforderlich. Dieses Qualitätsmanagement bei der Nachfragemodellierung ist kein einmaliger Verfahrensschritt, sondern ein Prozess, der in alle Stufen der Modellerstellung eingebunden werden sollte. Abbildung 20 gibt einen Überblick über den Qualitätsmanagementprozess beim Aufbau eines Verkehrsnachfragemodells, dessen Arbeitsschritte in den folgenden Abschnitten beschrieben werden. Dabei werden folgende Begriffe verwendet:

- **Verifizierung:** Vorgang, bei dem eine unabhängige Person überprüft, ob zwischen Modellbesteller und Modellersteller vereinbarte Vorgaben tatsächlich umgesetzt werden.
- **Überprüfung:** Allgemeiner Begriff für die Kontrolle von Eingangs- und Ergebnisdaten.
- **Parametereinstellung:** Festlegung der Modellparameter durch eine Schätzung oder eine Setzung.
- **Kalibrierung:** Anpassen der Modellparameter, sodass die mit dem Modell berechneten Werte möglichst gut mit der beobachteten Realität übereinstimmen und das Modellverhalten die Erwartungen erfüllt.
- **Validierung:** Überprüfung der Modellparameter, der Modellergebnisse und des Modellverhaltens mit geeigneten Gütemaßen und Tests.
- **Dokumentation:** Schriftliche Beschreibung aller Arbeitsschritte des Qualitätsmanagements, sodass eine Person, die nicht am Prozess beteiligt war, diesen trotzdem nachvollziehen kann. Dies beinhaltet auch die Beschreibung von Formalien und Validierungsergebnissen.

⁴⁷ In den genannten Veröffentlichungen wird der Qualitätsmanagementprozess als Qualitätssicherungsprozess bezeichnet. Die Bezeichnung Qualitätssicherung, die immer noch häufig synonym mit Qualitätsmanagement verwendet wird, wurde bereits durch Ablösung der DIN EN ISO 8402 (1995) mit der DIN EN ISO 9000 (2000) durch die Bezeichnung Qualitätsmanagement ersetzt. Qualitätssicherung bezeichnet nunmehr einen Arbeitsschritt innerhalb des Qualitätsmanagements (siehe Kapitel 4.1).

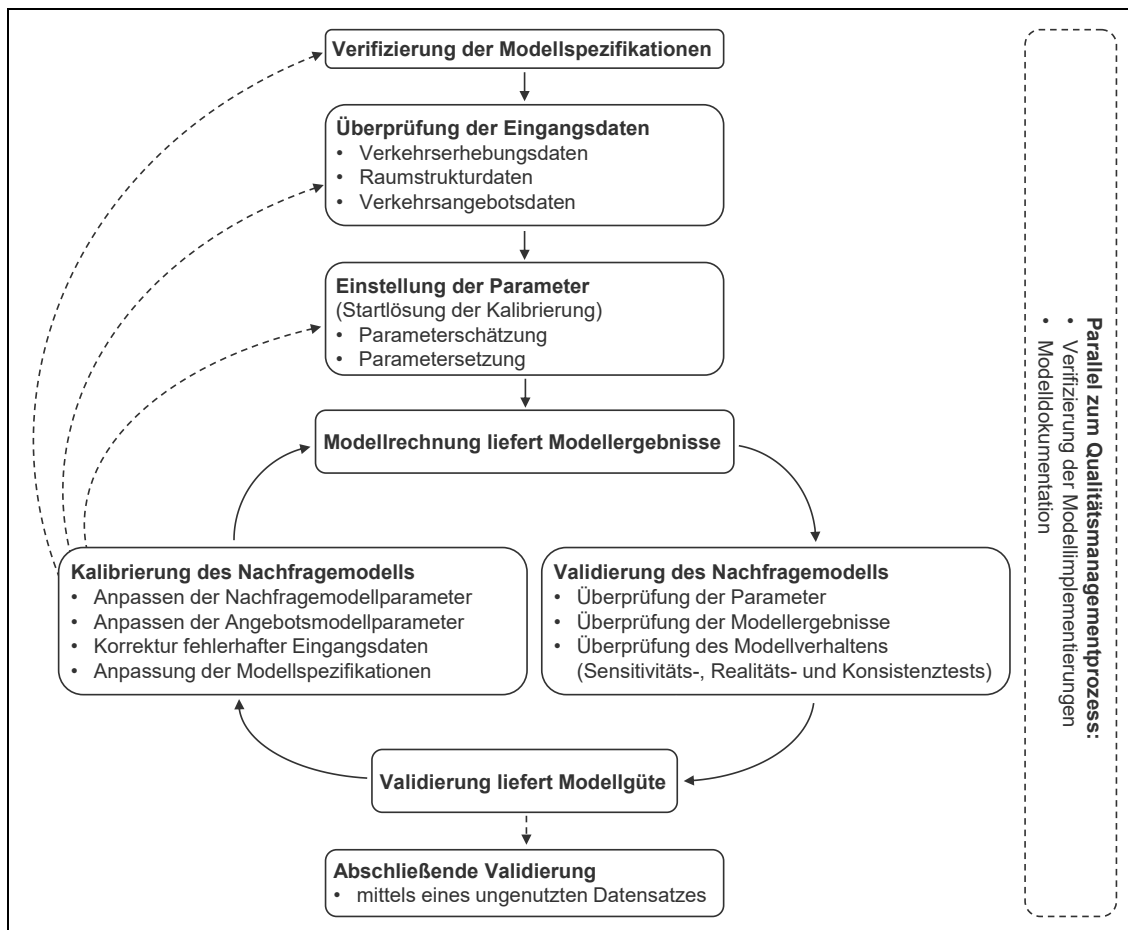


Abbildung 20: Qualitätsmanagementprozess beim Aufbau eines Verkehrsnachfragemodells (Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an PESTEL ET AL. (2016, S. 659) und FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 172)).

4.3.1 Verifizierung der Spezifikation und der Implementierung

Nach DIN EN ISO 9000:2015 (2015, S. 49) beschreibt Verifizierung die „Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass festgelegte Anforderungen erfüllt worden sind.“ Bezogen auf die Verkehrsnachfragemodellierung wird nach PESTEL ET AL. (2016, S. 664) in zwei Arten der Verifizierung unterschieden:

- Bei der **Verifizierung der Modellspezifikationen** prüft eine unabhängige dritte Partei, ob die in der Modellspezifikation (siehe Kapitel 3.3.1.1) beschriebene Vorgehensweise angemessen ist, um die definierten Anforderungen zu erfüllen. Dies entspricht der Verifizierungsdefinition von VDI 4003 (2007, S. 8).

Bezogen auf die Modellunsicherheiten, die in Kapitel 3 beschrieben werden, sollte bereits in der Spezifikation festgelegt werden, wie damit zu verfahren ist. Dies gilt insbesondere auch für die Prognoseannahmen bzw. die betrachteten Szenarien, die idealerweise interdisziplinär abgestimmt sind.

- Die **Verifizierung der Modellimplementierung** prüft, inwieweit die in der Modellspezifikation beschriebenen Daten und Methoden tatsächlich umgesetzt werden. Dazu installiert die prüfende Partei das Verkehrsnachfragemodell auf einem unabhängigen Rechner und führt eigene, anwendungsbezogene Testrechnungen durch, die sich an Realitätstests (siehe Kapitel 3.4.2.3) orientieren. Die Verifizierung der Modellimplementierung findet parallel zum gesamten Modellerstellungsprozess statt.

4.3.2 Überprüfung der Eingangsdaten

Die Qualität eines Verkehrsnachfragemodells wird maßgeblich von der Qualität der Eingangsdaten bestimmt. Wesentliche Eingangsdaten sind Verkehrserhebungsdaten, Siedlungsstrukturdaten und Verkehrsangebotsdaten. Diese Daten sollten beim Aufbau des Verkehrsnachfragemodells und vor der Kalibrierung der Modellparameter auf ihre Qualität hin untersucht werden. Die Eingangsdaten müssen in sich konsistent sein, d.h. die Verkehrsstärkedaten müssen zu den Mobilitätsverhaltensdaten und den Siedlungsstrukturdaten passen. Sie müssen sich deshalb auf den gleichen Zeitraum beziehen (z.B. gibt es im Sommer mehr Radverkehr als im Winter, Netzänderungen beeinflussen die Routenwahl). Zusätzlich müssen besondere Rahmenbedingungen (z.B. Baustellen zum Erhebungszeitpunkt) berücksichtigt werden.

Generell gilt, dass die Daten für den Modellaufbau und die Modellvalidierung verfügbar sein müssen. Gerade Daten von privatwirtschaftlichen Akteuren werden häufig unter Verschluss gehalten (FLYVBJERG ET AL. (2006, S. 6)). Dies führt unter Umständen dazu, dass Abschätzungen getroffen werden müssen, die weitere Unsicherheiten in das Modell einbringen.

4.3.2.1 Verkehrserhebungsdaten

Verkehrserhebungsdaten umfassen personenbezogene Daten zum Mobilitätsverhalten aus Befragungen und netzbezogene Daten zu Verkehrsstärken an Zählstellen und Fahrtzeiten zwischen ausgewählten Punkten im Netz. Erhebungsdaten stellen den Bezug zur wirklichen Welt her. Sie sind jedoch immer nur eine Beobachtung der Realität und können aufgrund der Stichprobengröße oder aufgrund von Erhebungsfehlern von dieser abweichen. Besonders die Mobilitätsverhaltensdaten müssen daher unbedingt gewichtet vorliegen, um ausgehend von der Stichprobe repräsentative Schlüsse auf die Grundgesamtheit ziehen zu können.

Mobilitätsverhaltensdaten beinhalten unter anderem die Kenngrößen Mobilitätsrate, Reiseweite und Reisezeit, differenziert nach Wegezweck und Modus. Sie sollten auf folgende Weise überprüft werden:

- Einzelwertprüfungen mit erwarteten Werten aus anderen Verkehrsbefragungen (z.B. Mobilität in Deutschland MiD (NOBIS & KUHNIMHOF (2018) oder Mobilität in Städten (SRV (2019)) und
- Angabe der Konfidenzintervalle für die Mobilitätskenngrößen bei einem Konfidenzniveau von 95 %.

Die Daten sollten für die spätere Validierung so aufbereitet und hochgerechnet werden, dass die Mobilitätskenngrößen für alle Wege und für die Teilmenge der Wege im Untersuchungsraum bekannt sind.

Für jede Zählstelle sollten folgende Informationen benannt werden:

- Erhebungsjahr,
- Zahl der Erhebungstage (Dauerzählstelle, mehrtägige Erhebung, Tageszählung),
- Erhebungszeitraum (ganzer Tag, Teil eines Tages mit Hochrechnung) und
- erfasste Fahrzeugklassen nach den technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (BMVBS (2012, S. 151 ff.)).

Jeder Zählwert sollte mit einem Gütemaß bewertet werden. Dabei gilt, dass Zählraten aus einer Dauerzählstelle eine höhere Aussagekraft als Einmalzählungen haben und dass neuere Daten eine höhere Aussagekraft als ältere Daten haben. Zählraten sollten nicht älter als drei Jahre sein. Für Dauerzählstellen sollte das Konfidenzintervall der Verkehrsstärke für ein Konfidenzniveau von 95 % bestimmt werden.

4.3.2.2 Siedlungsstrukturdaten

Siedlungsstrukturdaten umfassen die Siedlungsflächen, die Einwohnerdaten, differenziert nach Altersklassen, und die Standortdaten von Aktivitätenorten mit zugehörigen Eigenschaften (Arbeitsstandorte / Arbeitsplätze, Schulstandorte / Schulplätze, Einkaufsstandorte / Größenklasse). Siedlungsstrukturdaten werden auf Verkehrszellen bezogen, die als Quellen und Ziele von Ortsveränderungen die Standorte der jeweiligen Siedlungsstruktur, das Verkehrsangebot und die Verkehrsnachfrage miteinander verknüpfen.

Folgende Kenngrößen der Siedlungsstrukturdaten sollten ausgewiesen und überprüft werden:

- Siedlungsdichte (Einwohner bezogen auf die Siedlungsfläche) auf Verkehrszellenebene,
- Arbeitsplatzdichte (Arbeitsplätze bezogen auf die Siedlungsfläche) auf Verkehrszellenebene,
- Verhältnis der Arbeitsplätze pro Einwohner und der Erwerbstätigen pro Arbeitsplatz auf Gemeindeebene,

- Verhältnis der Schüler pro Schulplätze auf Gemeindeebene und
- Vergleich der aggregierten Siedlungsstrukturdaten (Einwohner, Beschäftigte am Arbeitsplatz) auf Gemeindeebene mit Daten der statistischen Ämter.

Liegen Standortdaten als Einzelpunkte (Points-of-Interest, POI) vor, sollte die Qualität der Daten stichprobenhaft überprüft werden. Außerdem ist eine visuelle Prüfung mit Hilfe von Dichtekarten empfehlenswert.

4.3.2.3 Verkehrsangebotsdaten

Verkehrsangebotsdaten beinhalten sämtliche Daten zur Infrastruktur des Modells (Strecken, Knoten, Haltestellen, etc.) und alle Daten, die für den Betrieb der Infrastruktur notwendig sind (Fahrpläne, Preissysteme, etc.). Verkehrsangebotsdaten lassen sich auf der Ebene der einzelnen Netzelemente und auf der Relationsebene überprüfen.

Auch wenn Verkehrsangebotsdaten mittlerweile hauptsächlich digital vorliegen, sollten auf der Netzelementebene unbedingt die Netztopologie und die Netzattribute überprüft werden. Häufige Fehlerquellen in diesem Zusammenhang sind:

- die Abbildung und korrekte Attribuierung aller relevanten Strecken. Hierzu sollten geprüft werden:
 - Vergleiche der Netzlängen je Straßenklasse mit Werten aus der amtlichen Statistik und
 - Vergleiche der mittleren Geschwindigkeiten je Straßenklasse und Ortslage mit Erwartungswerten oder Messergebnissen.
- die Abbildung und korrekte Attribuierung aller relevanten Knoten und Haltestellen. Hierzu sollten geprüft werden:
 - die Anzahl der Arme pro Knotenpunkt (z.B. maximal fünf Zufahrten pro Knotenpunkt),
 - die Luftlinienentfernungen zwischen Haltestellen und ihrem jeweiligen Zugangsknoten und
 - die Anzahl der Haltestellen je Verkehrszelle (z.B. maximal ein Schienenhaltepunkt je Verkehrszelle).

Sobald das Netzmodell erstellt ist, können Kenngrößenmatrizen berechnet und Testumlegungen durchgeführt werden. Dabei sollten folgende Werte überprüft werden:

- Vergleich der Kenngrößen (Reisezeiten, ggf. Fahrpreise) und der Fahrtrouten für ausgewählte Relationen mit Daten aus unabhängigen Quellen, z.B. einem Routenplanungsprogramm oder Floating Car Data. FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 186 f.) stellen für die Fahrzeit zwischen zwei Punkten im Netz ein Gütekriterium vor.
- Berechnung und Überprüfung relationsbezogener Kenngrößen:

- Ist das Netz zusammenhängend und routingfähig, d.h. kann für jede Relation die Reisezeit berechnet werden? Dies kann mit der Umlegung einer Dummy-Matrix getestet werden, die z.B. auf jeder Relation den Wert 1 hat. Anschließend sollten unbelastete oder sehr stark belastete Strecken auf Fehler untersucht werden.
- Hinsichtlich der Luftliniengeschwindigkeit sollten Ausreißerwerte, die nach den Richtlinien für integrierte Netzgestaltung (RIN, FGSV (2008)) eine sehr gute Angebotsqualität ($SAQ = A$) oder eine unzureichende Angebotsqualität ($SAQ = F$) aufweisen, überprüft werden.
- Wege mit einem Umwegfaktor größer 1,5 sollten genauer untersucht werden.
- Hinsichtlich des Reisezeitverhältnisses zwischen ÖV und Pkw sollten Werte, die außerhalb von 0,5 (ÖV ist doppelt so schnell wie Pkw) bis 5 liegen (ÖV ist fünfmal langsamer als der Pkw), überprüft werden.
- Das Reisezeitverhältnis zwischen Hin- und Gegenrichtung sollte in der Normalverkehrszeit für beide Richtungen ähnliche Werte aufweisen.
- Ist der Anteil der Wartezeiten an Knotenpunkten bezogen auf die gesamte Fahrtzeit plausibel?
- Ist der Anteil der Umsteigezeiten an Haltestellen bezogen auf die gesamte Reisezeit plausibel?
- Ist der Anteil der Anbindungszeiten (Zu- und Abgang) an der gesamten Reisezeit plausibel?
- Die Netzbelastungen sollten bei einer Bestwegumlegung in beiden Richtungen ähnlich sein.
- Die Netzbelastungen in einem unabhängigen Netzmodell (z.B. OpenStreetMap) sollten im Hauptstraßennetz ähnlich sein.

4.3.3 Einstellen der Parameter

Ausgangspunkt für den Prozess der Kalibrierung und Validierung ist eine Startlösung, bei der alle Modellparameter mit geschätzten oder gesetzten Parametern belegt werden.

- **Parameterschätzung:**

Bei der Parameterschätzung werden die Parameter entweder mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens bestimmt oder iterativ solange verändert, bis die Abweichungen zwischen den aus dem Modell errechneten Werten und den gemessenen Werten minimal sind. Für die Parameterschätzung von Entscheidungsmodellen der Modus- oder Routenwahl eignet sich die sogenannte Maximum-Likelihood-Methode. Die Methode nutzt beobachtete Wahlentscheidungen von Verkehrsteilnehmenden und die zugehörigen Eigenschaften der Menge an Alternativen. Wichtige Eigenschaften einer Alternative sind die Kenngrößen der Angebotsqualität: Zu- und Abgangszeit, Wartezeit, Fahrtzeit im Verkehrsmittel, Kosten und Umsteigehäufigkeit. Diese Kenngrößen sollten nicht aus den Angaben der Probanden abgeleitet, sondern für alle Probanden und

alle Alternativen mit dem Verkehrsnachfragemodell ermittelt werden. Grundlage für die Kenngrößen sollten dabei nicht die Verkehrszellen sein, in denen die Probanden ihre Aktivitäten durchführen, sondern die genauen geocodierten Aktivitätenorte. Nur so kann der Einfluss der Zu- und Abgangszeit – diese Werte können für verschiedene Orte innerhalb einer Verkehrszelle deutlich variieren – bei der Parameterschätzung berücksichtigt werden. Die Güte einer Maximum-Likelihood-Schätzung sollte mittels des Likelihood-Ratio-Test und des rho-square-Test (siehe z.B. HUELSENBECK & CRANDALL (1997, S. 450 ff.)) dokumentiert werden.

- **Parametersetzung:**

Parameter, die nicht empirisch erhoben werden können, müssen durch den Modell-erstellenden festgesetzt werden. Sinnvolle Wertebereiche der Parameter finden sich in der Literatur z.B. im Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual (CAMBRIDGE SYSTEMATICS INC. (2014)), in FSUTMS-Cube Framework Phase I und II (CAMBRIDGE SYSTEMATICS INC. (2006), CAMBRIDGE SYSTEMATICS INC. (2008)), in diversen Studien zu Zeitkosten (z.B. WEIS ET AL. (2016) und AXHAUSEN ET AL. (2014)) oder in der Dokumentation des Nationalen Personenverkehrsmodell des UVEK (ARE & UVEK (2014)). Alternativ können sie auch anderen Modellen entnommen werden, sofern diese geeignet erscheinen.

Im Mittelpunkt einer Modellerstellung steht der Kalibrierungs- und Validierungszyklus, der in mehreren Durchläufen die Modellparameter setzt und ihre Wirkungen auf die Modellergebnisse prüft. Die beiden Bestandteile Kalibrierung und Validierung werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

4.3.4 Kalibrierung

Kalibrierung beschreibt nach DIN 1319-1 (1995, S. 22) das „Ermitteln des Zusammenhangs zwischen Meßwert [sic] oder Erwartungswert der Ausgangsgröße und dem zugehörigen wahren oder richtigen Wert der als Eingangsgröße vorliegenden Meßgröße [sic] [...]“.

Im Kontext der Verkehrsnachfragemodellierung wird diese Definition der Kalibrierung noch um das Einstellen der Modellparameter erweitert, sodass die mit dem Modell berechneten Werte möglichst gut mit der beobachteten Realität übereinstimmen und das Modellverhalten die Erwartungen erfüllt. Dies bezieht sich nicht nur auf die Parameter des Nachfragemodells, z.B. Parameter der Nutzenfunktionen oder Produktions- bzw. Attraktionsraten, sondern auch auf die Parameter des Verkehrsangebots wie Anbindungen, CR-Funktionen oder Abbiegewiderstände am Knotenpunkt.

Der Prozess der Kalibrierung (und der Validierung) nimmt im Verkehrsnachfragemodellierungsprozess einen großen Teil der zeitlichen Ressourcen in Anspruch. Neben der Parametereinstellung können auch bisher unentdeckte Fehler in den Eingangsdaten zu-

tage treten, die zu beheben sind. Ebenso kann sich herausstellen, dass die Modellspezifikation an der ein oder anderen Stelle ungeeignet oder mangelhaft ist. Solche Fälle müssen mit dem Auftraggeber und ggf. einem externen Qualitätssicherer erörtert werden. Gegebenenfalls muss die Spezifikation nachträglich angepasst werden.

4.3.5 Validierung

Validierung beschreibt nach DIN EN ISO 9000:2015 (2015, S. 50) die „Bestätigung durch Bereitstellung eines objektiven Nachweises, dass die Anforderungen für einen spezifischen beabsichtigten Gebrauch oder eine spezifische beabsichtigte Anwendung erfüllt worden sind.“ Im Kontext der Verkehrsnachfragemodellierung umfasst dies die Überprüfung der Modellparameter, der Modellergebnisse und des Modellverhaltens mit geeigneten Gütemaßen und Tests.

4.3.5.1 Überprüfung der Parameter

Die Ergebnisse einer Parameterschätzung für Entscheidungsmodelle sind Parameterwerte für die in einer Nutzenfunktion verwendeten Kenngrößen. Diese Parameter geben die Bedeutung der jeweiligen Kenngröße für die Wahlentscheidung an. Diese Werte sollten auf folgende Weise geprüft werden:

- Vorzeichen der Parameter:
Die Parameterwerte zur Bewertung von Widerständen sollten in einer Nutzenfunktion ein negatives Vorzeichen haben.
- Verhältnis der Parameter:
Die Parameterwerte für die Gehzeit, das Umsteigen oder die Kosten werden in Bezug zum Parameterwert der Fahrtzeit gesetzt. Die resultierenden Verhältniswerte geben den Value of Time für eine Zeiteinheit Gehzeit, einen Umsteigevorgang oder eine Geldeinheit an (siehe diverse Studien zu Zeitkosten wie WEIS ET AL. (2016) und AXHAUSEN ET AL. (2014)). Diese Vorgehensweise kann jedoch nur für Modelle mit linearen Nutzenfunktionen gewählt werden.
- Wertebereich der Parameter:
Die Parameterwerte können mit Werten aus der Literatur und mit Werten aus anderen Modellen verglichen werden. Es muss hierbei jedoch berücksichtigt werden, dass der Wert eines Parameters von der Modellarchitektur, der verwendeten Bewertungsfunktion (Exponentialfunktion, Potenzfunktion, Halbglockenfunktion) und der Gesamtanzahl der Parameter in der Nutzenfunktion abhängt.
Zum Teil werden in den internationalen Modellierungsrichtlinien auch konkrete Wertebereiche vorgegeben. Beispielsweise gibt WebTAG (UK DfT (2017, S. 41)) Wer-

tebereiche für Zielwahlparameter unterschiedlicher Wegezwecke vor, mit der Maßgabe, dass die kalibrierten Parameter maximal $\pm 25\%$ vom (gegebenen) Median abweichen dürfen.

Die Wichtigkeit dieser Validierungsstufe wird z.B. von MANZO ET AL. (2014, S. 139) aufgezeigt, indem sie das Fehlerpotenzial der CR-Funktionsparameter untersuchen. Sie kommen unter anderem zu dem Ergebnis, dass besonders in nicht ausgelasteten Netzen eine hohe Unsicherheit besteht und empfehlen daher für alle Modellanwendungen eine Unsicherheitsanalyse der CR-Funktionsparameter.

4.3.5.2 Überprüfung der Modellergebnisse

Die Modellergebnisse sind anhand geeigneter Gütemaße (siehe Kapitel 3.4.2.1) zu prüfen. FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 207 f.) geben Empfehlung zur Prüfung des Verkehrsaufkommens, der Verkehrsleistung, des Verkehrszeitaufwandes, der Verkehrsstärken, der Fahrtzeiten und von Matrixkorrekturen in verschiedenen inhaltlichen und räumlichen Differenzierungen unter Angabe eines Kontrolldatensatzes und eines geeigneten Gütemaßes (siehe Tabelle 18 in Anhang 3 (S. LIX)). FRIEDRICH ET AL. (2019b) leiten ihre Qualitätsempfehlungen vom Gütemaß *SQV* mit entsprechend konfigurierten Skalierungsfaktoren *f* ab (siehe Kapitel 3.4.2.1). Somit werden nicht für jede Kenngröße und jede Kenngrößenausprägung zulässige Abweichungen definiert, wie es in anderen internationalen Modellierungsrichtlinien üblich ist, z.B. WebTAG (UK, UK DfT (2014)), Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual (USA, CAMBRIDGE SYSTEMATICS INC. (2014)) oder Traffic Modelling Guidelines (Australien, ROADS AND MARITIME SERVICES (2013)).

Die Gütemaße, die für die Modellkalibrierung und -validierung herangezogen werden, und deren Gütegrenzen sind immer mit dem Auftraggeber des Modells abzustimmen. Dies gilt auch in Hinblick auf die Einsatzbereiche des Modells: für Modelle, die vielfältige Einsatzbereiche haben (z.B. Bebauungspläne, Bemessungen von Verkehrsanlagen, Emissions- und Lärmberechnungen etc.), sind geeignete Gütegrenzen, die allen Einsatzbereichsanforderungen gerecht werden, anzusetzen.

Hinsichtlich des Mobilitätsverhaltens der Modellstufen Verkehrserzeugung, Zielwahl und Moduswahl werden die Wegeanzahl, mittlere Reiseweiten und -zeiten sowie Reiseweiten- und Reisezeitverteilung auf verschiedenen Aggregationsebenen geprüft. Die Wege der Einwohner sollten einmal gesamt und zusätzlich differenziert nach Nachfragegruppen, z.B. Personengruppen oder Wegezwecken, untersucht werden. Die räumliche Differenzierung sollte für den gesamten Untersuchungsraum und ggf. auch für relevante Teilräume (Planungsraum, Stadt, Umland) stattfinden, wobei darauf zu achten ist, dass die notwendigen Befragungsdaten für alle relevanten Teilräume in ausreichender Stichprobengröße verfügbar sind. Relevant für die Validierung sind die Wege der Einwohner des Erhebungsraums, die Quelle und Ziel im Untersuchungsraum haben. Sollten keine

Befragungsdaten speziell für den Untersuchungsraum vorliegen, können Daten für vergleichbare Raumtypen mit ähnlicher Verkehrsangebotsstruktur aus anderen Erhebungen genutzt werden (z.B. Mobilität in Deutschland MiD (NOBIS & KUHNIMHOF (2018)) oder Mobilität in Städten (SRV (2019))).

Für den Vergleich von Fahrtzeiten empfehlen FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 206) den Vergleich von berechneten Quelle-Ziel-Reisezeiten und gemessenen Fahrtzeiten für ausgewählte Relationen. Hierbei muss jedoch beachtet werden, welche Tageszeit bzw. Zeitscheibe mit dem Modell abgebildet werden soll.

FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 206) empfehlen zudem die Prüfung von im Modell umgelegten Verkehrsstärken (für IV und ÖV) mit gezählten Verkehrsstärken an ausgewählten Zählstellen, in ÖV-Fahrzeugen (einer Linie zwischen zwei Haltestellen) oder an Screenlines⁴⁸. Speziell für den ÖV können auch Ein-, Aus- und Umsteiger an Haltestellen mit entsprechenden Erhebungen verglichen werden.

Wird ein Matrixkorrekturverfahren durchgeführt, ist auszuweisen, wie groß dessen Einfluss ist. Hierbei sollte vor allem die Abweichung der Matrizen (z.B. mit dem Gütemaß $\%MAE$) und die Ähnlichkeit der Matrizen (z.B. mit dem Gütemaß $mwSQV$) angegeben werden. FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 206 f.) empfehlen dies für Nachfrage-, Verkehrsleistungs- und Verkehrszeitaufwandsmatrizen, in der gleichen räumlichen Differenzierung wie die Validierung des Mobilitätsverhaltens und getrennt für positive und für negative Korrekturen. Zur besseren Anschaulichkeit, wo die Matrixkorrektur wirkt, empfiehlt sich zudem ein Differenzplot der umgelegten unkorrigierten und korrigierten Nachfragematrizen (inkl. Umlegungsstatistik, z.B. mit dem Gütemaß SQV).

4.3.5.3 Überprüfung des Modellverhaltens

Das Modellverhalten kann mit Sensitivitäts- und Realitätstests (siehe Kapitel 3.4.2.3) sowie mit Konsistenztests⁴⁹ bestimmt werden. Für ein standardisiertes Qualitätsmanagement empfehlen FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 209 ff.) die in Tabelle 16 dargestellten Tests. Zum Teil werden Prüfungen des Modellverhaltens auch direkt in standardisierten Berechnungsverfahren wie der „Standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im schienengebundenen ÖPNV“ (INTRAPLAN (2016)) vorgeschrieben. Unter anderem sollen dort „die Entwicklung der Strukturdaten, die Realisierung bestimmter für den Ohnefall unterstellter (oder nicht unterstellter) Maßnahmen im ÖPNV bzw. im MIV oder die Fahrzeugeinsatzkonzepte oder die Anschaffungskosten der eingesetzten Fahrzeuge“ untersucht werden (INTRAPLAN (2016, S. 118 f.)).

⁴⁸ „Eine Screenline umfasst eine Menge von Strecken, die durch einen Polygonzug definiert werden. Alle Strecken, die durch den Polygonzug geschnitten werden, gehören zur Screenline, z.B. alle Brücken über einen Fluss. Die Verkehrsstärken aller Strecken einer Screenline werden zu einer Screenline-Verkehrsstärke aufsummiert.“ (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 207))

⁴⁹ „Mit Konsistenztests wird geprüft, ob das Modell Anforderungen erfüllt, die sich aus der Logik von Ortsveränderungen ergeben.“ (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 210))

Hinsichtlich des Modellverhaltens spielt auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse eine Rolle. Reproduzierbarkeit bedeutet, dass zwei Modellläufe mit der gleichen Softwareversion identische Ergebnisse liefern müssen. FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 211) zählen diverse Gründe auf, warum hierbei dennoch Unterschiede auftreten können, z.B. eine fehlende Initialisierung des Modells oder unterschiedliche Betriebssystemversionen.

Sensitivitätstests	<ul style="list-style-type: none"> • systematische Variation der empirisch nicht abgesicherten Nutzenfunktionsparameter, • systematische Variation der Abbruchbedingungen für die Gleichgewichtsumlegung, • systematische Variation der Abbruchbedingungen für die Rückkopplung zwischen den Modellstufen.
Realitätstests	<ul style="list-style-type: none"> • systematische Variation der Einwohnerzahl, • systematische Variation der Bedienungshäufigkeit im ÖV, • systematische Variation der relevanten Kosten, z.B. Kraftstoffkosten, Parkkosten, Mautkosten oder ÖV-Ticketkosten, • Variation der Kapazität ausgewählter Netzelemente.
Konsistenztests	<ul style="list-style-type: none"> • Bilanzierung der Ortsveränderungen einer Verkehrszelle nach einem Tag, • Prüfung der Auslastung von Aktivitätenorten (Bilanzierung der Nachfrage mit den Siedlungsstrukturdaten), • Prüfung der Proportionalität der Routenbelastungen nach BOYCE ET AL. (2010), • Prüfung einer vorgelagerten Zielwahl der Pflichtaktivitäten (mindestens) bei aktivitätsbasierten Wegekettenmodellen (siehe SIMON ET AL. (2020)).

Tabelle 16: Tests zur Überprüfung des Modellverhaltens nach FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 209 ff.).

4.3.5.4 Abschließende Validierung der Modellergebnisse

Nach dem Abschluss des Kalibrierungs- und Validierungsprozesses liegt ein geprüftes Modell vor. Das bedeutet unter anderem, dass die Modellparameter, die für den Analysezeitpunkt kalibriert werden, nach Stand der Technik (siehe z.B. UK DfT (2018b, S. 6)) bzw. Stand der Forschung (FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 162)) für den Prognosezeitpunkt nicht mehr verändert werden.

Häufig wird eine weitere Validierung mit einem neuen, bisher unbenutzten Datensatz⁵⁰ gefordert. Für die Überprüfung mikroskopischer Verkehrsflussmodelle (siehe z.B. FGSV (2006)) lässt sich ein solcher unbenutzter Datensatz für einen weiteren Kontrollzustand relativ leicht erzeugen, z.B. durch Reisezeitmessungen zu einer anderen Tageszeit. Bei

⁵⁰ Als Validierungskenngröße wäre hierfür nur die Verkehrsstärke praktikabel, da andere Mobilitätskenngrößen des Verkehrsaufkommens, der Verkehrsleistung oder des Verkehrszeitaufwandes, aufgrund der notwendigen zusätzlichen Haushaltsbefragung, wohl nie in einem zweiten Datensatz vorliegen werden.

Darüber hinaus gibt es teilweise auch die Forderung nach einem „unabhängigen“ Datensatz. Im Rahmen der Verkehrsnachfragemodellierung ist diese Forderung nicht zu erfüllen, da benachbarte Zählstellen im Streckennetz immer voneinander abhängig sind. Eine mögliche Aufteilung in unabhängige Teiluntersuchungsräume ist häufig nicht sinnvoll.

makroskopischen Modellen, die meist eine mittlere Verkehrsnachfrage an einem Werktag außerhalb der Ferien abbilden, ist es jedoch schwer, einen weiteren, unbenutzten Datensatz zu erzeugen. Im einfachsten Fall können Verkehrsstärken anderer Zählstellen herangezogen werden. Dieses Teilen eines Datensatzes (engl.: data splitting) bringt laut CHATFIELD (1995, S. 434 f.) folgende Probleme mit sich:

- Es muss geklärt werden, wie der Datensatz geteilt wird.
- Das Schätzen mit einem Teildatensatz ist nicht effizient.
- Die Unsicherheit der Schätzung steigt, aber die Gefahr eines systematischen Fehlers bleibt.

Eine andere, aufwändigere Vorgehensweise besteht im sogenannten „Backcasting“ (Rückwärtsprognose), bei dem die Modellvariablen in einen definierten Zustand der Vergangenheit gesetzt werden und die Modellergebnisse mit Verkehrsstärken oder Mobilitätskenngrößen zugehöriger Verkehrserhebungen verglichen werden.

Für makroskopische Verkehrsnachfragemodelle gilt daher, dass die Durchführung einer abschließenden Validierung sicher wünschenswert ist, es stellt sich dann aber auch unweigerlich die Frage nach der Konsequenz, wenn der abschließende Validierungstest negativ ausfällt. Ein erneutes Kalibrieren unter Einbeziehung des „neuen“ Datensatzes verbietet sich, da dies erstens nicht Zweck dieses Tests ist und zweitens der Datensatz in diesem Fall von Anfang an zu Kalibrierungszwecken hätte verwendet werden können. Ein simples Ignorieren eines negativen Testergebnisses rechtfertigt seine Anwendung ebenso wenig. Konsequenterweise müsste bei einem negativen Ausgang das komplette Verkehrsnachfragemodell verworfen werden, um seine Modellspezifikationen grundlegend neu zu definieren. In der Praxis gibt es diese Fälle durchaus. Sie treten immer dann ein, wenn das angefertigte Modell nicht abgenommen wird. Meist sind sie die Folge einer ungenauen Modellspezifikation und einer nachlässigen Modellüberprüfung.

4.3.6 Dokumentation

Ergänzend zum Qualitätsmanagementprozess, der in PESTEL ET AL. (2016, S. 664 ff.) beschrieben ist, sind die finale Modellspezifizierung sowie die Ergebnisse von Kalibrierung und Validierung im Sinne der Modellanforderung „Transparenz“ zu dokumentieren. Dies beinhaltet auch sämtliche getroffene Modellannahmen für Analyse- und Bezugsfall sowie eine Beschreibung aller zu untersuchenden Szenarien. In der Literatur schlagen z.B. FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 218 ff.) Systematiken vor, was eine Dokumentation beinhalten und wie sie sich gliedern sollte.

Idealerweise findet der Arbeitsschritt der Dokumentation parallel zum Modellerstellungsprozess statt, weil er sehr aufwendig sein kann. Hinzu kommt, dass die Motivation zur Anfertigung einer ausführlichen Dokumentation des Modellaufbaus und der Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse nach der eigentlichen Erstellung des Modells meis-

tens sehr gering ist. Die Dokumentation sollte jedoch kein reiner Selbstzweck sein. Vielmehr sollte sie als wertsteigernde Tätigkeit empfunden und entsprechend gestaltet werden, um das Wissen des Modellierenden um die Funktionsweise des Modells mit all seinen Schwächen und Limitationen an seine Auftraggeber weiterzugeben (JENTSCH (2009, S. 17), TE BRÖMMELSTROET ET AL. (2017, S. 13)). Weiterhin ist eine Dokumentation wert- und sinnvoll, wenn das Modell oder Teile des Modells mit möglichst geringem Aufwand für Außenstehende zugänglich gemacht werden sollen.

In einer internationalen Umfrage mit insgesamt 229 teilnehmenden Personen stellten TE BRÖMMELSTROET ET AL. (2017, S. 13 ff.) fest, dass das Verständnis eines Verkehrsnachfragemodells, abhängig von der Rolle im Modellierungsprozess bzw. bei der Arbeit mit den Modellen, unterschiedlich hoch ist. Allgemein ist eine gute Dokumentation dienlich, um den Umgang mit dem Modell, die konkreten Einsatzbereiche und die zu erwartenden Aussagegenauigkeiten des Modells praxistauglich zu erklären. Ein besonders wichtiger Punkt ist die transparente Darstellung von letztgenannten Genauigkeiten bzw. Unsicherheiten. Dies kann beispielsweise – wie in der britischen Richtlinie WebTAG (UK DfT (2018b, S. 2 ff.)) vorgeschrieben – in einem Unsicherheits-Logbuch geschehen, dass alle bekannten Unsicherheiten im Analyse- und Bezugsfall für alle Szenarien auflistet und bewertet.

TE BRÖMMELSTROET ET AL. (2017, S. 15) stellen weiterhin fest, dass die Skepsis gegenüber Modellergebnissen zunimmt, je weniger die Personen mit der eigentlichen Modellierung zu tun haben. Hinzu kommt die verbreitete Annahme, dass die bloße Kommunikation von Unsicherheiten problematisch ist, weil sie bereits vorhandenes Misstrauen gegenüber dem Modell verstärken würde. NICOLAISEN (2012, S. 206 ff.) zeigt passend dazu, dass Modellergebnisse mit Unsicherheitsangaben in Entscheidungsprozessen von den zuständigen Beteiligten eher ignoriert werden. Paradoxerweise kann jedoch auch genau diese Aussparung von Unsicherheitsangaben zu Misstrauen bei Fachleuten führen. Andererseits kann ein Modell, dass ständig verbessert und überarbeitet wird, Misstrauen bei den Entscheidungsträgern hinsichtlich älterer Modellergebnisse auslösen. Die beschriebene Problematik kann selbst mit einer hervorragenden Dokumentation nicht komplett aufgelöst werden. Sie ist allerdings ein wesentlicher Schritt, um bei allen Beteiligten mehr Vertrauen in die Modellergebnisse zu erzeugen. (TE BRÖMMELSTROET ET AL. (2017, S. 15 ff.))

Die beiden vorangegangenen Kapitel beschäftigten sich auf einer allgemeinen Ebene mit den Ursachen für Abweichungen von Modellen, den Quantifizierungsmethoden für diese Abweichungen und einem standardisierten Qualitätsmanagementprozess für Verkehrsnachfragemodelle. Im folgenden Kapitel werden nun ausgewählte Einflussgrößen auf das Modellergebnis genauer untersucht.

We know a tremendous amount about how the world works, but not nearly enough. Our knowledge is amazing; our ignorance even more so.

Donella H. Meadows in MEADOWS (2009, S. 87)

5 Einflussgrößen auf die Qualität von Verkehrsnachfragemodellen

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, hängt die Qualität eines Verkehrsnachfragemodells von mehreren Einflussgrößen ab. Da es nie gelingen wird, alle Einflussgrößen zu untersuchen, wird in diesem Kapitel der Einfluss ausgewählter Unsicherheiten auf die Modellergebnisse von makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen näher betrachtet. Die beschriebenen Untersuchungen basieren auf dem Forschungsprojekt „Einflussgrößen auf die Qualität von makroskopischen Nachfragemodellen im Personenverkehr“ (FRIEDRICH ET AL. (2019c)).

Konkret wird in diesem Kapitel untersucht, welchen Einfluss die Wahl der Modelltheorie, die inhaltliche Segmentierung in Personengruppen und die Stichprobengröße der Mobilitätsverhaltensdaten haben. Dazu werden die Mobilitätsverhalten von virtuellen mikroskopischen Populationen als Realität angenommen und es wird versucht, diese Mobilitätsverhalten mit makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen zu reproduzieren. Das Auswertungsdesign ist dabei so gestaltet, dass zusätzlich zu den oben genannten Einflussgrößen auch der Einfluss der Aggregation von Modellergebnissen untersucht werden kann.

Viele Fehler des Analysefalls sind modellspezifisch unterschiedlich groß. Allgemeingültige Aussagen sind daher selbst bei einer sehr genauen Bestimmung aller individuellen Unsicherheitsfaktoren nur schwer möglich. In dieser Arbeit wird dennoch versucht, möglichst allgemeingültige Aussagen zu den verschiedenen Einflussfaktoren abzuleiten, indem mehrere Modellinstanzen unterschiedlicher Größe und mit unterschiedlicher Modelltheorie simulativ untersucht werden. Die verwendeten Modelle werden im folgenden Kapitel 5.1 beschrieben.

5.1 Datengrundlage

Für die Untersuchung stehen drei verschiedene Typen von Untersuchungsräumen zur Verfügung:

- ein sehr einfaches 5-Zellen-Netzmodell,
- ein etwas komplexeres 25-Zellen-Netzmodell und
- ein sehr komplexes 1.175-Zellen-Netzmodell.

Das 5-Zellen- und 25-Zellen-Netzmodell haben keine reale Referenz und werden daher als komplett virtuelle Mobilitätsdatenbasen erzeugt. Das 1.175-Zellen-Netzmodell basiert angebotsseitig auf dem makroskopischen Verkehrsnachfragemodell des Verbands

Region Stuttgart (SCHLAICH ET AL. (2012)) und nachfrageseitig auf dem zugehörigen mikroskopischen Verkehrsnachfragemodell (HAUTZINGER ET AL. (2013)).

Erzeugung von virtuellen Mobilitätsdatenbasen

Um die Wirkung unterschiedlicher Einflussgrößen auf die Modellqualität zu untersuchen, ist eine Datengrundlage vonnöten, aus der einerseits die Eingangsgrößen des Modells abgeleitet werden können und die andererseits Referenz- oder Vergleichsgrößen für die Modellvalidierung bereitstellt. Reale Erhebungen sind zu diesem Zweck ungeeignet:

- Haushaltsbefragungen mit Wegetagebüchern liefern detaillierte Eingangsgrößen für das Modell aber nur aggregierte Validierungsgrößen.
- Haushaltsbefragungen enthalten keine Routen, womit ein Rückschluss auf Verkehrsstärken im Netz möglich wäre.
- Netzbezogene Erhebungen, wie Streckenzählungen, liefern nur Vergleichswerte für das Modellergebnis, aber keine Eingangsdaten.
- Erhebungen aller Art erfassen immer nur eine Stichprobe, die wahren Werte der Grundgesamtheit sind unbekannt.
- Modelle realer Untersuchungsräume enthalten zu viele untersuchungsraumspezifische Eigenschaften und Interaktionen zwischen Siedlungsstruktur, Soziostruktur und Mobilitätsverhalten, als dass aus einer Untersuchung allgemein gültige Erkenntnisse abgeleitet werden könnten.

Aus diesem Grund wurde im Forschungsprojekt „Einflussgrößen auf die Qualität von makroskopischen Nachfragemodellen im Personenverkehr“ (FRIEDRICH ET AL. (2019c)) ein sogenannter „Wegetagebuchgenerator“ entwickelt. Mithilfe dieses Programms wird eine zufällige synthetische Population in einem abstrahierten Netz erzeugt und eine Stichprobe aus dieser Population gezogen. Eine ausführliche Dokumentation des Programms und detaillierte Spezifikationen der Wegetagebuchgeneratoren sind in Anhang 4 und Anhang 5 zu finden. Ergebnisse des Wegetagebuchgenerators sind:

- Netzmodelle mit Einwohner- und Aktivitätenorten:
Mithilfe des Wegetagebuchgenerators werden für zwei Untersuchungsräume (5-Zellen-Netzmodell und 25-Zellen-Netzmodell) Verkehrsnetze und Siedlungsstrukturdaten zu Bevölkerung und Aktivitätenorten erzeugt. Die Lage der Verkehrszellen wird entlang einer vorgegebenen Verkehrsachse (reproduzierbar) zufällig bestimmt. Daher unterscheiden sich die Netzmodelle für die einzelnen Experimente (siehe Kapitel 5.3). Innerhalb eines Experiments bleiben die Verkehrsnetze aber identisch.
- Mobilitätsdaten für alle Agenten:
Für jeden erzeugten Agenten des Untersuchungsraums wird die Wohnortzelle, die zugehörige Personengruppe und der Immobilitätsstatus bestimmt. Für jeden Agenten

wird dann ein Aktivitätenprogramm inklusive der zugehörigen Aktivitätenorte bestimmt. Dieser Vorgang wird 75-mal wiederholt⁵¹, um eine gewisse Stochastik und Variabilität der Agenten bei der Wahl der Aktivitätenorte abzubilden. Abschließend wird der Mittelwert aller 75 Simulationen berechnet, d.h. es werden die einwohnergewichteten mittleren Produktions-, Attraktions-, und Mobilitätsraten sowie die mittleren Nachfragematrizen ermittelt.

- Kenngrößenmatrizen für die Luftlinienentfernungen, die Zu- und Abgangsweiten und -zeiten sowie die Reiseweiten und -zeiten,
- „wahre“ Nachfragematrizen für die Grundgesamtheit der Personen und
- „beobachtete“ Nachfragematrizen für eine Stichprobe der Grundgesamtheit.

Die Ergebnisdaten werden in einem Format ausgegeben, das von der Verkehrsplanungssoftware PTV VISUM 18 (PTV (2018)) lesbar ist. Damit ist ein weitgehend automatisierter Aufbau von makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen für die virtuellen Untersuchungsräume möglich. Ein Beispiel für nach PTV VISUM 18 importierte Ergebnisdaten des Wegetagebuchgenerators wird in Abbildung 21 gezeigt.

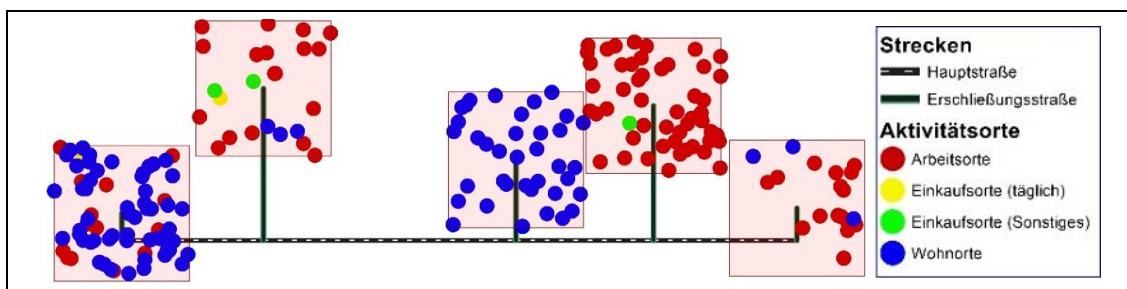


Abbildung 21: Beispiel eines 5-Zellen-Netzmodells inkl. aller Aktivitätenorte (Bildquelle: eigene Darstellung).

Nutzung einer vorhandenen Mobilitätsdatenbasis

Als Basis für ein komplexes Verkehrsnachfragemodell steht das Ergebnis eines mikroskopischen Verkehrsnachfragemodells (HAUTZINGER ET AL. (2013)) und eines makroskopischen Verkehrsnachfragemodells (SCHLAICH ET AL. (2012)) des Verbands Region Stuttgart zur Verfügung. Die Theorie der Verkehrserzeugung und Zielwahl im mikroskopischen Verkehrsnachfragemodell wird in Anhang 6 erläutert. Die Ergebnisse dieses Modells liegen in Form von Haushalts-, Personen- und Wegelisten vor. Sie werden in die Form der oben erläuterten Wegetagebuchgeneratorergebnisse überführt, um eine effiziente und vergleichbare Bearbeitung zu gewährleisten.

⁵¹ Die Anzahl von 75 Simulationsläufen ist bei einem Konfidenzniveau von 95 % ausreichend für einen mittleren (relativen) Fehler kleiner 0,045 % bezogen auf die Wegeanzahl aller Einwohner pro Simulationslauf (Berechnung nach FGSV (2006, S. 38)).

Für den Untersuchungsraum „1.175-Zellen-Netzmodell“ wird das aufbereitete Mobilitätsverhalten des mikroskopischen⁵² und das zugehörige Netzmodell des makroskopischen Verkehrsnachfragemodells verwendet. Aus den genannten Datenbasen werden folgende Daten erzeugt:

- ein Netzmodell mit Einwohner- und Aktivitätenorten (aus dem makroskopischen Verkehrsnachfragemodell),
- Mobilitätsdaten für alle Personen (aus dem mikroskopischen Verkehrsnachfragemodell),
- „wahre“ Nachfragematrizen für die Grundgesamtheit der Personen (aus dem mikroskopischen Verkehrsnachfragemodell),
- „beobachtete“ Nachfragematrizen für eine Stichprobe der Grundgesamtheit (aus dem mikroskopischen Verkehrsnachfragemodell) und
- Kenngrößenmatrizen für die Luftlinienentfernungen und die Reiseweiten und -zeiten (aus dem makroskopischen Verkehrsnachfragemodell).

5.2 Aufbau und Kalibrierung der makroskopischen Verkehrsnachfragemodelle

Die Verkehrsnachfragemodelle für die Experimente werden auf einen mittleren Simulationslauf des Wegetagebuchs (5-Zellen-Netzmodell und 25-Zellen-Netzmodell) bzw. auf einen mittleren Verkehrstag des mikroskopischen Verkehrsnachfragemodells des Verbands Region Stuttgart (1.175-Zellen-Netzmodell) kalibriert. Es werden aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle des Typs Vier-Stufen-Algorithmus und des Typs EVA sowie aktivitätenbasierte Wegekettenmodelle des Typs VISEM erzeugt (siehe Kapitel 2.4.2). Detaillierte Spezifikationen der Modelle sind in Anhang 7 zu finden. Mithilfe einer standardisierten, halb-automatisierten Vorgehensweise wird der Arbeitsaufwand des Aufbaus und der Kalibrierung der Verkehrsnachfragemodelle minimiert.

Parameterschätzung

Die Parameter der Verkehrserzeugung können direkt aus dem Wegetagebuchgenerator (5-Zellen-Netzmodell und 25-Zellen-Netzmodell) bzw. aus einer ausgewerteten Ergebnisdatei des mikroskopischen Verkehrsnachfragemodells des Verbands Region Stuttgart (1.175-Zellen-Netzmodell, HAUZINGER ET AL. (2013)) übernommen werden. Je

⁵² Analog zum Vorgehen beim Wegetagebuchgenerator werden die (gewichteten) Mittelwerte (für Produktions-, Attraktions- und Mobilitätsraten und Nachfragematrizen) über alle Simulationen berechnet. Als Simulation wird hierbei der jeweilige Verkehrstag definiert. Das mikroskopische Verkehrsnachfragemodell des Verbands Region Stuttgart bildet eine Woche (Montag bis Sonntag) ab.

nach Definition der Aktivitäten in den jeweiligen Nachfragemodellen werden die Produktions- und Attraktionsraten für jedes Aktivitätenpaar und jede Personengruppe bzw. die Mobilitätsraten für jede Aktivitätenkette und jede Personengruppe verwendet.

Die Schätzung der Zielwahlparameter basiert bei allen Nachfragemodellen auf dem Bisektionsalgorithmus, beschrieben z.B. in BURKARD & ZIMMERMANN (2012, S. 275 ff.). In seiner Grundform halbiert dieses iterative Verfahren ein gegebenes Parameterintervall in zwei äquidistante Teilintervalle. Für die Intervallgrenzen und für den erzeugten Zerlegungspunkt wird die Annäherung an ein Optimum evaluiert. Für die Parameterwerte mit der besten Bewertung wiederholt sich dieser Prozess: das Teilintervall wird halbiert und der neue Zerlegungspunkt wird evaluiert. Dies wird fortgesetzt, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist, z.B. die Unterschreitung einer gewünschten Toleranzgrenze oder das Erreichen einer maximalen Iterationszahl.

Um diesen Prozess möglichst automatisiert zu implementieren, werden die Parameterwerte mit einem Python-Skript⁵³ bestimmt und dann über eine COM-Schnittstelle⁵⁴ in einen einheitlichen Verfahrensablauf der Software PTV VISUM 18 übertragen⁵⁵. Dort findet die Berechnung der Nachfrage in den Schritten Verkehrserzeugung und Zielwahl statt. Da die numerische Genauigkeit des internen Optimierungsalgorithmus der Zielwahl möglichst groß sein soll, werden möglichst hohe Gütegrenzen vorgegeben. Die berechnete Zielwahlmatrix wird dann mit einer Referenzmatrix der Mobilitätsdatenbasen verglichen und mit einem Gütemaß evaluiert. Es stehen prinzipiell verschiedene Gütemaße zur Verfügung, siehe z.B. Kapitel 3.4.2.1. Die besten Kalibrierungsergebnisse wurden mit dem *SQV* der Summen der Verkehrsleistungsmatrizen erreicht.

Ein Vorteil dieses relativ einfachen Verfahrens besteht darin, dass die Zielfunktion nicht differenzierbar und stetig sein muss. Nachteilig sind die hohe Anzahl an Evaluationsvorgängen, die die Rechenzeit erhöhen, sowie die eingeschränkte Verwendungsmöglichkeit bei Funktionen mit mehreren (lokalen) Optima. Um den Nachteilen entgegenzuwirken, wird das beschriebene Bisektionsverfahren um eine Vorabauswertung ergänzt. Bevor der iterative Intervallhalbierungsprozess beginnt, wird das Ausgangsintervall in n äquidistante Teilintervalle unterteilt. Weil die Ober- und Untergrenzen des Intervalls enthalten sind, resultieren daraus $n+1$ Zerlegungspunkte. Zusätzlich werden weitere n zufällige Zerlegungspunkte innerhalb des gegebenen Ausgangsintervalls festgelegt. Die resultierenden $2n+1$ Zerlegungspunkte werden evaluiert. Zwischen den Parametern mit der größten Annäherung an das Optimum beginnt nun das oben beschriebene Bisektionsverfahren. Der gesamte Prozess dieses modifizierten Bisektionsverfahrens wird durch ein Beispiel in Abbildung 22 beschrieben.

⁵³ Detaillierte Spezifikationen des Zielwahlschätzalgorithmus sind in Anhang 8 zu finden.

⁵⁴ Component Object Model: Windows Programmierschnittstelle zur Programmsteuerung mit Visual Basic, Python oder anderen Programmiersprachen.

⁵⁵ Der verwendete Algorithmus setzt für alle Nachfragesegmente die jeweils gleichen Parameter. Die Nutzenfunktion der Zielwahl ist somit für alle Aktivitätenpaare bzw. -ketten und alle Personengruppen identisch.

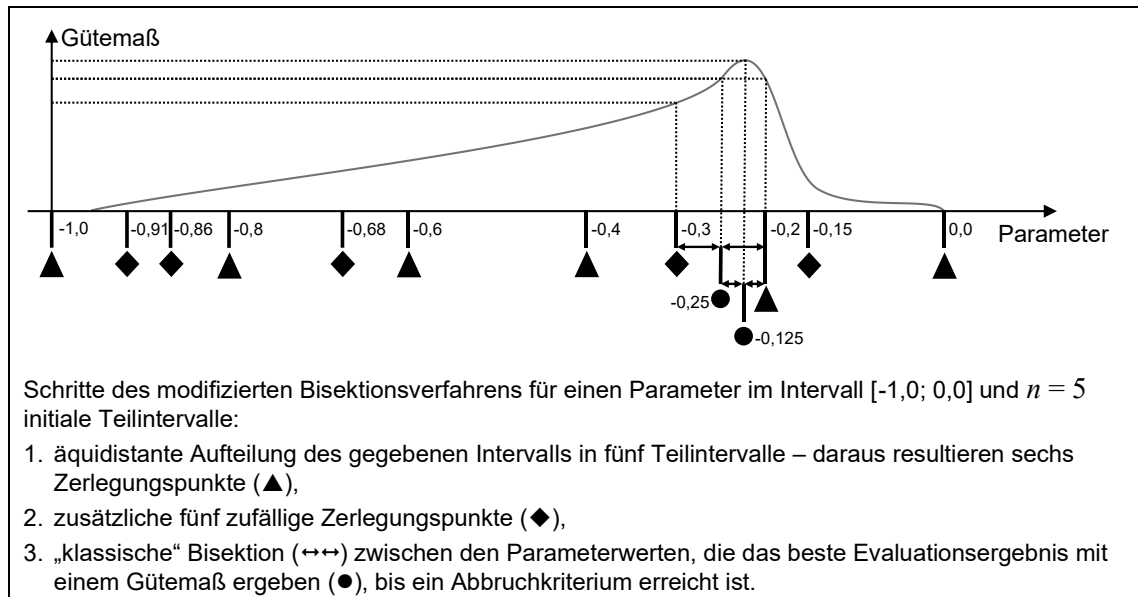


Abbildung 22: Schematische Darstellung der Funktionsweise des modifizierten Bisektionsverfahrens für einen zu schätzenden Parameter (Bildquelle: eigene Darstellung).

Durch die Vorabauswertung soll das Finden lokaler Optima möglichst vermieden werden. Dies wird zusätzlich durch eine Visualisierung der Evaluierungsergebnisse unterstützt (siehe Abbildung 23). Zudem werden durch die Erweiterung schneller konvergente Lösungen erreicht. Im Widerspruch dazu steht, dass durch $2n+1$ zusätzliche Evaluationen auch mehr Rechenzeit benötigt wird. Dieser Effekt kommt vor allem zum Tragen, wenn mehr als ein Parameter parallel geschätzt wird, da die Parameteranzahl sich exponentiell auf die Anzahl der Evaluationsschritte auswirkt. Bei der Schätzung von mehreren Parametern kommt es darüber hinaus zu dem Effekt, dass sich mehrere Parameterkombinationen als optimal herausstellen können. In einem solchen Fall wird nur eine Kombination von Parametern als Ergebnis ausgegeben, wobei aber die Kombinationsmöglichkeiten mit den besten Ergebnissen eingegrenzt werden (siehe 4. Reihe in Abbildung 23).

Die große Menge an erzeugten Modellen⁵⁶ erfordert eine automatisierte und standardisierte Kalibrierung. Mit der beschriebenen Vorgehensweise wird eine pragmatische Annäherung an eine optimale Modellkalibrierung implementiert, die sicherstellt, dass alle Modelle systematisch gleich gut kalibriert sind.

⁵⁶ Für die Experimente 1 bis 3 werden für jeden der drei Untersuchungsräume Vier-Stufen-Algorithmus-, EVA- und VISEM-Nachfragemodelle geschätzt (= 27 Modelle). Für Experiment 4 werden für jeden der drei Untersuchungsräume zwei VISEM- und zwei EVA-Modelle erstellt (= 12 Modelle). Für Experiment 5 werden VISEM-Modelle für fünf Stichprobengrößen und jeweils drei Untersuchungsräume (= 15 Modelle) und ein Referenzmodell des 1.175-Zellen-Modells (Längsschnittmodell der Verkehrstage Montag bis Freitag) erstellt. Insgesamt ergeben sich somit 55 geschätzte Verkehrsnachfragemodelle.

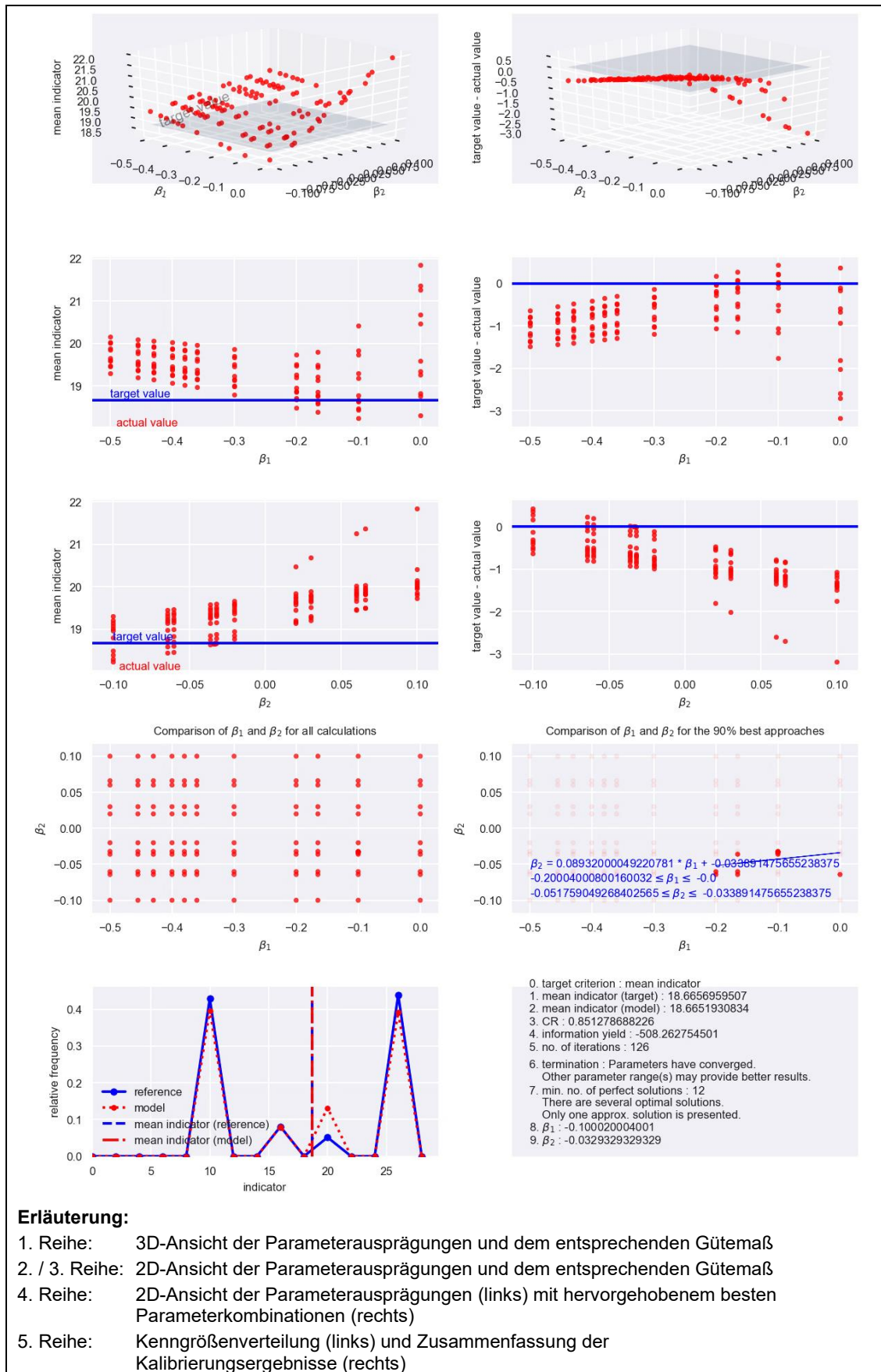


Abbildung 23: Beispiel für eine Visualisierung der Evaluierungsergebnisse von einem Modell mit zwei Parametern (Bildquelle: eigene Darstellung).

5.3 Untersuchungsmethodik

5.3.1 Untersuchte Einflussgrößen

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen“ von RIESER ET AL. (2018, S. 59 ff.) wurde eine Expertenbefragung durchgeführt. Dabei wird unter anderem erfragt, welche (maximal) drei modellrelevanten Bereiche verbessert werden sollten, wenn entsprechende personelle oder finanzielle Mittel vorhanden wären. Die 69 erhaltenen Antworten⁵⁷ geben Rückschlüsse darüber, welche Bereiche eines Modells als verbesserungswürdig erachtet werden. Die Prioritäten weisen folgende Reihung auf:

- bessere Daten zur Validierung ($n = 42$ Nennungen), z.B. mehr Zählstellen oder genauere Erhebungen, zum Mobilitätsverhalten ($n = 34$), z.B. hochwertigere Haushaltsbefragungen, zum Verkehrsnetz ($n = 26$), z.B. eine genauere Abbildung von Knotenpunktwideständen, und zur Siedlungsstruktur ($n = 23$), z.B. genauere Einwohner- und Arbeitsplatzdaten,
- eine feinere Segmentierung des Raumes ($n = 22$), z.B. mehr Verkehrszellen, und der Nachfrage ($n = 11$), z.B. mehr Wegezwecke oder Personengruppen,
- andere Modellansätze ($n = 16$), z.B. die Modellierung von Wegeketten oder andere Umlegungsverfahren, und weitere Modellstufen ($n = 12$), z.B. die Modellierung der Abfahrtszeitwahl, und
- bessere Software ($n = 10$), z.B. mit anderen oder besseren Funktionalitäten, sowie Hardware ($n = 3$), z.B. um Modelle schneller konvergieren zu lassen.

Mit diesen Verbesserungspunkten als Grundlage wird im Folgenden untersucht, welchen Einfluss „andere Modellansätze“ und „bessere Daten zum Mobilitätsverhalten“ auf die Modellqualität haben. Jede Untersuchung beschränkt sich dabei auf jeweils einen Fehler des Analysefalls (siehe Kapitel 3.3.1):

- Modellfehler:
 - Spezifikationsfehler: Einfluss der Modellannahmen zur Nachbildung von Entscheidungsprozessen der Verkehrsteilnehmenden
 - Abstraktionsfehler: Einfluss der inhaltlichen Segmentierung der Nachfrage
- Eingangsdatenfehler:
 - Messfehler bei Mobilitätsverhaltensdaten: Einfluss der Stichprobengröße

⁵⁷ Mehrfachnennungen waren möglich: insgesamt werden 199 Verbesserungswünsche genannt.

Eingrenzung der Untersuchung

Im Folgenden werden die Einflüsse von Unsicherheiten auf die Ergebnisse von makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen untersucht. Um den Einfluss des Modellfehlers möglichst gering zu halten, werden sehr einfache Modelle analysiert. Diese Einfachheit bezieht sich dabei auf die abgebildeten Aktivitäten und Personengruppen (siehe hierzu die Erläuterung der jeweiligen Experimente) und Modellstufen (nur Verkehrserzeugung und Zielwahl, jedoch keine Moduswahl und Umlegung) und somit auch auf die abgebildeten Modi (jeweils nur ein Modus Pkw). Die Modelle werden dementsprechend ausschließlich auf der Ebene von Verkehrserzeugungs- und Zielwahlergebnissen untersucht. Somit wird versucht die in Kapitel 3.4.2.5 beschriebene Fehlerfortpflanzung und die damit verbundenen Effekte von sich verstärkenden bzw. reduzierenden Fehlern weitestgehend zu unterbinden.

Um die Komplexität der Untersuchung weiter zu begrenzen, wird angenommen, dass die Daten des Verkehrsangebots korrekt sind, d.h. dass insbesondere die Reisezeiten zwischen den Aktivitätenorten (Verkehrszellen) der Realität entsprechen und bekannt sind. Damit wird der sehr spezielle und umfassende Aspekt der Fahrtzeitmodellierung, d.h. der Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und Fahrtzeit im Kfz-Verkehr bzw. Verspätungen im öffentlichen Verkehr, und der fahrtzeitabhängigen Routenwahl ausgeklammert.

Eine weitere Begrenzung der Untersuchung ist die ausschließliche Betrachtung von individuellen Analysefallfehlern. Damit sind Fehler gemeint, die das Modell schon verfälschen, bevor Prognoseannahmen getroffen werden und die eine weitere Unsicherheit bedeuten würden. Konkret bedeutet das, dass alle aufgebauten Modellinstanzen versuchen, eine (virtuelle) Mobilitätserhebung im Analysefall zu reproduzieren. Die Betrachtung von individuellen Analysefallfehlern bedeutet zudem, dass Interdependenzen zwischen den einzelnen Einflussgrößen nicht betrachtet werden.

5.3.1.1 Einfluss der Modellannahmen zur Nachbildung von Entscheidungsprozessen der Verkehrsteilnehmenden

Mit den Modellannahmen zur Nachbildung von Entscheidungsprozessen der Verkehrsteilnehmenden werden in einem Nachfragemodell grundlegende Festlegungen über die Abbildung des Mobilitätsverhaltens der Menschen getroffen. Die folgenden Experimente konzentrieren sich auf die Frage, ob dieses Mobilitätsverhalten besser mit Einzelwegen oder mit Wegeketten abgebildet werden kann (siehe Kapitel 2.4.2). Hierfür werden die Auswirkungen unterschiedlicher Modelltheorien untersucht:

- aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle des Typs Vier-Stufen-Algorithmus,
- aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle des Typs EVA und
- aktivitätenbasierte Wegekettenmodelle des Typs VISEM.

Experiment 1: Wegezwecke „Wohnen“ und „Arbeiten“ mit einer Personengruppe

Bei dieser Untersuchung werden nur die Aktivitäten „Wohnen“ und „Arbeiten“ sowie eine Personengruppe „Erwerbstätige“ abgebildet. Es werden alle Aktivitätenketten bzw. -paare der Mobilitätsdatenbasen übernommen. Die Parameter für Verkehrserzeugung und Zielwahl sind für alle Modelltheorien identisch⁵⁸.

Mit dieser einfachen Spezifikation sollen grundlegende Unterschiede der Modelltheorien analysiert werden. Es wird bei diesem Experiment erwartet, dass alle Modelltheorien identische Ergebnisse für Verkehrserzeugung und Zielwahl liefern, da nur Aktivitätenpaare mit harten Randsummen modelliert werden und auch sonst keinerlei Randsummenausgleiche notwendig sind. Darüber hinaus wird erwartet, dass sich die Mobilitätsdatenbasen durch die Modelle gut abbilden lassen.

Experiment 2: Wegezwecke „Wohnen“, „Arbeiten“ und „Einkaufen“ mit einer Personengruppe

Bei dieser Untersuchung werden wie bei Experiment 1 eine Personengruppe „Erwerbstätige“ aber ein zusätzlicher Wegezweck „Einkaufen“ (neben „Wohnen“ und „Arbeiten“) abgebildet. Es werden alle Aktivitätenketten bzw. -paare der Mobilitätsdatenbasen übernommen. Die Parameter für Verkehrserzeugung und Zielwahl sind für alle Modelltheorien und alle Nachfragesegmente identisch⁵⁸.

Bei aktivitätenbasierten Wegekettenmodellen bestimmt die Mobilitätsrate das Verkehrsaufkommen einer in sich geschlossenen Aktivitätenkette. Daraus ergibt sich das Verkehrsaufkommen der analysierten Aktivitätenpaare. Aktivitätenbasierte Wegekettenmodelle betrachten die Aktivitäten ohne Wohnortbezug durch Konzepte wie Rubberbanding (siehe Kapitel 2.4.1) im räumlichen Kontext. Bei den Mobilitätsdatenbasen findet eine getrennte Wahl von Pflichtaktivitätenorten und Nicht-Pflichtaktivitätenorten statt. Es wird daher erwartet, dass die Mobilitätsdatenbasen durch aktivitätenbasierte Wegekettenmodelle (mit Rubberbanding) besser abgebildet werden als durch aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle.

⁵⁸ Theoretisch beinhaltet der reine Vier-Stufen-Algorithmus keinerlei Randsummenausgleiche. Um die Unterschiede während der Verkehrserzeugung zu minimieren, wird bei den Vier-Stufen-Algorithmus- und EVA-Modellen ein „Randsummenausgleich 1“ der EVA-Modelltheorie durchgeführt. Dieser Randsummenausgleich stellt sicher, dass das Verkehrsaufkommen der Aktivitätenpaare mit Wohnortbezug symmetrisch ist. Für VISEM-Modelle ist ein solcher Ausgleich nicht nötig, da Aktivitätenketten geschlossene Einheiten bilden.

Die Erwartungen an die Verkehrserzeugungs- und Zielwahlergebnisse aktivitätenbasierter Einzelwegmodelle unterscheiden sich für die jeweiligen Aktivitätenpaare:

- Aktivitätenpaare mit beidseitig harten Randsummenbedingungen (z.B. Wohnen-Arbeiten (WA)) sollten keine Unterschiede zwischen den Modelltheorien (auch im Vergleich zu den VISEM-Modellen) aufweisen.
- Für Aktivitätenpaare mit (theoretisch) weichen Randsummenbedingungen muss beachtet werden, dass diese beim klassischen Vier-Stufen-Algorithmus in PTV VISUM 18 nicht als „weiche Randsummenbedingungen“ implementiert sind, d.h. das Verkehrsaufkommen wird dort mit den gegebenen fixen Produktions- und Attraktionsraten bestimmt. Es findet kein nachträglicher Randsummenausgleich des Verkehrsaufkommens statt.
- Bei Aktivitätenpaaren mit (theoretisch) einseitig weichen Randsummenbedingungen und mit Wohnortbezug (z.B. Einkaufen-Wohnen (EW)) werden nur geringe Unterschiede zwischen Modellen vom Typ EVA und vom Typ Vier-Stufen-Algorithmus erwartet. Dies liegt daran, da für diese Aktivitätenpaare die Produktionsrate durch einen „Randsummenausgleich 1“ (siehe Kapitel 2.4.1) symmetrisiert wird.
- Aktivitätenpaare mit (theoretisch) einseitig weichen Randsummenbedingungen und ohne Wohnortbezug (z.B. Einkaufen-Arbeiten (EA) oder Sonstiges-Sonstiges (SS)) werden Unterschiede aufweisen, da die EVA-Modelle einen „Randsummenausgleich 2“ (siehe Kapitel 2.4.1) durchführen, der sicherstellt, dass das Verkehrsaufkommen innerhalb einer geschlossenen Zeiteinheit auch für Aktivitätenpaare ohne Wohnortbezug symmetrisch ist. Dies wird ebenso über eine Anpassung der Produktionsrate für diese Aktivitätenpaare realisiert. Durch das „realistischere“ Verkehrsaufkommen der EVA-Modelle wird auch eine bessere Übereinstimmung der Zielwahlergebnisse erwartet.

Experiment 3: Wegezwecke „Wohnen“ und „Arbeiten“ mit zwei Personengruppen

Aufbauend auf Experiment 1 wird untersucht, ob es Unterschiede zwischen den Modelltheorien (Vier-Stufen-Algorithmus, EVA und VISEM) gibt, wenn zwei Personengruppen, die um die gleiche Siedlungsstrukturgröße konkurrieren, abgebildet werden. Die Modelltheorien VISEM und EVA bilden dies durch einen personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich (siehe Kapitel 2.4.2.4) ab.

Es werden alle Aktivitätenketten bzw. -paare der Mobilitätsdatenbasen übernommen. Die Parameter für Verkehrserzeugung und Zielwahl sind für alle Modelltheorien und alle Nachfragesegmente identisch⁵⁸.

Es wird erwartet, dass alle Modelltheorien identische Ergebnisse für die Verkehrserzeugung liefern, da nur Aktivitätenpaare mit harten Randsummenbedingungen modelliert

werden. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Experiment 1 wird hingegen nicht erwartet, dass die Modelle mit personengruppenübergreifendem Randsummenausgleich die Mobilitätsdatenbasen wesentlich besser abbilden, da die Zielwahl bei den zugrundeliegenden Mobilitätsdatenbasen von den harten Randsummen dominiert wird. Beispielsweise kann es dort vorkommen, dass ein Agent „gezwungen“ ist, ein unattraktives Ziel zu wählen, weil bereits alle anderen Ziele ausgelastet sind.

5.3.1.2 Einfluss der inhaltlichen Segmentierung der Nachfrage

Die inhaltliche Segmentierung der Nachfrage bestimmt den Detaillierungsgrad mit dem das Modell Entscheidungsprozesse nachbilden kann. Je nach verfügbarer Datengrundlage und geplanten Einsatzbereichen des Modells sind feinere oder gröbere Segmentierungen möglich. Grobe Segmentierungen führen dazu, dass auch die Modellergebnisse gröber werden und damit bestimmte Untersuchungen ggf. nicht möglich sind. Andererseits kann auch eine zu feine Segmentierung problematisch sein, weil sie einen erhöhten Aufwand in der Datenerhebung und -verarbeitung mit sich bringt. Wie bereits in Kapitel 3.3.1.1 erwähnt, besteht bei zu fein segmentierten Modellen zudem die Gefahr der Überanpassung („Overfitting“) und es müssen im Bezugsfall mehr Annahmen getroffen werden, worunter die Qualität der Prognose leiden kann.

Experiment 4: Personengruppensegmentierung

In Ergänzung zu Experiment 3 (und im identischen Netzmodell) werden die Veränderungen der Modellergebnisse untersucht, wenn Personengruppen nicht unterschieden werden im Vergleich zu differenzierten Personengruppen. Im Falle von differenzierten Personengruppen wird zusätzlich unterschieden, ob ein personengruppenübergreifender Randsummenausgleich stattfindet oder nicht. Hierfür werden nur die Aktivitäten „Wohnen“ und „Arbeiten“ sowie entweder eine Personengruppe „Erwerbstätige“ oder zwei Personengruppen „Erwerbstätige (Vollzeit)“ und „Erwerbstätige (Teilzeit)“ in VISEM- und EVA-Verkehrsnachfragemodellen abgebildet. Es werden alle Aktivitätenketten bzw. -paare der Mobilitätsdatenbasen übernommen. Die Parameter für Verkehrserzeugung und Zielwahl sind für alle Nachfragesegmente identisch.

Da nur Aktivitätenpaare mit harten Randsummenbedingungen modelliert werden und die Verkehrserzeugungsparameter direkt aus den Mobilitätsdatenbasen kommen, werden keine Unterschiede bei der Verkehrserzeugung erwartet.

Es wird erwartet, dass sich die Modellergebnisse von Modellen mit differenzierten Personengruppen und von Modellen ohne differenzierte Personengruppen unterscheiden, wobei Erstere als realitätsnäher gelten, da die Mobilitätsdatenbasen auch Personengruppen unterscheiden. Allerdings weisen die Personengruppen in den Mobilitätsdaten-

basen ein identisches Zielwahlverhalten auf und dementsprechend werden auch die Modelle konzipiert. Wenn zwei Personengruppen unterschieden werden, diese aber ein identisches Mobilitätsverhalten aufweisen, dann führt ein personengruppenübergreifender Randsummenausgleich dazu, dass die Zielwahl abhängig von der Attraktivität des Zieles stattfindet (siehe Kapitel 2.4.2.4). Die beiden Personengruppen wirken zusammen betrachtet wie eine Personengruppe. Daher werden vor allem Unterschiede zwischen den Modellen mit einer Personengruppe und den Modellen mit zwei Personengruppen ohne personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich erwartet.

Allgemein wird das Experiment keine Aussagen darüber liefern, ob die getroffene Segmentierung „zu fein“ ist, da für alle Segmentierungen vollständige Datenbasen zur Verfügung stehen und keine Bezugsfälle berechnet werden.

5.3.1.3 Einfluss von Messfehlern bei Mobilitätsverhaltensdaten

Aus den mit Wegetagebüchern erfassten Verhaltensdaten leiten sich die Verkehrserzeugungsparameter und die Verhaltensparameter für die Ziel- und Moduswahl ab. Die Genauigkeit wird von der Stichprobengröße und von der Qualität der Erhebung und Nachbearbeitung beeinflusst.

Experiment 5: Stichprobengröße der Mobilitätsverhaltensbefragungen

Aufbauend auf Experiment 2 (und im identischen Netzmodell) werden VISEM-Modelle für unterschiedliche Stichprobengrößen erstellt: 100 % (Vollerhebung), 75 %, 25 %, 10 % und 5 % der Grundgesamtheit eines Verkehrstages. Die Stichproben werden dabei immer aus einem zufällig ausgewählten Verkehrstag (bzw. Simulationslauf) gezogen und es wird darauf geachtet, dass alle Personengruppen in der Stichprobe enthalten und entsprechend gewichtet sind^{59,60,61}. Die auf Basis dieser Stichproben erzeugten Modelle werden als Querschnittsmodell eines Verkehrstages bezeichnet. Wichtig ist hierbei, dass eine 100 %-Stichprobe nicht den Daten des mittleren Verkehrstages (bzw. Simulationslaufes) entspricht. Die 100 %-Stichprobe ist die Grundlage eines Querschnittsmodells für einen (zufälligen) Verkehrstag, während aus den Daten des mittleren Verkehrstages ein Längsschnittmodell über alle relevanten Verkehrstage erstellt wird.

⁵⁹ Die Agenten erhalten im kombinierten Personen- und Wegebogen eine Gewichtung. Es erfolgt keine separate Gewichtung der Wege. Ein Weg eines Agenten hat somit dasselbe Gewicht wie der Agent selbst.

⁶⁰ Beim 1.175-Zellen-Netzmodell werden nur Stichproben aus den Verkehrstagen Montag bis Freitag zugelassen, da am Wochenende kaum Ortsveränderungen mit den Wegezwecken Arbeiten oder Einkaufen stattfinden. Dementsprechend bildet auch die Referenz „Längsschnittmodell (Verkehrstag: Mo-Fr)“ kein Wochenende ab.

⁶¹ Weitergehende Informationen zur Erzeugung der Stichproben sind in Anhang 4 zu finden.

Es werden alle Aktivitätenketten bzw. -paare der jeweiligen Stichprobe aus den Mobilitätsdatenbasen abgebildet. Die Parameter für Verkehrserzeugung und Zielwahl sind für alle Nachfragesegmente identisch. Es wird die Grundspezifikation von Experiment 2 (Abbildung einer Personengruppe mit den Aktivitäten Wohnen, Arbeiten und Einkaufen) gewählt, um speziell den Einfluss der Stichprobengröße auf gering nachgefragte Aktivitätenpaare bzw. -ketten zu untersuchen.

Wie oben beschrieben, werden die jeweiligen Stichproben-Querschnittsmodelle mit zwei Referenzen verglichen, um den Einfluss der Stichprobengrößen zu bewerten:

- Die Stichproben der Mobilitätsdatenbasen, um darzustellen, wie gut ein Modell, was aus einer Stichprobe geschätzt wird, eben diese Stichprobe repräsentiert. Dies ist der typische Fall bei der Erstellung eines Verkehrsnachfragemodells: eine Erhebung (= Stichprobe) soll mit einem Modell (= Querschnittmodell) abgebildet werden. Entsprechende Vergleiche wurden bereits in Experiment 1 bis 3 durchgeführt, weshalb von diesem Vergleich kein großer Erkenntnisgewinn zu erwarten ist.
Die Erwartung ist, dass sich die Mobilitätsdatenbasen in Verkehrserzeugung und Zielwahl gut abbilden lassen.
- Das (mittlere) makroskopische Modell (= Längsschnittmodell), das mit dem mittleren Mobilitätsverhalten geschätzt wird, um darzustellen, wie gut ein stichprobenbasiertes Modell mit einem grundgesamtheitsbasierten Modell übereinstimmt. Dieser Vergleich kann in der Praxis nicht durchgeführt werden, da es kein grundgesamtheitsbasiertes Modell gibt. Dennoch ist dieser Vergleich bei diesem Experiment interessanter, da er die Qualität des stichprobenbasierten Modells zeigt.
Die Erwartung ist, dass es mit kleiner werdender Stichprobengröße Unterschiede zwischen Längsschnittmodell und den Querschnittsmodellen der jeweiligen Stichprobe gibt. Grund dafür sind einerseits die Gewichtungen, die nur auf Personenebene und nicht auf Wegeebe­ne stattfinden, wodurch sie mit kleiner werdender Stichprobengröße einen immer größeren Einfluss haben. Ein weiterer Grund ist, dass selten vorkommende Aktivitätenketten weniger häufig gezogen werden.

5.3.1.4 Einfluss der Aggregation von Modellergebnissen

Die Ergebnisse der Experimente werden auf verschiedenen Aggregationsebenen ausgewertet. Das Verkehrsaufkommen, das mit der Verkehrserzeugung bestimmt wird, wird disaggregiert auf Verkehrszellenebene (Wege pro Person je Verkehrszelle) und aggregiert auf Untersuchungsraumbene (Wege pro Person je Untersuchungsraum) analysiert. Die Ergebnisse der Zielwahl werden auf vier Aggregationsebenen ausgewertet: disaggregiert auf Ebene der Nachfragematrizen, leicht aggregiert auf Streckennetzebene, aggregiert auf Verteilungsklassenebene und stark aggregiert auf Ebene der Nachfragematrixsummen.

Es wird erwartet, dass die Übereinstimmung zwischen den jeweiligen Referenz- und Vergleichsmodellen mit zunehmender Aggregation ebenfalls zunimmt.

5.3.2 Auswahl der Gütemaße

Die nachfolgenden Untersuchungen beschränken sich auf den Vergleich von Zielwahlergebnissen. Da ausschließlich Fehler des Analysefalls untersucht werden und somit eine entsprechende Referenzdatenbasis für Vergleiche vorliegt, handelt es sich um Ex-post-Analysen gemäß Kapitel 3.1. Das Ergebnis eines solchen Vergleichs ist eine Modellgüte, die mit diversen Gütemaßen ausgedrückt werden kann (siehe Kapitel 3.4.2.1). Generell erweisen sich die Eigenschaften des Gütemaßes *SQV* (Verlauf der absoluten und relativen Abweichungen, Skalierbarkeit, Interpretierbarkeit etc.) als gut geeignet. Aus diesem Grund und für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden im Folgenden ausschließlich *SQV*-basierte Gütemaße verwendet.

Validierung der Verkehrserzeugung

Bei der Validierung der Verkehrserzeugung wird das Verkehrsaufkommen, d.h. der erzeugte und der angezogene Verkehr je Verkehrszelle, für die unterschiedlichen Aktivitätspaare untersucht. Als Gütemaß wird der *SQV*-Wert (Formel (30)) mit einem Skalierungsfaktor von $f = 1$ verwendet. Es werden zwei Aggregationsebenen betrachtet:

- disaggregiert: Wege pro Person je Verkehrszelle und
- aggregiert: Wege pro Person je Untersuchungsraum.

Bei den Wegen pro Person und Verkehrszelle wird der *SQV*-Wert auf Verkehrszellebene bestimmt und anschließend über alle Verkehrszellen zu einem mittleren *SQV*-Wert gemittelt, wobei die verkehrszellenfeine Personengruppengröße als Gewicht dient. Bei den Wegen pro Person und Untersuchungsraum wird der *SQV*-Wert nur einmal auf Untersuchungsraumbene bestimmt.

Abbildung 24 zeigt eine beispielhafte Darstellung des Auswertungsschemas für die Verkehrserzeugungsvalidierung.

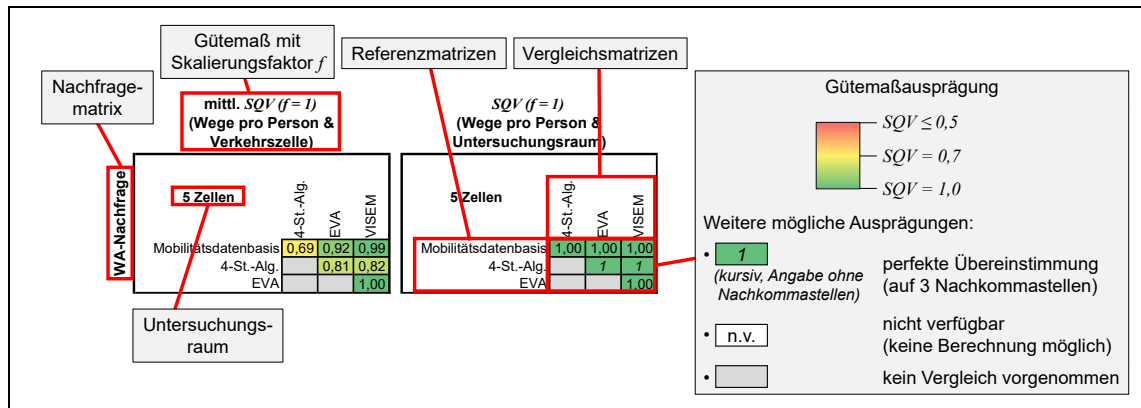


Abbildung 24: Exemplarische Darstellung des verwendeten Auswertungsschemas für die Verkehrserzeugungsvalidierung (Bildquelle: eigene Darstellung).

Validierung der Zielwahl

Für die Zielwahlvalidierung wird neben dem SQV das in Kapitel 3.4.2.1 vorgestellte Gütemaß $mwSQV$ genutzt. Es werden damit verschiedene Aggregationsebenen untersucht:

- disaggregiert: $mwSQV$ der Nachfragematrix (Formel (43)),
- leicht aggregiert: $mwSQV$ einer Bestwegumlegung im Dreiecksnetz (Formel (44)),
- aggregiert: $mwSQV$ der Reiseweitenverteilung (Formel (37)),
- stark aggregiert: SQV der Nachfragematrixsummen (Formel (30)).

Damit sich alle Gütemaße auf den gleichen Untersuchungsraum beziehen, wird der Zellbinnenverkehr aus allen Auswertungen ausgeschlossen⁶². Für alle SQV -basierten Gütemaße gilt, dass der Skalierungsfaktor f einen großen Einfluss auf das Vergleichsergebnis hat. Aus diesem Grund werden die Skalierungsfaktoren im Folgenden so gewählt, dass sie selbstskalierend sind. Dabei wird die relative Nachfrage je Vergleichselement (Quelle-Ziel-Relation einer Matrix, Strecke im Dreiecksnetz, Klasse der Reiseweitenverteilung) mit dem SQV bewertet. Als Skalierungsfaktor f wird der Kehrwert der Anzahl der Vergleichselemente angenommen. Für die jeweiligen Gütemaße bedeutet das konkret:

- $mwSQV$ der Nachfragematrix:
Vergleichsebene sind die Quelle-Ziel-Relationen. Ihre Anzahl ergibt sich aus der quadrierten Verkehrszellenanzahl Z (abzüglich des von der Auswertung ausgenommenen Zellbinnenverkehrs, also $Z^2 - Z$). Die Anzahl der Vergleichselemente und der Skalierungsfaktor f sind für den jeweiligen Untersuchungsraum konstant und werden daher nur einmal angegeben. Abbildung 25 zeigt exemplarisch die SQV -Werte auf

⁶² Bei einer Bestwegumlegung im Dreiecksnetz wird der Zellbinnenverkehr nicht umgelegt. Er ist daher nicht Teil der Auswertung.

Quelle-Ziel-Relationsebene. Der $mwSQV$ der Nachfragematrix ist das nachfragegewichtete arithmetische Mittel dieser SQV -Werte.

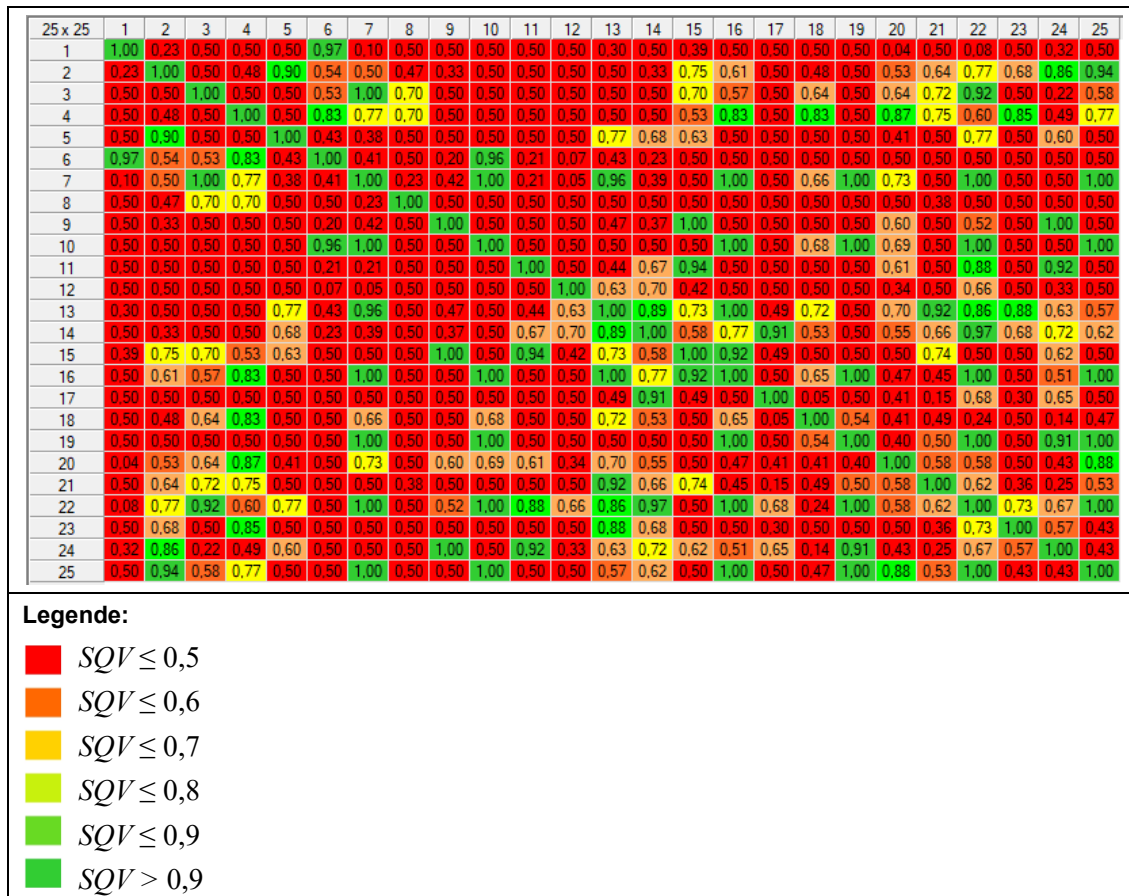


Abbildung 25: Exemplarische Darstellung des SQV ($f = 1 / (Z^2 - Z)$) für jede Quelle-Ziel-Relation (Bildquelle: eigene Darstellung).

- $mwSQV$ einer Bestwegumlegung im Dreiecksnetz:

Vergleichsebene sind die Strecken eines Dreiecksnetzes. Die Streckenanzahl S und der Skalierungsfaktor f sind für den jeweiligen Untersuchungsraum konstant und werden daher nur einmal angegeben. Abbildung 26 zeigt exemplarisch ein Dreiecksnetz und die zugehörigen SQV -Werte auf den Dreiecksstrecken. Der $mwSQV$ einer Bestwegumlegung im Dreiecksnetz ist das nachfragegewichtete arithmetische Mittel dieser SQV -Werte.

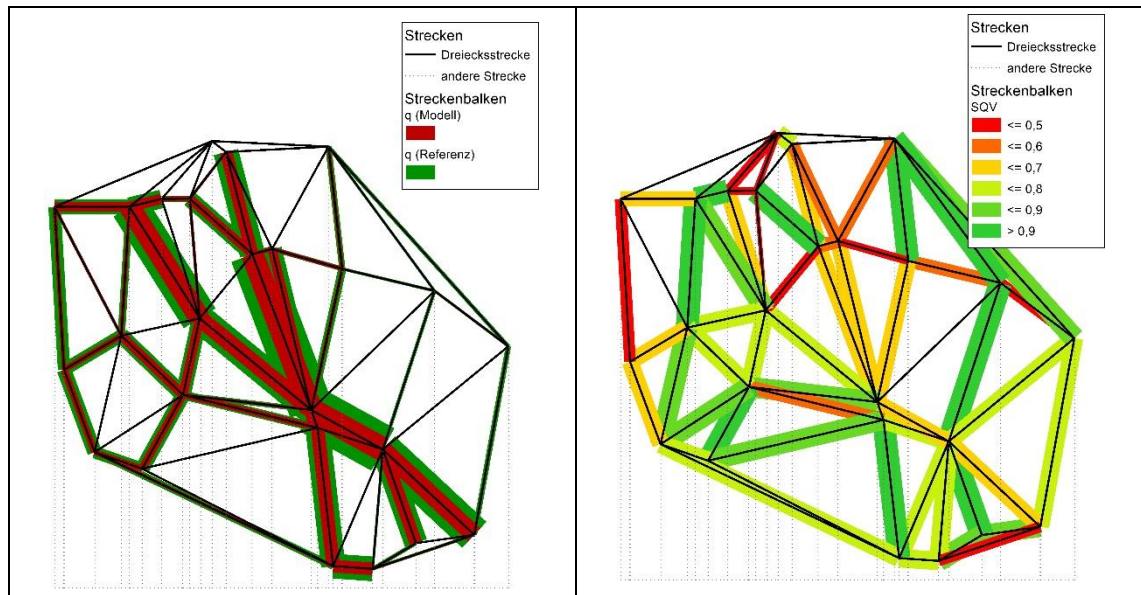


Abbildung 26: Exemplarische Darstellung der umgelegten Nachfrage (links) und der zugehörigen Bewertung mit dem SQV ($f = 1 / S$; rechts) im Dreiecksnetz (Bildquelle: eigene Darstellung).

- $mwSQV$ der Reiseweitenverteilung:

Vergleichsebene sind die Klassen einer Reiseweitenverteilung. Es wird versucht, zehn äquiquantile Klassen zu erzeugen, d.h. Klassen in denen jeweils 10 % der Gesamtnachfrage enthalten sind. Aufgrund von Rundungen vor der Klasseneinteilung oder weil sich die diskrete Nachfrage nicht komplett gleichmäßig auf die äquiquantilen Klassen verteilen lässt, ist es nicht immer möglich, genau zehn gleichmäßig besetzte Klassen zu erzeugen (PESTEL (2020, S. 6)). Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wird die Klassenanzahl in diesen Fällen reduziert. Trotzdem kann es aufgrund sehr stark nachgefragter Quelle-Ziel-Relationen zu Klumpungseffekten in einzelnen Klassen kommen, sodass die Klassen nicht gleichmäßig besetzt sind.

Die Klassen werden für die jeweilige Referenzmatrix bestimmt und können sich daher im jeweiligen Untersuchungsraum unterscheiden. Aus diesem Grund werden für jede Referenzmatrix der Skalierungsfaktor f und die Klassenanzahl K angegeben. Abbildung 27 zeigt exemplarisch zwei (annähernd) äquiquantile Reiseweitenverteilungen und die zugehörigen SQV -Werte je Verteilungsklasse. Der $mwSQV$ der Reiseweitenverteilung ist das nachfragegewichtete arithmetische Mittel dieser SQV -Werte.

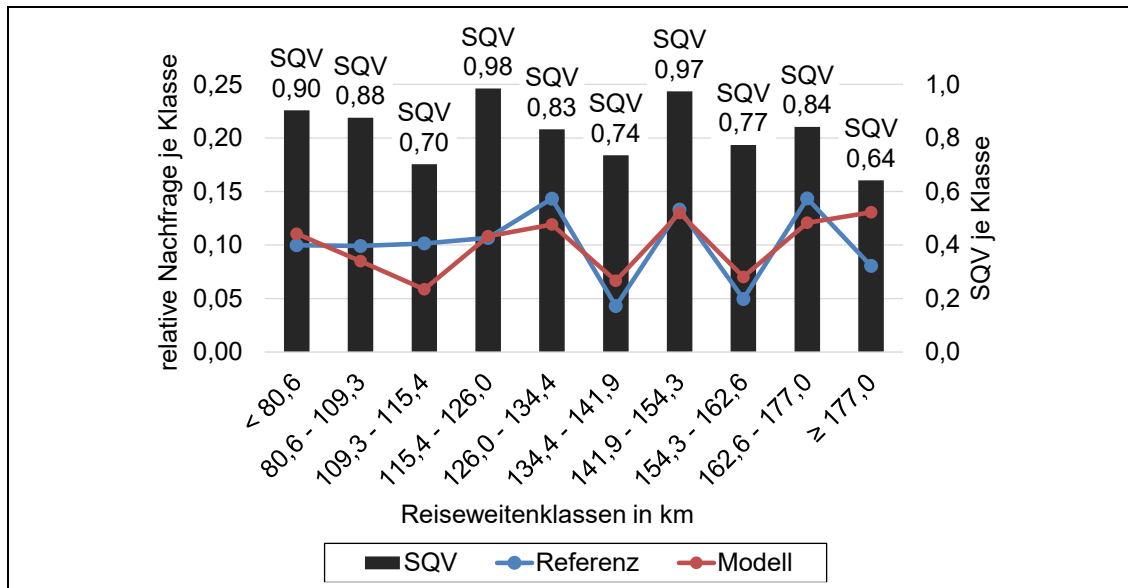


Abbildung 27: Exemplarische Darstellung der Reiseweitenverteilung mit den zugehörigen SQV -Bewertungen ($f = 1 / K$) je Klasse (Bildquelle: eigene Darstellung).

- SQV der Nachfragematrixsummen:

Vergleichsebene sind die Summen der Nachfragematrizen. Bei dieser Auswertung wird jeweils nur ein Elementpaar verglichen. Um dem bisherigen Ansatz der Selbstskalierung auch hier möglichst zu folgen, wird als Skalierungsfaktor f die Summe der Referenzmatrix verwendet ($f = c$). Aus dieser Annahme folgt allerdings, dass das Gütemaß SQV eine besondere Form des Kehrwertes der relativen Abweichung ausdrückt (siehe Formel (57)). Der Skalierungsfaktor f und die Summe der Referenzmatrix c werden für jeden Vergleich angegeben. Es ist zu beachten, dass der Ausschluss des Zellbinnenverkehrs aus der Bewertung auch bei der Summenbildung der Referenzmatrix c zu berücksichtigen ist.

$$SQV = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{(m - c)^2}{f \cdot c}}} \xrightarrow{\text{mit } f=c ; \{c, m\} \in \mathbb{R}^+} SQV = \frac{c}{c + \sqrt{(m - c)^2}} \quad (57)$$

mit

m	Modellwert
c	Erhebungswert
f	Skalierungsfaktor
SQV	Gütemaß SQV

Abbildung 28 zeigt eine beispielhafte Darstellung des Auswertungsschemas für die Zielwahlvalidierung.

Nachfrage-matrix

	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,46	0,47	0,47
4-St.-Alg.		1,00	1,00
EVA			1

Gütemaß

	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,65	0,65	0,65
4-St.-Alg.		1,00	1,00
EVA			1

Referenzmatrizen

$mwSQV$ (Dreiecksnetz)

	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,65	0,65	0,65
4-St.-Alg.		1,00	1,00
EVA			1

$mwSQV$ (Reiseweitenverteilung)

	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,70	0,71	0,71
4-St.-Alg.		1	1
EVA			1

SQV (Nachfragematrixsumme)

	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,89	0,88	0,88
4-St.-Alg.		1	1
EVA			1

Vergleichsmatrix

	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,70	0,71	0,71
4-St.-Alg.		1	1
EVA			1

Legende:

- 1 perfekte Übereinstimmung (auf 3 Nachkommastellen)
- n.v. nicht verfügbar (keine Berechnung möglich)
- kein Vergleich vorgenommen

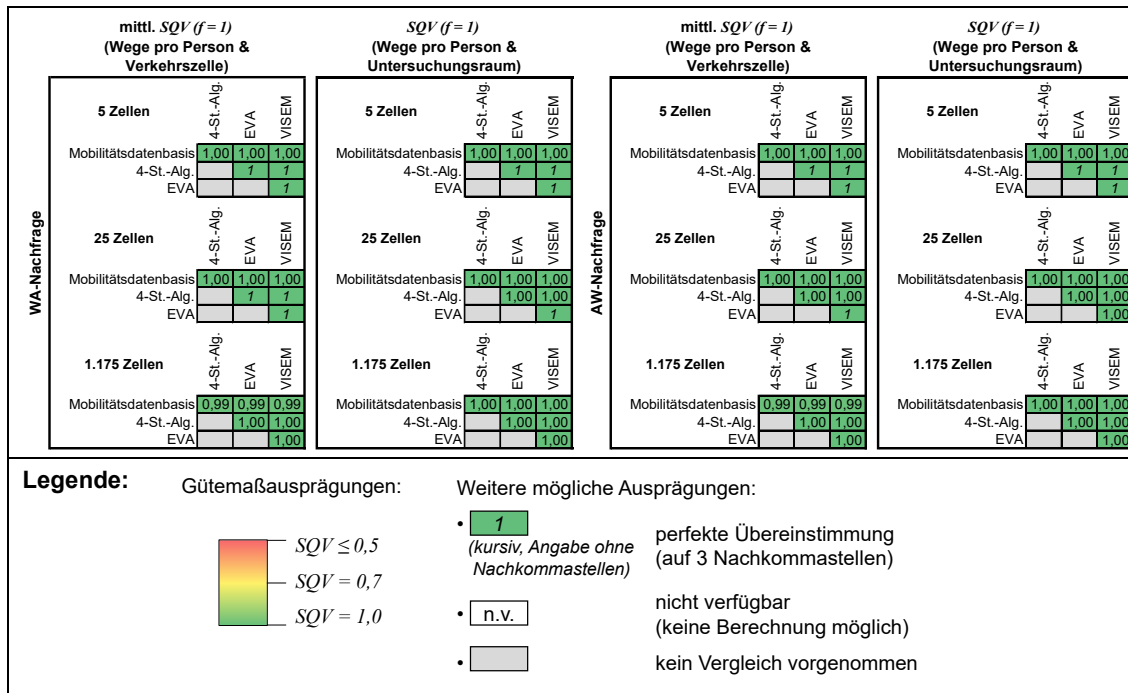


Abbildung 29: Vergleich der Verkehrserzeugungsergebnisse auf verschiedenen Aggregationsebenen für Experiment 1 (Bildquelle: eigene Darstellung).

Vergleich der Zielwahlergebnisse

Im Zuge des Experiments wurde deutlich, dass alle betrachteten Modelltheorien „richtige“ Ergebnisse hinsichtlich ihrer zugrundeliegenden Rechenvorschriften liefern. In der ursprünglichen Konfiguration der Zielwahlnutzenfunktion hat sich gezeigt, dass die Heimwege bei einer nicht-symmetrischen Kenngrößenmatrix nur bei der Modelltheorie VISEM richtig zugeordnet werden. Dies folgt aus der Betrachtung der Aktivitätenfolge als zusammenhängende Kette – und der damit verbundenen Kenntnis der Wohnortzelle. Bei den Modelltheorien Vier-Stufen-Algorithmus und EVA hingegen wird die Aktivitätenfolge in Aktivitätenpaare aufgeteilt, wodurch der Wohnortbezug verloren geht.

Unter der Bedingung, dass die Kenngrößenmatrix symmetrisch ist (bzw. symmetrisiert wird), kann die Erwartung, dass alle Modelltheorien identische Ergebnisse liefern, bestätigt werden (siehe Abbildung 30).

Hinsichtlich der Abbildung der Mobilitätsdatenbasen hängt der Grad der Übereinstimmung stark von der Aggregationsebene der Auswertung ab. Die disaggregierte Auswertung der Übereinstimmung der Matrixstruktur ($mwSQV$ (Matrix)) zeigt keine guten Ergebnisse. Die aggregierten Auswertungen der räumlichen Nachfragestruktur ($mwSQV$ (Dreiecksnetz)) bzw. der Reiseweitenverteilung ($mwSQV$ (Reiseweitenverteilung)) deuten bessere Übereinstimmungen an. Wird die Summe der Nachfragematrizen verglichen, zeigen sich sehr gute Übereinstimmungen zwischen den Mobilitätsdatenbasen und den

makroskopischen Modellen. Der Grad der Übereinstimmung nimmt demzufolge mit zunehmender Aggregation zu⁶³.

Die mangelnde Übereinstimmung mit den Mobilitätsdatenbasen deutet darauf hin, dass das Modell nicht richtig spezifiziert ist, d.h., dass erklärende Variablen in der Nutzenfunktion nicht berücksichtigt werden. Aufgrund der angewendeten standardisierten Kalibrierung der Modelle und weil eventuell Eigenschaften der Wege nicht abgebildet werden, ist eine bessere Übereinstimmung nicht zu erreichen. Zudem kommt es auch bei der Kalibrierung auf die Aggregationsebene des Zielkriteriums an, anhand dessen entschieden wird, ob die (automatisierte) Kalibrierung beendet wird. Interessant ist bei diesem Aspekt, dass trotz einer schlechten Abbildung auf Relationsebene eine gute Abbildung auf Strecken- bzw. Verteilungsklassenebene erreicht wird.

⁶³ Eine Ausnahme bildet hierbei das 5-Zellen-Netzmodell: Da die Anzahl der Vergleichselemente der Dreiecksstrecken ($n = 16$) und der Reiseweitenverteilungsklassen ($n = 7$) in einer ähnlichen Größenordnung liegen, besteht hier keine wirkliche Aggregation vor. Daher kann es vorkommen, dass trotz zunehmender Aggregation, keine bessere Übereinstimmung angezeigt wird.

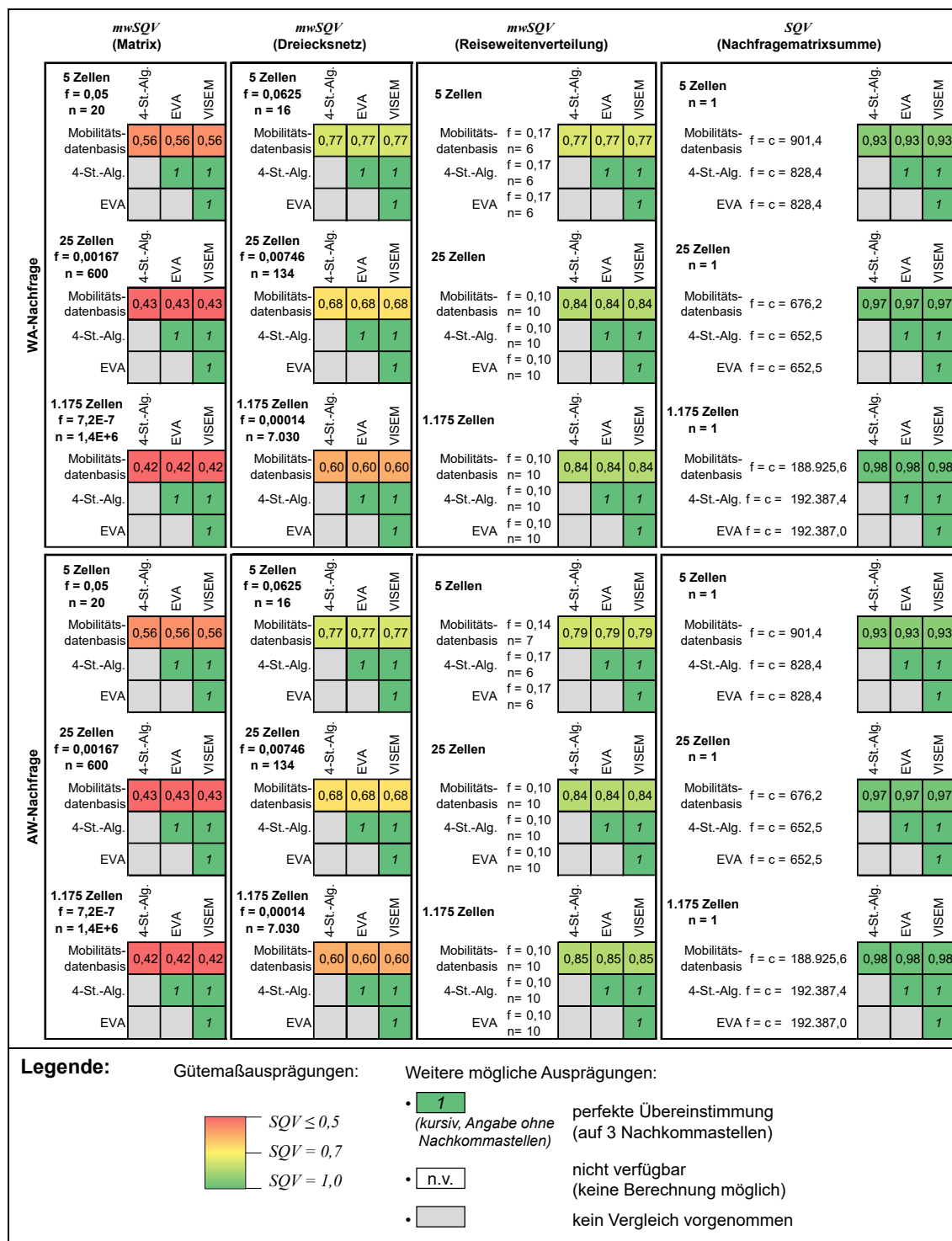


Abbildung 30: Vergleich der Zielwahlergebnisse für Experiment 1 (Bildquelle: eigene Darstellung).

Experiment 2: Wegezwecke Wohnen, Arbeiten und Einkaufen, eine Personengruppe

Vergleich der Verkehrserzeugungsergebnisse

Abbildung 31 zeigt die Verkehrserzeugungsergebnisse für Experiment 2. Auf Untersuchungsebene ist die Abbildung der Mobilitätsdatenbasen sehr gut. Zudem gibt es hier kaum Unterschiede zwischen den Modelltheorien. Die Abbildung der Mobilitätsdatenbasen auf Verkehrszellenebene gelingt nur mit geringen Abweichungen, die zum Teil aus den bereits erwähnten Annahmen der Verkehrserzeugung (Verwendung globaler Parameter in den makroskopischen Modellen) resultieren.

Bei den Aktivitätenpaaren mit harten Randsummenbedingungen (Wohnen-Arbeiten (WA), Arbeiten-Wohnen (AW)) zeigen sich wie erwartet keine Unterschiede. Die Aktivitätenpaaren mit weichen Randsummenbedingungen und Wohnortbezug (Wohnen-Einkaufen (WE), Einkaufen-Wohnen (EW)) zeigen eine gute Übereinstimmung, die im Falle der Modelle vom Typ EVA und Vier-Stufen-Algorithmus aus dem „Randsummenausgleich 1“ resultiert.

Speziell bei den Aktivitätenpaaren mit weichen bzw. offenen Randsummenbedingungen ohne Wohnortbezug (Arbeit-Einkaufen (AE) und Einkaufen-Arbeit (EA) bzw. Sonstiges-Sonstiges (SS)) zeigen sich deutlichere Abweichungen. Sie resultieren aus der unterschiedlichen Beachtung der Randsummenbedingungen. Die erwähnten Aktivitätenpaare werden im Falle der Modelltheorie EVA mit offenen Randsummenbedingungen und einem „Randsummenausgleich 2“ modelliert. Die anderen beiden Modelltheorien nutzen quasi harte Randsummenbedingungen für diese Aktivitätenpaare. Daher können die Ergebnisse der Verkehrserzeugung für die einzelnen Modelltheorien voneinander abweichen.

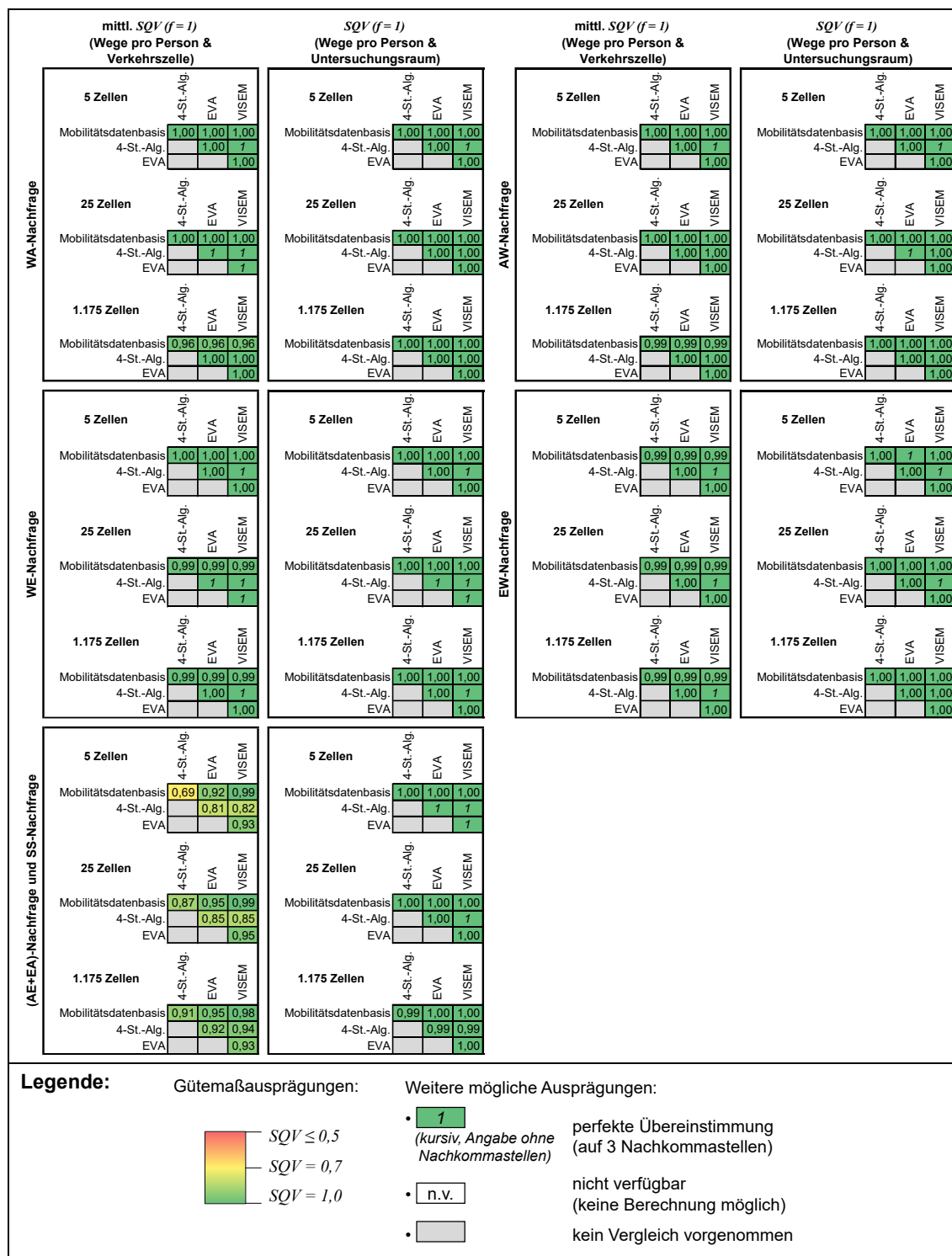


Abbildung 31: Vergleich der Verkehrserzeugungsergebnisse auf verschiedenen Aggregationsebenen für Experiment 2 (Bildquelle: eigene Darstellung).

Vergleich der Zielwahlergebnisse

Abbildung 32 zeigt, dass sich die Modelltheorien für Aktivitätenpaare mit harten Randsummen und mit Wohnortbezug nicht unterscheiden. Bei Aktivitätenpaaren mit einseitig weichen Randsummenbedingungen und Wohnortbezug zeigt sich, dass sich die Modelltheorien Vier-Stufen-Algorithmus und EVA sehr gut übereinstimmen. Bei Aktivitätenpaaren mit einseitig weichen Randsummenbedingungen ohne Wohnortbezug hingegen stimmen die Modelltheorien EVA und VISEM besser überein als die Modelltheorien Vier-Stufen-Algorithmus und EVA. Diese Erwartungen an das Experiment werden somit erfüllt.

Insgesamt zeigt sich, dass die Mobilitätsdatenbasen von allen Modelltheorien aus den in Experiment 1 genannten Gründen (mangelhafte Spezifikation, standardisierte Kalibrierung) schlecht abgebildet werden, wobei die Übereinstimmung mit zunehmender Aggregation der Ergebnisse zunimmt. Die Erwartung, dass die VISEM-Modelle generell bessere Ergebnisse liefern, kann nicht bestätigt werden. Zum Teil sind sie zwar besser – die Unterschiede zu den anderen Modelltheorien sind jedoch sehr gering.

mwsQV
(Matrix)

mwsQV
(Drecksnetz)

mwsQV
(Reiseweitenverteilung)

sqV
(Nachfragematrixsumme)

WA-Nachfrage

5 Zellen $f = 0,05$ $n = 20$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,54	0,54	0,54
4-St.-Alg.		1	1
EVA			1
25 Zellen $f = 0,00167$ $n = 600$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,33	0,33	0,33
4-St.-Alg.		1	1
EVA			1
1.175 Zellen $f = 7,2E-7$ $n = 1,4E+6$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,44	0,44	0,44
4-St.-Alg.		1	1
EVA			1

5 Zellen $f = 0,0625$ $n = 16$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,75	0,75	0,75
4-St.-Alg.		1	1
EVA			1
25 Zellen $f = 0,00746$ $n = 134$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,55	0,55	0,55
4-St.-Alg.		1	1
EVA			1
1.175 Zellen $f = 0,00014$ $n = 7.030$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,66	0,66	0,66
4-St.-Alg.		1	1
EVA			1

5 Zellen	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = 0,17$ $n = 6$	0,79	0,79	0,79
4-St.-Alg. $f = 0,20$ $n = 5$		1	1
EVA $f = 0,20$ $n = 5$			1
25 Zellen	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = 0,10$ $n = 10$	0,72	0,72	0,72
4-St.-Alg. $f = 0,10$ $n = 10$		1	1
EVA $f = 0,10$ $n = 10$			1
1.175 Zellen	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = 0,10$ $n = 10$	0,91	0,91	0,91
4-St.-Alg. $f = 0,10$ $n = 10$		1	1
EVA $f = 0,10$ $n = 10$			1

5 Zellen $n = 1$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = c = 956,7$	0,91	0,91	0,91
4-St.-Alg. $f = c = 864,1$		1	1
EVA $f = c = 864,1$			1
25 Zellen $n = 1$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = c = 617,4$	0,98	0,98	0,98
4-St.-Alg. $f = c = 632,5$		1	1
EVA $f = c = 632,5$			1
1.175 Zellen $n = 1$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = c = 204.741,0$	0,99	0,99	0,99
4-St.-Alg. $f = c = 207.364,9$		1	1
EVA $f = c = 207.365,2$			1

AW-Nachfrage

5 Zellen $f = 0,05$ $n = 20$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,53	0,53	0,53
4-St.-Alg.		1	1
EVA			1
25 Zellen $f = 0,00167$ $n = 600$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,33	0,33	0,33
4-St.-Alg.		1	1
EVA			1
1.175 Zellen $f = 7,2E-7$ $n = 1,4E+6$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,43	0,43	0,43
4-St.-Alg.		1	1
EVA			1

5 Zellen $f = 0,0625$ $n = 16$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,75	0,75	0,75
4-St.-Alg.		1	1
EVA			1
25 Zellen $f = 0,00746$ $n = 134$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,55	0,55	0,55
4-St.-Alg.		1	1
EVA			1
1.175 Zellen $f = 0,00014$ $n = 7.030$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,66	0,66	0,66
4-St.-Alg.		1	1
EVA			1

5 Zellen	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = 0,17$ $n = 6$	0,76	0,76	0,76
4-St.-Alg. $f = 0,20$ $n = 5$		1	1
EVA $f = 0,20$ $n = 5$			1
25 Zellen	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = 0,10$ $n = 10$	0,73	0,73	0,73
4-St.-Alg. $f = 0,10$ $n = 10$		1	1
EVA $f = 0,10$ $n = 10$			1
1.175 Zellen	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = 0,10$ $n = 10$	0,90	0,90	0,90
4-St.-Alg. $f = 0,10$ $n = 10$		1	1
EVA $f = 0,10$ $n = 10$			1

5 Zellen $n = 1$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = c = 905,6$	0,91	0,91	0,91
4-St.-Alg. $f = c = 817,8$		1	1
EVA $f = c = 817,8$			1
25 Zellen $n = 1$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = c = 584,6$	0,98	0,98	0,98
4-St.-Alg. $f = c = 598,7$		1	1
EVA $f = c = 598,8$			1
1.175 Zellen $n = 1$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = c = 189.890,0$	0,99	0,99	0,99
4-St.-Alg. $f = c = 192.492,2$		1	1
EVA $f = c = 192.491,9$			1

WE-Nachfrage

5 Zellen $f = 0,05$ $n = 20$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,24	0,24	0,24
4-St.-Alg.		1	1,00
EVA			1,00
25 Zellen $f = 0,00167$ $n = 600$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,21	0,21	0,21
4-St.-Alg.		0,93	0,61
EVA			0,64
1.175 Zellen $f = 7,2E-7$ $n = 1,4E+6$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,08	0,08	0,09
4-St.-Alg.		1	0,65
EVA			0,65

5 Zellen $f = 0,0625$ $n = 16$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,53	0,53	0,53
4-St.-Alg.		1	1
EVA			1
25 Zellen $f = 0,00746$ $n = 134$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,50	0,50	0,53
4-St.-Alg.		0,96	0,74
EVA			0,76
1.175 Zellen $f = 0,00014$ $n = 7.030$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis	0,44	0,44	0,48
4-St.-Alg.		1	0,69
EVA			0,69

5 Zellen	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = 0,25$ $n = 4$	0,67	0,67	0,67
4-St.-Alg. $f = 0,20$ $n = 5$		1	1,00
EVA $f = 0,20$ $n = 5$			1,00
25 Zellen	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = 0,11$ $n = 9$	0,67	0,67	0,68
4-St.-Alg. $f = 0,10$ $n = 10$		0,99	0,90
EVA $f = 0,10$ $n = 10$			0,88
1.175 Zellen	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = 0,10$ $n = 10$	0,72	0,72	0,77
4-St.-Alg. $f = 0,10$ $n = 10$		1	0,88
EVA $f = 0,10$ $n = 10$			0,88

5 Zellen $n = 1$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = c = 1,1$	0,70	0,70	0,70
4-St.-Alg. $f = c = 0,6$		1	1
EVA $f = c = 0,6$			1
25 Zellen $n = 1$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = c = 0,8$	0,84	0,83	0,83
4-St.-Alg. $f = c = 1,0$		0,99	0,99
EVA $f = c = 1,0$			1,00
1.175 Zellen $n = 1$	4-St.-Alg.	EVA	VISEM
Mobilitäts-datenbasis $f = c = 893,4$	0,93	0,93	0,93
4-St.-Alg. $f = c = 965,0$		1,00	1,00
EVA $f = c = 964,4$			1,00

EW-Nachfrage	5 Zellen $f = 0,05$ $n = 20$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	5 Zellen $f = 0,0625$ $n = 16$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	5 Zellen $f = 0,33$ $n = 3$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	5 Zellen $n = 1$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA
	4-St.-Alg. 0,28 0,28 0,28 EVA 1 1,00 1,00	4-St.-Alg. 0,56 0,56 0,56 EVA 1 1 1	4-St.-Alg. 0,78 0,78 0,78 EVA 1 1,00 1,00	4-St.-Alg. 0,71 0,71 0,71 EVA 1 1 1
	25 Zellen $f = 0,00167$ $n = 600$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	25 Zellen $f = 0,00746$ $n = 134$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	25 Zellen $f = 0,10$ $n = 10$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	25 Zellen $n = 1$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA
	4-St.-Alg. 0,23 0,23 0,23 EVA 0,93 0,62 0,65	4-St.-Alg. 0,56 0,55 0,53 EVA 0,96 0,75 0,76	4-St.-Alg. 0,70 0,70 0,77 EVA 0,99 0,87 0,87	4-St.-Alg. 0,93 0,92 0,93 EVA 0,99 1 0,99
	1.175 Zellen $f = 7,2E-7$ $n = 1,4E+6$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	1.175 Zellen $f = 0,00014$ $n = 7.030$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	1.175 Zellen $f = 0,10$ $n = 10$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	1.175 Zellen $n = 1$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA
	4-St.-Alg. 0,29 0,29 0,29 EVA 1 0,65 0,65	4-St.-Alg. 0,57 0,57 0,56 EVA 1 0,69 0,69	4-St.-Alg. 0,90 0,90 0,89 EVA 1 0,88 0,88	4-St.-Alg. 0,98 0,98 0,98 EVA 1 1,00 1,00
(AE+EA)-Nachfrage und SS-Nachfrage	5 Zellen $f = 0,05$ $n = 20$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	5 Zellen $f = 0,0625$ $n = 16$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	5 Zellen $f = 0,25$ $n = 4$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	5 Zellen $n = 1$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA
	4-St.-Alg. 0,26 0,23 0,33 EVA 0,22 0,22 0,45	4-St.-Alg. 0,55 0,39 0,48 EVA 0,38 0,48 0,73	4-St.-Alg. 0,54 0,51 0,60 EVA 0,42 0,45 0,76	4-St.-Alg. 0,69 0,94 0,98 EVA 0,59 0,54 0,92
	25 Zellen $f = 0,00167$ $n = 600$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	25 Zellen $f = 0,00746$ $n = 134$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	25 Zellen $f = 0,13$ $n = 8$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	25 Zellen $n = 1$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA
	4-St.-Alg. 0,16 0,20 0,19 EVA 0,32 0,35 0,46	4-St.-Alg. 0,36 0,54 0,53 EVA 0,42 0,41 0,70	4-St.-Alg. 0,57 0,69 0,69 EVA 0,69 0,72 0,86	4-St.-Alg. 0,71 1 0,94 EVA 0,77 0,80 0,94
	1.175 Zellen $f = 7,2E-7$ $n = 1,4E+6$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	1.175 Zellen $f = 0,00014$ $n = 7.030$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	1.175 Zellen $f = 0,10$ $n = 10$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA	1.175 Zellen $n = 1$ Mobilitäts-datenbasis 4-St.-Alg. EVA
	4-St.-Alg. 0,17 0,19 0,20 EVA 0,37 0,44 0,41	4-St.-Alg. 0,28 0,31 0,28 EVA 0,38 0,49 0,45	4-St.-Alg. 0,59 0,70 0,63 EVA 0,68 0,80 0,80	4-St.-Alg. 0,76 0,72 0,71 EVA 0,95 0,94 0,99

Legende:

Gütemaßausprägungen:

$SQV \leq 0,5$

$SQV = 0,7$

$SQV = 1,0$

Weitere mögliche Ausprägungen:

- 1 (kursiv, Angabe ohne Nachkommastellen) perfekte Übereinstimmung (auf 3 Nachkommastellen)
- n.v. nicht verfügbar (keine Berechnung möglich)
- kein Vergleich vorgegeben

Abbildung 32: Vergleich der Zielwahlergebnisse für Experiment 2 (Bildquelle: eigene Darstellung).

Experiment 3: Wegezwecke Wohnen und Arbeiten, zwei Personengruppen

Vergleich der Verkehrserzeugungsergebnisse

Die in Abbildung 33 dargestellten Analyseergebnisse der Verkehrserzeugung zeigen auf beiden Aggregationsebenen keine Unterschiede zwischen den Modelltheorien. Die Mobilitätsdatenbasen werden auf Untersuchungsraumebene sehr gut abgebildet. Auf Verkehrszellenebene zeigen sich minimale Abweichungen, die sich mit den bereits erwähnten Annahmen der Verkehrserzeugung (Verwendung globaler Parameter in den makroskopischen Modellen) erklären lassen.

Vergleich der Zielwahlergebnisse

Abbildung 34 stellt die Zielwahlergebnisse für Experiment 3 dar. Die Erwartungen an diese Ergebnisse werden erfüllt: durch einen personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich bei den Modelltheorien EVA und VISEM stimmen beide überein. Insgesamt ist die Abbildungsqualität der Mobilitätsdatenbasen (auf den niedrigen Aggregationsstufen der Ergebnisse) nicht gut und auch kaum unterschiedlich für alle Modelltheorien, was an den in Experiment 1 genannten Gründen (mangelhafte Spezifikation, standardisierte Kalibrierung) liegt. Das bedeutet, dass die Unterschiede zwischen Modellen mit und ohne personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich in diesem Experiment sehr gering sind.

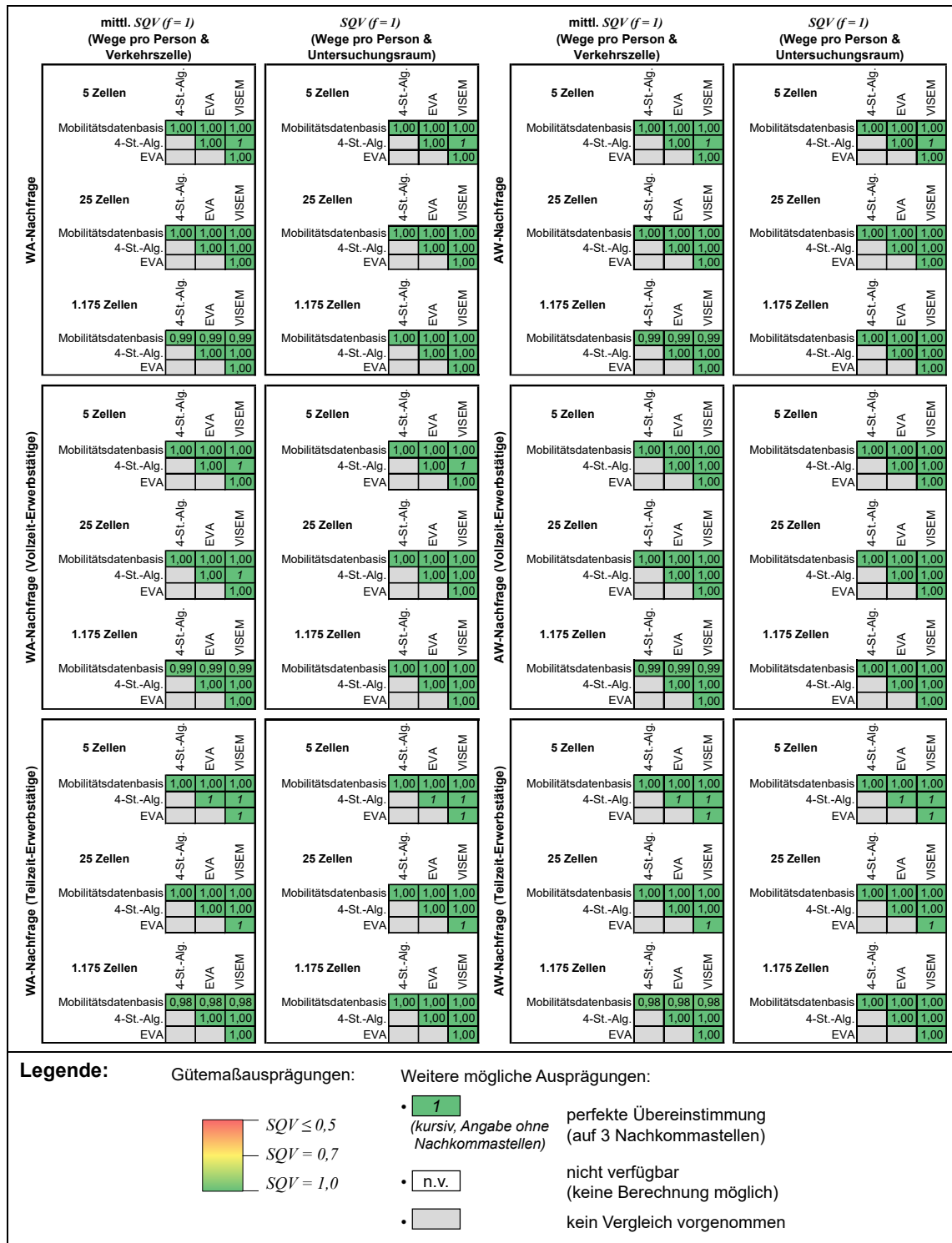


Abbildung 33: Vergleich der Verkehrserzeugungsergebnisse auf verschiedenen Aggregationsebenen für Experiment 3 (Bildquelle: eigene Darstellung).

	<i>mwSQV'</i> (Matrix)	<i>mwSQV'</i> (Dreiecksnetz)	<i>mwSQV'</i> (Reiseweitenverteilung)	<i>SQV'</i> (Nachfragematrixsumme)
WA-Nachfrage	5 Zellen f = 0,05 n = 20 Mobilitäts- datenbasis 4-St.-Alg. EVA	5 Zellen f = 0,07143 n = 14 Mobilitäts- datenbasis 4-St.-Alg. EVA	5 Zellen Mobilitäts- datenbasis 4-St.-Alg. EVA	5 Zellen n = 1 Mobilitäts- datenbasis 4-St.-Alg. EVA
	4-St.-Alg. EVA	4-St.-Alg. EVA	4-St.-Alg. EVA	4-St.-Alg. EVA
	EVA	EVA	EVA	EVA
AW-Nachfrage	25 Zellen f = 0,00167 n = 600 Mobilitäts- datenbasis 4-St.-Alg. EVA	25 Zellen f = 0,00746 n = 134 Mobilitäts- datenbasis 4-St.-Alg. EVA	25 Zellen Mobilitäts- datenbasis 4-St.-Alg. EVA	25 Zellen n = 1 Mobilitäts- datenbasis 4-St.-Alg. EVA
	4-St.-Alg. EVA	4-St.-Alg. EVA	4-St.-Alg. EVA	4-St.-Alg. EVA
	EVA	EVA	EVA	EVA
WA-Nachfrage (Vollzeit-Erwerbstätige)	1.175 Zellen f = 7,2E-7 n = 1,4E+6 Mobilitäts- datenbasis 4-St.-Alg. EVA	1.175 Zellen f = 0,00014 n = 7.030 Mobilitäts- datenbasis 4-St.-Alg. EVA	1.175 Zellen Mobilitäts- datenbasis 4-St.-Alg. EVA	1.175 Zellen n = 1 Mobilitäts- datenbasis 4-St.-Alg. EVA
	4-St.-Alg. EVA	4-St.-Alg. EVA	4-St.-Alg. EVA	4-St.-Alg. EVA
	EVA	EVA	EVA	EVA

	AW-Nachfrage (Vollzeit-Erwerbstätige)			WA-Nachfrage (Teilzeit-Erwerbstätige)			AW-Nachfrage (Teilzeit-Erwerbstätige)		
	5 Zellen f = 0,05 n = 20			5 Zellen f = 0,07143 n = 14			5 Zellen f = 0,05 n = 20		
	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA
	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,53	0,51	0,51
		0,98	0,98		0,97	0,97		0,94	0,94
			1			1			1
	25 Zellen f = 0,00167 n = 600			25 Zellen f = 0,00746 n = 134			25 Zellen f = 0,00167 n = 600		
	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA
	0,33	0,33	0,33	0,50	0,49	0,49	0,23	0,24	0,24
		0,90	0,90		0,93	0,93		0,76	0,76
			1			1			1
	1.175 Zellen f = 7,2E-7 n = 1,4E+6			1.175 Zellen f = 0,00014 n = 7.030			1.175 Zellen f = 7,2E-7 n = 1,4E+6		
	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA
	0,40	0,40	0,40	0,61	0,61	0,61	0,24	0,24	0,24
		0,98	0,98		0,97	0,97		0,90	0,90
			1			1			1
	5 Zellen f = 0,25 n = 4			5 Zellen f = 0,11 n = 9			5 Zellen f = 0,14 n = 7		
	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA
	0,71	0,71	0,71	0,68	0,68	0,68	0,64	0,63	0,63
		0,99	0,99		0,98	0,98		0,94	0,94
			1			1			1
	25 Zellen f = 0,10 n = 10			25 Zellen f = 0,10 n = 10			25 Zellen f = 0,10 n = 10		
	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA
	0,68	0,68	0,68	0,58	0,59	0,59	0,58	0,59	0,59
		0,98	0,98		0,94	0,94		0,94	0,94
			1			1			1
	1.175 Zellen f = 0,10 n = 10			1.175 Zellen f = 0,10 n = 10			1.175 Zellen f = 0,10 n = 10		
	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA
	0,86	0,86	0,86	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
		1,00	1,00		0,99	0,99		0,99	0,99
			1			1			1
	5 Zellen f = c = 347,4			5 Zellen f = c = 101,9			5 Zellen f = c = 101,9		
	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA
	0,90	0,89	0,89	0,88	0,86	0,86	0,88	0,86	0,86
		0,99	0,99		0,97	0,97		0,97	0,97
			1			1			1
	25 Zellen f = c = 255,3			25 Zellen f = c = 121,0			25 Zellen f = c = 121,0		
	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA
	0,87	0,88	0,88	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
		1,00	1,00		0,99	0,99		0,99	0,99
			1			1			1
	1.175 Zellen f = c = 188.925,6			1.175 Zellen f = c = 34.481,1			1.175 Zellen f = c = 34.481,1		
	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA	Mobilitäts- datenbasis	4-St.-Alg.	EVA
	0,99	0,99	0,99	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
		1	1		1	1		1	1
			1			1			1

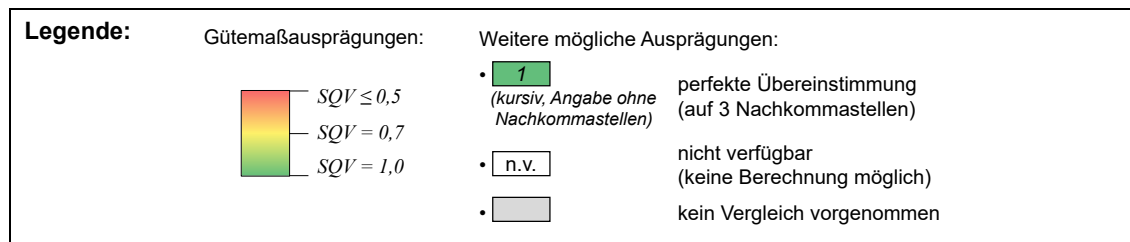


Abbildung 34: Vergleich der Zielwahlergebnisse für Experiment 3 (Bildquelle: eigene Darstellung).

5.4.2 Einfluss der inhaltlichen Segmentierung der Nachfrage

Experiment 4: Personengruppensegmentierung

Bei dieser Auswertung ist zu beachten, dass für personengruppenfeine Auswertungen nicht alle Vergleiche möglich sind, z.B. ist ein Vergleich des Aktivitätenpaares „Wohnen-Arbeit“ der Personengruppe „Erwerbstätige (Vollzeit)“ nur bei Modellinstanzen mit differenzierten Personengruppen möglich.

Die dargestellten Ergebnisse stammen von VISEM-Modellen. Nahezu identische Ergebnisse werden bei gleichem Experimentaufbau auch mit EVA-Modellen erreicht. Die Ergebnisse der EVA-Modelle sind in Anhang 9 dargestellt.

Vergleich der Verkehrserzeugungsergebnisse

Die Verkehrserzeugungsergebnisse (siehe Abbildung 35) sind auf allen Vergleichs- und Aggregationsebenen nahezu deckungsgleich. Die minimalen Abweichungen lassen sich mit den bereits erwähnten Annahmen der Verkehrserzeugung (Verwendung globaler Parameter in den makroskopischen Modellen) erklären.

Legende:	Gütemaßausprägungen:		Weitere mögliche Ausprägungen:	
		$SQV \leq 0,5$	• 1	perfekte Übereinstimmung (auf 3 Nachkommastellen)
		$SQV = 0,7$	• <i>(kursiv, Angabe ohne Nachkommastellen)</i>	
		$SQV = 1,0$	• n.v.	nicht verfügbar (keine Berechnung möglich)
			•	kein Vergleich vorgenommen

Abbildung 35: Vergleich der Verkehrserzeugungsergebnisse auf verschiedenen Aggregationsebenen für Experiment 4 (Bildquelle: eigene Darstellung).

Vergleich der Zielwahlergebnisse

Wie schon in den bisherigen Experimenten zeigt die Auswertung der Zielwahlergebnisse in Abbildung 36 einerseits, dass die Mobilitätsdatenbasen (zumindest in den niedrigen Aggregationsstufen) unzureichend abgebildet werden, aber auch dass die Übereinstimmung mit zunehmender Aggregation der Ergebnisse zunimmt. Dies liegt an den bereits in Experiment 1 genannten Gründen (mangelhafte Spezifikation, standardisierte Kalibrierung).

Beim Vergleich der Modelle untereinander wird die Erwartung bestätigt, dass die Modelle mit einer Personengruppe besser mit den Modellen mit zwei Personengruppen und personengruppenübergreifendem Randsummenausgleich übereinstimmen als mit den Modellen mit zwei Personengruppen ohne personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich.

WA-Nachfrage	mwSQV (Matrix)			mwSQV (Dreiecksnetz)			mwSQV (Reiseweitenverteilung)			SQV (Nachfragematrixsumme)		
	5 Zellen f = 0,05 n = 20			5 Zellen f = 0,07143 n = 14			5 Zellen			5 Zellen n = 1		
	Mobilitätsdatenbasis	Modell (1PG)	Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis	Modell (1PG)	Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis	f = 0,20 n = 5	Modell (1PG)	Mobilitätsdatenbasis	f = c = 449,3	
	Modell (1PG)			Modell (1PG)			Modell (1PG)	f = 0,17 n = 6		Modell (1PG)	f = c = 390,0	
	Modell (2PG, oRSA)			Modell (2PG, oRSA)			Modell (2PG, oRSA)	f = 0,17 n = 6		Modell (2PG, oRSA)	f = c = 394,9	
		0,65	0,65		0,65	0,65		0,71	0,70		0,88	0,89
		0,97	1,00		0,98	1,00		0,98	1,00		0,99	1
			0,97			0,98			0,98			0,99
25 Zellen f = 0,00167 n = 600			25 Zellen f = 0,00769 n = 130			25 Zellen			25 Zellen n = 1			
Mobilitätsdatenbasis	Modell (1PG)	Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis	Modell (1PG)	Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis	f = 0,10 n = 10	Modell (1PG)	Mobilitätsdatenbasis	f = c = 376,3		
Modell (1PG)			Modell (1PG)			Modell (1PG)	f = 0,10 n = 10		Modell (1PG)	f = c = 386,8		
Modell (2PG, oRSA)			Modell (2PG, oRSA)			Modell (2PG, oRSA)	f = 0,10 n = 10		Modell (2PG, oRSA)	f = c = 389,2		
	0,44	0,44		0,53	0,53		0,75	0,74		0,97	0,97	
	0,94	1,00		0,97	1,00		0,99	1		0,99	1	
		0,94			0,97			0,99			0,99	
1.175 Zellen f = 7,2E-7 n = 1,4E+6			1.175 Zellen f = 0,00014 n = 7.030			1.175 Zellen			1.175 Zellen n = 1			
Mobilitätsdatenbasis	Modell (1PG)	Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis	Modell (1PG)	Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis	f = 0,10 n = 10	Modell (1PG)	Mobilitätsdatenbasis	f = c = 223.406,7		
Modell (1PG)			Modell (1PG)			Modell (1PG)	f = 0,10 n = 10		Modell (1PG)	f = c = 229.125,8		
Modell (2PG, oRSA)			Modell (2PG, oRSA)			Modell (2PG, oRSA)	f = 0,10 n = 10		Modell (2PG, oRSA)	f = c = 229.250,6		
	0,41	0,40		0,62	0,63		0,85	0,85		0,98	0,98	
	0,77	0,96		0,76	0,97		0,98	1,00		1,00	1	
		0,74			0,75			0,98			1,00	

Einflussgrößen auf die Qualität von Verkehrsnachfragemodellen

AW-Nachfrage

5 Zellen
f = 0,05
n = 20

Mobilitätsdatenbasis

Modell (1PG)

Modell (2PG, oRSA)

0,65

0,65

0,65

0,97

1,00

0,97

25 Zellen
f = 0,00167
n = 600

Mobilitätsdatenbasis

Modell (1PG)

Modell (2PG, oRSA)

0,44

0,44

0,44

0,94

1,00

0,94

1.175 Zellen
f = 7,2E-7
n = 1,4E+6

Mobilitätsdatenbasis

Modell (1PG)

Modell (2PG, oRSA)

0,41

0,40

0,41

0,77

0,96

0,74

5 Zellen
f = 0,07143
n = 14

Mobilitätsdatenbasis

Modell (1PG)

Modell (2PG, oRSA)

0,65

0,65

0,65

0,98

1,00

0,98

25 Zellen
f = 0,00769
n = 130

Mobilitätsdatenbasis

Modell (1PG)

Modell (2PG, oRSA)

0,53

0,53

0,53

0,97

1,00

0,97

1.175 Zellen
f = 0,00014
n = 7.030

Mobilitätsdatenbasis

Modell (1PG)

Modell (2PG, oRSA)

0,62

0,63

0,61

0,76

0,97

0,75

5 Zellen

Mobilitätsdatenbasis

Modell (1PG)

Modell (2PG, oRSA)

f = 0,20
n = 5

f = 0,14
n = 7

f = 0,14
n = 7

0,71

0,70

0,71

0,98

1,00

0,98

25 Zellen

Mobilitätsdatenbasis

Modell (1PG)

Modell (2PG, oRSA)

f = 0,10
n = 10

f = 0,10
n = 10

f = 0,10
n = 10

0,74

0,74

0,74

0,99

1

0,99

1.175 Zellen

Mobilitätsdatenbasis

Modell (1PG)

Modell (2PG, oRSA)

f = 0,10
n = 10

f = 0,10
n = 10

f = 0,10
n = 10

0,85

0,85

0,85

0,98

1,00

0,98

5 Zellen
n = 1

Mobilitätsdatenbasis

Modell (1PG)

Modell (2PG, oRSA)

f = c = 449,3

f = c = 390,0

f = c = 394,9

0,88

0,89

0,88

0,99

1

0,99

25 Zellen
n = 1

Mobilitätsdatenbasis

Modell (1PG)

Modell (2PG, oRSA)

f = c = 376,3

f = c = 386,8

f = c = 389,2

0,97

0,97

0,97

0,99

1

0,99

1.175 Zellen
n = 1

Mobilitätsdatenbasis

Modell (1PG)

Modell (2PG, oRSA)

f = c = 223.406,7

f = c = 229.125,8

f = c = 229.250,6

0,98

0,98

0,98

1,00

1

1,00

WA-Nachfrage (Vollzeit-Erwerbstätige)

5 Zellen
f = 0,05
n = 20

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

0,60

0,60

0,98

25 Zellen
f = 0,00167
n = 600

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

0,33

0,33

0,90

1.175 Zellen
f = 7,2E-7
n = 1,4E+6

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

0,40

0,40

0,74

5 Zellen
f = 0,07143
n = 14

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

0,60

0,60

0,97

25 Zellen
f = 0,00769
n = 130

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

0,50

0,50

0,93

1.175 Zellen
f = 0,00014
n = 7.030

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

0,62

0,61

0,75

5 Zellen

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

f = 0,25
n = 4

f = 0,20
n = 5

0,71

0,71

0,99

25 Zellen

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

f = 0,10
n = 10

f = 0,10
n = 10

0,66

0,66

0,98

1.175 Zellen

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

f = 0,10
n = 10

f = 0,10
n = 10

0,87

0,86

0,98

5 Zellen
n = 1

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

f = c = 347,4

f = c = 306,5

0,90

0,89

0,99

25 Zellen
n = 1

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

f = c = 255,3

f = c = 292,4

0,87

0,88

1,00

1.175 Zellen
n = 1

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

f = c = 188.925,6

f = c = 191.794,0

0,99

0,99

1

AW-Nachfrage (Vollzeit-Erwerbstätige)

5 Zellen
f = 0,05
n = 20

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

0,60

0,60

0,98

25 Zellen
f = 0,00167
n = 600

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

0,33

0,33

0,90

1.175 Zellen
f = 7,2E-7
n = 1,4E+6

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

0,40

0,40

0,74

5 Zellen
f = 0,07143
n = 14

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

0,60

0,60

0,97

25 Zellen
f = 0,00769
n = 130

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

0,50

0,50

0,93

1.175 Zellen
f = 0,00014
n = 7.030

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

0,62

0,61

0,75

5 Zellen

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

f = 0,25
n = 4

f = 0,17
n = 6

0,71

0,71

0,99

25 Zellen

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

f = 0,11
n = 9

f = 0,10
n = 10

0,68

0,68

0,98

1.175 Zellen

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

f = 0,10
n = 10

f = 0,10
n = 10

0,87

0,86

0,98

5 Zellen
n = 1

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

f = c = 347,4

f = c = 306,5

0,90

0,89

0,99

25 Zellen
n = 1

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

f = c = 255,3

f = c = 292,4

0,87

0,88

1,00

1.175 Zellen
n = 1

Mobilitätsdatenbasis

Modell (2PG, oRSA)

f = c = 188.925,6

f = c = 191.794,0

0,99

0,99

1

5.4.3 Einfluss von Messfehlern bei Mobilitätsverhaltensdaten

Experiment 5: Stichprobengröße der Mobilitätsverhaltensbefragungen

Vergleich der Verkehrserzeugungsergebnisse

Allgemein muss bei den Auswertungen der Einfluss der Stochastik bei der Stichprobenziehung bedacht werden. Somit kann es vorkommen, dass kleinere Stichproben ein besseres Ergebnis als große Stichproben liefern, wenn „zufällig“ die besser repräsentierenden Agenten gezogen werden. Problematisch ist es hierbei, wenn manche Aktivitätenpaare bzw. -ketten nicht gezogen werden, weil beim Stichprobenziehen nur darauf geachtet wird, dass alle Personengruppen repräsentiert sind. Ist die Grundgesamtheit groß bzw. verhaltenshomogen genug, werden auch bei kleinen Stichproben genug Agenten gezogen, sodass alle Wegeketten bzw. Aktivitätenpaare enthalten sind und somit im Modell abgebildet werden können. Dies ist z.B. im genutzten 1.175-Zellen-Netzmodell der Fall. Bei den anderen beiden Modellen (5-Zellen- und 25-Zellen-Netzmodell) ist die Grundgesamtheit zu klein, sodass dort Wegeketten bzw. Aktivitätenpaare mit sehr geringer Nachfrage nicht immer abgebildet werden. In Abbildung 37 ist das daran erkennbar, dass es für manche Vergleiche keinen Wert gibt⁶⁴.

Unter Berücksichtigung der genannten Einschränkungen, lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse für die Vergleiche mit den Mobilitätsdatenbasen sowie mit den mittleren Längsschnittmodellen relativ stark schwanken. Die Mobilitätsdatenbasen werden insgesamt gut abgebildet. Bei den mittleren Längsschnittmodellen lässt sich eine Abnahme der Abbildungsgenauigkeit nur tendenziell bestätigen.

Vor allem bei den Aktivitätenpaaren mit geringer Nachfrage (Wohnen-Einkaufen (WE) und Einkaufen-Arbeit (EA)), zeigt sich – neben der erwähnten teilweise fehlenden Abbildung im Modell – eine sehr gute Übereinstimmung. Bei genauerer Betrachtung ist zu erkennen, dass das personenbezogene Verkehrsaufkommen, was hierbei bewertet wird, sehr klein ist. Der verwendete *SQV*-Skalierungsfaktor ist mit $f=1$ zu hoch angesetzt, wodurch das *SQV*-Gütemaß nicht streng genug ist. Da dieser Wert aber für alle Aktivitätenpaare gleich gelten soll, wird er im Folgenden nicht angepasst.

⁶⁴ In diesem Fall steht „n.v.“ (nicht verfügbar) in dem Feld. Dieser Fall tritt ein, wenn die Summe der Vergleichsmatrix gleich 0 ist, während die Summe der Referenzmatrix ungleich 0 ist. Sind beide Matrixsummen gleich 0, bildet das Modell die Referenz korrekt ab und es wird der Wert 1 angezeigt.

[illegible]

WE-Nachfrage							
5 Zellen	Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	
		0,99	0,99	0,98	n.v.	1	
	Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	0,99	1,00	0,94	n.v.	n.v.	
	25 Zellen	Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)
			1	1,00	1	1	1
Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)		n.v.	1,00	n.v.	n.v.	n.v.	
1.175 Zellen		Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)
			0,99	0,99	0,99	0,99	1,00
	Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	0,99	0,99	1,00	0,99	0,99	

EW-Nachfrage							
5 Zellen	Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	
		0,97	0,91	0,97	0,94	0,90	
	Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	0,98	0,98	0,98	0,94	1,00	
	25 Zellen	Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)
			0,93	0,93	0,93	0,95	0,91
Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)		0,95	0,98	0,97	0,87	0,79	
1.175 Zellen		Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)
			0,97	0,97	0,96	0,95	0,94
	Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	0,93	0,95	0,97	0,95	0,92	

5 Zellen	Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	
		1	1,00	0,99	n.v.	1	
	Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	0,99	1,00	0,94	n.v.	n.v.	
	25 Zellen	Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)
			1	0,99	1	1	1
Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)		n.v.	1,00	n.v.	n.v.	n.v.	
1.175 Zellen		Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)
			1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	0,99	0,99	1,00	0,99	0,99	

5 Zellen	Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	
		1	1,00	1,00	0,94	0,98	
	Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	0,98	0,98	0,98	0,94	1,00	
	25 Zellen	Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)
			1	1,00	0,99	0,95	0,99
Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)		0,95	0,98	0,97	0,87	0,79	
1.175 Zellen		Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)
			1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	0,93	0,95	0,97	0,95	0,92	

AE-Nachfrage	5 Zellen	Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	0,98	1,00	0,97	0,96	0,97	
			Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	0,99	0,99	0,98	0,96	1,00	
	25 Zellen	Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	0,95	0,95	0,94	0,97	0,94	
			Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	0,96	0,99	0,98	0,91	0,85	
	1.175 Zellen	Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	
			Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	0,95	0,97	0,98	0,97	0,94	
	EA-Nachfrage	5 Zellen	Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	1,00	0,99	0,99	n.v.	1
				Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	1,00	1,00	0,96	n.v.	n.v.
		25 Zellen	Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	1	1,00	1	1	1
				Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	n.v.	1,00	n.v.	n.v.	n.v.
1.175 Zellen		Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00	
			Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	0,99	0,99	1,00	1,00	0,99	
		5 Zellen	Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	1	1,00	0,99	n.v.	1
				Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	0,99	1,00	0,94	n.v.	n.v.
		25 Zellen	Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	1	0,99	1	1	1
				Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	n.v.	1,00	n.v.	n.v.	n.v.
	1.175 Zellen	Mobilitätsdatenbasis der jeweiligen Stichprobe	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
			Längsschnittmodell (aller Verkehrstage)	0,99	0,99	1,00	0,99	0,99	
	Legende:		Gütemaßausprägungen:			Weitere mögliche Ausprägungen:			
	<div><div></div><div>$SQV \leq 0,5$</div></div> <div><div></div><div>$SQV = 0,7$</div></div> <div><div></div><div>$SQV = 1,0$</div></div>					<div><div>1</div><div>(kursiv, Angabe ohne Nachkommastellen)</div></div> <div><div>n.v.</div><div>nicht verfügbar (keine Berechnung möglich)</div></div> <div><div></div><div>kein Vergleich vorgenommen</div></div>			
						<div>perfekte Übereinstimmung (auf 3 Nachkommastellen)</div> <div>nicht verfügbar (keine Berechnung möglich)</div> <div>kein Vergleich vorgenommen</div>			

Abbildung 37: Vergleich der Verkehrserzeugungsergebnisse auf verschiedenen Aggregationsebenen für Experiment 5 (Bildquelle: eigene Darstellung).

Vergleich der Zielwahlergebnisse

Ähnlich wie bei den Verkehrserzeugungsergebnissen zeigen die Zielwahlergebnisse (siehe Abbildung 38) für den Vergleich mit beiden Referenzen (Mobilitätsdatenbasen der Stichproben und Längsschnittmodelle) stark schwankende Übereinstimmungen. Allgemein können auch hier die in Experiment 1 genannten Gründe (mangelhafte Spezifikation, standardisierte Kalibrierung) angeführt werden.

Speziell beim Vergleich der Längsschnittmodelle mit den Querschnittmodellen lässt sich der Einfluss der Stichprobengröße kaum erkennen. Mit zunehmender Aggregation der Ergebnisse nimmt die Übereinstimmung zu. Jedoch zeigt sich im Gegensatz zu den vorherigen Experimenten der Einfluss der kleinen Nachfragesegmente (z.B. des Aktivitätenspaars Einkaufen-Arbeiten (EA)), die auch in aggregierter Form nicht gut abgebildet werden.

Die formulierten Erwartungen, dass die Abweichungen mit sinkender Stichprobengröße zunehmen, lassen sich durch das Experiment somit nicht bestätigen. Dies liegt zu einem großen Teil am Einfluss der Stochastik, dem im Experimentaufbau nicht adäquat begegnet wird. Für jede Stichprobengröße und jeden Untersuchungsraum wird eine Stichprobe gezogen. Da es sich hierbei um zufällige Stichproben handelt, ist es möglich, dass eine kleine Stichprobe eine bessere Übereinstimmung als eine große Stichprobe ergibt. Diesem Problem könnte mittels stochastischer Simulation (siehe Kapitel 3.4.2.3) begegnet werden. Dabei werden mehrere Stichproben für jede Stichprobengröße und jeden Untersuchungsraum gezogen. Mit der derzeitigen Methodik hätte das zur Folge, dass entsprechend mehr makroskopische Modelle aufgebaut, kalibriert und ausgewertet werden müssten. Dies würde z.B. bedeuten, dass die derzeitige Anzahl von 15 Modellen um den Faktor der Simulationsanzahl (z.B. 30 Simulationen je Stichprobengröße und Untersuchungsraum) auf 450 aufzubauende Modelle anwachsen würde. Dieser Aufwand ist mit dem beschriebenen Vorgehen nicht zu handhaben. Nichtsdestotrotz wäre ein zusätzlicher Vorteil dieser Erweiterung, dass bei einer größeren Anzahl an Stichproben je Stichprobengröße und Untersuchungsraum auch die kleinen Nachfragesegmente entsprechend berücksichtigt würden.

[illegible]

AW-Nachfrage									
msSYr (Matrix)					msSYr (Dreiecksmatrix)				
5 Zellen $f = 0,05$ $n = 20$ Modellstärken- basis der jeweiligen Stichprobe	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	5 Zellen $f = 0,0525$ $n = 16$ Modellstärken- basis der jeweiligen Stichprobe	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)
	0,54	0,60	0,48	0,53	0,56		0,76	0,78	0,67
	1	1	1	1	1		1	1	1
	1	1	1	1	1		1	1	1
	1	1	1	1	1		1	1	1
25 Zellen $f = 0,00167$ $n = 600$ Modellstärken- basis der jeweiligen Stichprobe	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	25 Zellen $f = 0,00746$ $n = 134$ Modellstärken- basis der jeweiligen Stichprobe	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)
	0,32	0,35	0,28	0,28	0,15		0,55	0,56	0,54
	0,72	0,74	0,76	0,68	0,59		0,87	0,88	0,85
	1	1	1	1	1		1	1	1
	1	1	1	1	1		1	1	1
1.175 Zellen $f = 7,2E-7$ $n = 1,4E+6$ Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	1.175 Zellen $f = 0,00014$ $n = 7,230$ Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)
	0,37	0,37	0,26	0,19	0,11		0,64	0,65	0,64
	0,71	0,77	0,75	0,77	0,77		0,88	0,72	0,71
	1	1	1	1	1		1	1	1
	1	1	1	1	1		1	1	1
msSYr (Relevanzverteilung)					msSYr (Nachfragemarktsumme)				
5 Zellen $f = 0,0525$ $n = 16$ Modellstärken- basis der jeweiligen Stichprobe	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	5 Zellen $n = 1$ Modellstärken- basis der jeweiligen Stichprobe	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)
	0,77	0,80	0,73	0,76	0,75		0,91	0,91	0,91
	1	1	1	1	1		1,00	0,99	0,99
	1	1	1	1	1		1	1	1
	1	1	1	1	1		1	1	1
25 Zellen $f = 0,010$ $n = 60$ Modellstärken- basis der jeweiligen Stichprobe	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	25 Zellen $n = 1$ Modellstärken- basis der jeweiligen Stichprobe	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)
	0,70	0,73	0,77	0,67	0,64		0,97	0,97	0,96
	0,92	0,93	0,92	0,95	0,95		0,99	0,99	0,95
	1	1	1	1	1		1	1	1
	1	1	1	1	1		1	1	1
1.175 Zellen $f = 0,010$ $n = 1$ Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	1.175 Zellen $n = 1$ Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)
	0,92	0,93	0,92	0,95	0,95		0,99	0,99	0,99
	0,94	0,96	0,96	0,98	0,99		0,91	0,95	0,95
	1	1	1	1	1		1	1	1
	1	1	1	1	1		1	1	1

WE-Nachfrage											
msQV (Markt)					msQV (Dreiecknetz)						
5 Zellen f = 0,05 n = 20	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	5 Zellen f = 0,0625 n = 16	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)
	0,09	0,11	0,11	n.v.	1		0,20	0,23	0,22	n.v.	1
	0,09	0,09	0,09	n.v.	n.v.		1,00	1,00	1,00	n.v.	n.v.
	0,09	0,09	0,09	n.v.	n.v.		1,00	1,00	1,00	n.v.	n.v.
	0,09	0,09	0,09	n.v.	n.v.		1,00	1,00	1,00	n.v.	n.v.
25 Zellen f = 0,0167 n = 600	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	25 Zellen f = 0,00746 n = 134	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)
	1	n.v.	1	1	1		1	n.v.	1	1	1
	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.		0,98	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.		0,98	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.		0,98	n.v.	n.v.	n.v.	n.v.
1.175 Zellen f = 0,00073 n = 1.4E+6	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	1.175 Zellen f = 0,00014 n = 7.020	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)
	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01		0,37	0,40	0,24	0,17	0,06
	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01		0,37	0,40	0,24	0,17	0,06
	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01		0,37	0,40	0,24	0,17	0,06
	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01		0,37	0,40	0,24	0,17	0,06
Langschnittemodell (aller Verkehrstage)	n.v.	0,48	n.v.	n.v.	n.v.	Langschnittemodell (aller Verkehrstage)	n.v.	0,98	n.v.	n.v.	n.v.
	n.v.	0,48	n.v.	n.v.	n.v.		n.v.	0,98	n.v.	n.v.	n.v.
	n.v.	0,48	n.v.	n.v.	n.v.		n.v.	0,98	n.v.	n.v.	n.v.
	n.v.	0,48	n.v.	n.v.	n.v.		n.v.	0,98	n.v.	n.v.	n.v.
	n.v.	0,48	n.v.	n.v.	n.v.		n.v.	0,98	n.v.	n.v.	n.v.
msQV (Reiserverteiler)											
5 Zellen f = 0,50 n = 2	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	25 Zellen f = 0,020 n = 5	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)
	0,74	0,46	0,74	n.v.	1		1,00	1,00	1,00	n.v.	n.v.
	0,74	0,46	0,74	n.v.	1		1,00	1,00	1,00	n.v.	n.v.
	0,74	0,46	0,74	n.v.	1		1,00	1,00	1,00	n.v.	n.v.
	0,74	0,46	0,74	n.v.	1		1,00	1,00	1,00	n.v.	n.v.
1.175 Zellen f = 0,10 n = 10	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	25 Zellen f = 0,010 n = 10	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)
	0,92	0,97	0,95	0,96	0,97		0,92	0,97	0,95	0,96	0,97
	0,92	0,97	0,95	0,96	0,97		0,92	0,97	0,95	0,96	0,97
	0,92	0,97	0,95	0,96	0,97		0,92	0,97	0,95	0,96	0,97
	0,92	0,97	0,95	0,96	0,97		0,92	0,97	0,95	0,96	0,97
msQV (Nachfrageverteilung)											
5 Zellen n = 1	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	25 Zellen n = 1	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)
	0,67	0,65	0,64	n.v.	1		0,65	0,63	0,64	n.v.	1
	0,67	0,65	0,64	n.v.	1		0,65	0,63	0,64	n.v.	1
	0,67	0,65	0,64	n.v.	1		0,65	0,63	0,64	n.v.	1
	0,67	0,65	0,64	n.v.	1		0,65	0,63	0,64	n.v.	1
Langschnittemodell (aller Verkehrstage)	f = c = 1,0	f = c = 1,0	f = c = 1,0	f = c = 1,0	f = c = 1,0	Langschnittemodell (aller Verkehrstage)	f = c = 1,0	f = c = 1,0	f = c = 1,0	f = c = 1,0	f = c = 1,0
	0,77	0,76	0,91	0,85	0,71		0,77	0,76	0,91	0,85	0,71
	0,77	0,76	0,91	0,85	0,71		0,77	0,76	0,91	0,85	0,71
	0,77	0,76	0,91	0,85	0,71		0,77	0,76	0,91	0,85	0,71
	0,77	0,76	0,91	0,85	0,71		0,77	0,76	0,91	0,85	0,71

EW-Nachfrage													
msQR (Markt)					msQR (Dienstreiz)								
5 Zellen f = 0,05 n = 20	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	5 Zellen f = 0,02625 n = 16	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)		
	0,33	0,20	0,34	0,28	0,23		0,47	0,35	0,49	0,56	0,32		
	Modellkriterien- basis der jeweiligen Stichprobe												
25 Zellen f = 0,0167 n = 600	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	25 Zellen f = 0,00746 n = 154	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)		
	0,30	0,20	0,13	0,06	0,07		0,51	0,51	0,37	0,21	0,20		
	Modellkriterien- basis der jeweiligen Stichprobe												
Langschrittmittel (aller Verkehrstage)	0,42	0,47	0,43	0,71	0,27	Langschrittmittel (aller Verkehrstage)	0,33	0,57	0,54	0,88	0,36		
1,175 Zellen f = 7,5E-7 n = 1,4E+6	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	1,175 Zellen f = 0,00014 n = 7,030	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)		
	0,18	0,14	0,08	0,05	0,04		0,58	0,50	0,49	0,43	0,45		
	Modellkriterien- basis der jeweiligen Stichprobe												
Langschrittmittel (Verkehrstage Mo-Fr)	0,62	0,77	0,69	0,75	0,76	Langschrittmittel (Verkehrstage Mo-Fr)	0,62	0,80	0,70	0,76	0,79		
msQR (Reisewertungswilling)					msQR (Nachfrageverzerrung)								
5 Zellen f = 0,25 n = 450	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	5 Zellen f = 0,13 n = 135	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)		
	0,65	0,62	0,81	0,78	0,74		0,65	0,62	0,81	0,78	0,74		
	Modellkriterien- basis der jeweiligen Stichprobe												
25 Zellen f = 0,05 n = 20	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	25 Zellen f = 0,02625 n = 16	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)		
	0,65	0,62	0,81	0,78	0,74		0,47	0,35	0,49	0,56	0,32		
	Modellkriterien- basis der jeweiligen Stichprobe												
Langschrittmittel (aller Verkehrstage)	f = 0,25 n = 450 100%: f = c = 54,0 75%: f = c = 39,0 25%: f = c = 13,5 10%: f = c = 5,4 5%: f = c = 2,7	0,65	0,62	0,81	0,78	0,74	Langschrittmittel (aller Verkehrstage)	f = 0,13 n = 135 100%: f = c = 52,0 75%: f = c = 37,5 25%: f = c = 12,5 10%: f = c = 5,0 5%: f = c = 2,5	0,64	0,61	0,75	0,66	0,67
1,175 Zellen f = 1 n = 1	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	1,175 Zellen f = 1 n = 1	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)		
	0,92	0,86	0,93	0,95	0,96		0,92	0,89	0,96	0,97	0,97		
	Modellkriterien- basis der jeweiligen Stichprobe												
Langschrittmittel (Verkehrstage Mo-Fr)	f = c = 15,742,8	0,61	0,71	0,80	0,72	0,59	Langschrittmittel (Verkehrstage Mo-Fr)	f = c = 45,2	0,79	0,89	0,86	0,61	0,47

[illegible]

EA-Nachfrage													
mms ^{SOI} (Matrix)					mms ^{SOI} (Dreiecksmatrix)								
5 Zellen f = 0,03 n = 20	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	5 Zellen f = 0,0625 n = 16	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)		
	0,00	0,11	0,10	n.v.	f		0,22	0,23	0,22	n.v.	f		
	Modellstufen- basis der jeweiligen Stichprobe												
	Modellstufen- basis der jeweiligen Stichprobe												
	Modellstufen- basis der jeweiligen Stichprobe												
25 Zellen f = 0,00167 n = 600	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	25 Zellen f = 0,00746 n = 134	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)		
							1,00	1,00	1,00	n.v.	n.v.		
	Modellstufen- basis der jeweiligen Stichprobe												
	Modellstufen- basis der jeweiligen Stichprobe												
	Modellstufen- basis der jeweiligen Stichprobe												
1,175 Zellen f = 7,5E-7 n = 1,4E+6	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	1,175 Zellen f = 0,00014 n = 7,030	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)		
	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01		0,36	0,38	0,24	0,15	0,06		
	Modellstufen- basis der jeweiligen Stichprobe												
	Modellstufen- basis der jeweiligen Stichprobe												
	Modellstufen- basis der jeweiligen Stichprobe												
mms ^{SOI} (Reisewertverteilung)													
5 Zellen	100%; f = 0,50 f = 0,50 m = 2	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	25 Zellen	100%; f = n.v. f = n.v. m = n.v.	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)
	75%; f = 0,50 f = 0,50 m = 2							75%; f = n.v. f = n.v. m = n.v.					
	25%; f = 0,50 f = 0,50 m = 2							25%; f = n.v. f = n.v. m = n.v.					
	10%; f = 0,17 f = 0,17 m = 6							10%; f = n.v. f = n.v. m = n.v.					
	5%; f = 1,00 f = 1,00 m = 1							5%; f = 1,00 f = 1,00 m = 1					
1,175 Zellen	100%; f = 0,10 f = 0,10 m = 10	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	1,175 Zellen f = c = 0,8	100%; f = c = 0,0 f = c = 0,0 m = n.v.	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)
	75%; f = 0,10 f = 0,10 m = 10							75%; f = c = 0,0 f = c = 0,0 m = n.v.					
	25%; f = 0,10 f = 0,10 m = 10							25%; f = c = 0,0 f = c = 0,0 m = n.v.					
	10%; f = 0,10 f = 0,10 m = 10							10%; f = c = 0,0 f = c = 0,0 m = n.v.					
	5%; f = 1,00 f = 1,00 m = 1							5%; f = c = 0,0 f = c = 0,0 m = n.v.					
mms ^{SOI} (Nachfragegrößensumme)													
5 Zellen n = 1	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	25 Zellen n = 1	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)		
	0,86	0,92	0,85	n.v.	f		0,86	0,92	0,85	n.v.	f		
	Modellstufen- basis der jeweiligen Stichprobe												
	Modellstufen- basis der jeweiligen Stichprobe												
	Modellstufen- basis der jeweiligen Stichprobe												
1,175 Zellen n = 1	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)	1,175 Zellen f = c = 9150	Querschnittsmodell (100% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (75% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (25% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (10% Stichprobe eines Verkehrstages)	Querschnittsmodell (5% Stichprobe eines Verkehrstages)		
	0,91	0,94	0,81	0,69	0,55		0,91	0,94	0,81	0,69	0,55		
	Modellstufen- basis der jeweiligen Stichprobe												
	Modellstufen- basis der jeweiligen Stichprobe												
	Modellstufen- basis der jeweiligen Stichprobe												

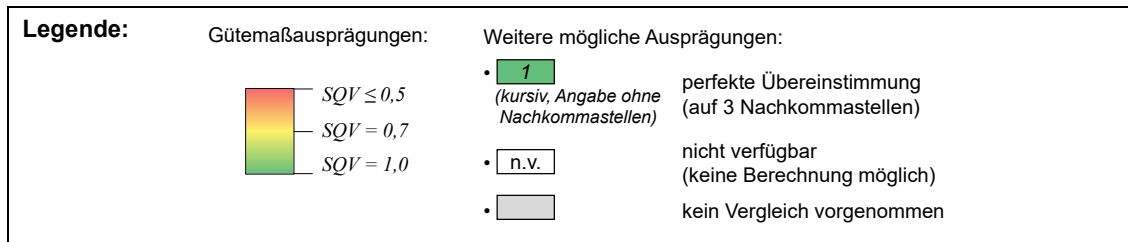


Abbildung 38: Vergleich der Zielwahlergebnisse auf verschiedenen Aggregationsebenen für Experiment 5 (Bildquelle: eigene Darstellung).

5.4.4 Einfluss der Aggregation von Modellergebnissen

Hinsichtlich des Einflusses der Aggregation von Modellergebnissen wird erwartet, dass die Übereinstimmung zwischen den jeweiligen Referenz- und Vergleichsmodellen mit zunehmender Aggregation steigt. Um diesen Einfluss zu untersuchen, werden selbstskalierende SQV -basierte Gütemaße für die Beurteilung der Ergebnisse genutzt.

Nach Auswertung der in Experiment 1 bis 5 gezeigten Ergebnisse kann die formulierte Erwartung unter folgenden Bedingungen bestätigt werden:

- die Anzahl der Vergleichselemente der einzelnen Aggregationsebenen liegen nicht in einer ähnlichen Größenordnung und
- die Größe des betrachteten Nachfragesegments ist ausreichend groß.

5.5 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Experimente zusammengefasst und eingeordnet. Tabelle 17 gibt eine Übersicht über die Spezifikationen, Erwartungen und Ergebnisse der Experimente.

Die Annahme, dass die geschätzten makroskopischen Modelle die Mobilitätsdatenbasen gut abbilden, kann nicht in Gänze bestätigt werden. Bei Betrachtung des Verkehrsaufkommens ergibt sich auf beiden untersuchten Aggregationsebenen durchweg eine sehr gute Übereinstimmung. Bei der Bewertung der Zielwahlergebnisse ist es jedoch von der Aggregationsebene abhängig, wie gut die makroskopischen Modelle und die Mobilitätsdatenbasen übereinstimmen. Diesbezüglich kann allgemein über alle Experimente und Auswertungen hinweg festgestellt werden, dass die Übereinstimmung mit steigendem Aggregationsgrad zunimmt. Gründe für eine generell eher schlechte Übereinstimmung auf den niedrigen Aggregationsebenen sind eine mangelhafte Spezifikation, die nicht alle wichtigen Einflussgrößen der zugrundeliegenden Wirkungsmodelle abdeckt, sowie eine (aufgrund der großen Anzahl an Modellen notwendige) standardisierte Kalibrierung.

Exp.	Einflussgröße	Personengruppen	Aktivitäten	Erwartung an das Modell	Ergebnis
1	Modelltheorie	<ul style="list-style-type: none"> Einwohner 	<ul style="list-style-type: none"> Arbeit (Wohnen) 	<p>Die Mobilitätsdatenbasen werden durch alle Modelltheorien sehr gut abgebildet.</p> <p>Alle Modelltheorien liefern für die Verkehrserzeugung und Zielwahl identische Ergebnisse.</p>	<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
2		<ul style="list-style-type: none"> Einwohner 	<ul style="list-style-type: none"> Arbeit Einkaufen (Wohnen) 	<p>Die Verkehrserzeugungsergebnisse der Aktivitätenpaare unterscheiden sich je nach Randsummenbedingungen (hart, weich, offen), Wohnortbezug (mit, ohne) und dem vorgenommenen Randsummenausgleich.</p> <p>Im Vergleich mit den Mobilitätsdatenbasen liefern aktivitätenbasierte Wegekettenmodelle die besten Ergebnisse.</p>	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
3		<ul style="list-style-type: none"> Vollzeiterwerbstätige Teilzeiterwerbstätige 	<ul style="list-style-type: none"> Arbeit (Wohnen) 	<p>Alle Modelltheorien liefern identische Ergebnisse für die Verkehrserzeugung.</p> <p>Im Vergleich mit den Mobilitätsdatenbasen liefern Modelltheorien mit personengruppenübergreifendem Randsummenausgleich keine wesentlich besseren Ergebnisse.</p>	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
4	Segmentierung von Personengruppen	<ul style="list-style-type: none"> Vollzeiterwerbstätige Teilzeiterwerbstätige 	<ul style="list-style-type: none"> Arbeit (Wohnen) 	<p>Alle Modelltheorien liefern identische Ergebnisse für die Verkehrserzeugung.</p> <p>Modelle mit mehreren Personengruppen unterscheiden sich von Modellen ohne Personengruppen. Modelle ohne Personengruppen ähneln eher den Modellen mit Personengruppen und personengruppenübergreifendem Randsummenausgleich.</p>	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
5	Stichprobengröße	<ul style="list-style-type: none"> Einwohner 	<ul style="list-style-type: none"> Arbeit Einkaufen (Wohnen) 	Mit sinkender Stichprobengröße nimmt die Abweichung vom mittleren Längsschnittmodell allgemein zu.	<input type="checkbox"/>
Allg.	Aggregation der Modellergebnisse	-	-	Je aggregierter die Modellergebnisse untersucht werden, desto größer wird die Übereinstimmung.	<input checked="" type="checkbox"/>

Tabelle 17: Übersicht über die Spezifikationen, Erwartungen und Ergebnisse der Experimente.

Hinsichtlich der Modelltheorie wird festgestellt, dass die Ergebnisse für die einzelnen Modelltheorien unter bestimmten Voraussetzungen (symmetrische Kenngrößenmatrizen, harte Randsummenbedingungen) identisch sind. Zusammenfassend lassen die geringen Unterschiede in den Vergleichen zwischen den Modelltheorien an sich sowie zwischen den Modelltheorien und den Mobilitätsdatenbasen der Experimente 1 bis 3 den Schluss zu, dass die Wahl der Modelltheorie nur einen geringen Einfluss auf die Modellergebnisse hat.

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse des Experiments 4 die Bedeutung eines personen-gruppenübergreifenden Randsummenausgleichs, wenn mehrere Personengruppen um eine Siedlungsstrukturgröße konkurrieren. Nur mit einem solchen Randsummenausgleich wird sichergestellt, dass die Zielwahl für alle Personengruppen von der Attraktivität des Ziels (bzw. vom Aufwand, das Ziel zu erreichen) abhängt. Dies führt konkret bei Experiment 4 dazu, dass die Modelle mit zwei Personengruppen, die jedoch ein identisches Mobilitätsverhalten aufweisen, nur dann korrekt, d.h. wie eine Personengruppe, abgebildet werden, wenn ein personen-gruppenübergreifender Randsummenausgleich stattfindet.

Hinsichtlich der Stichprobengröße lassen sich keine klaren Ergebnisse benennen. Trotzdem wird aus dem Experiment ersichtlich, dass der Einfluss der Stichprobengröße von der Art der Stichprobenziehung und -gewichtung abhängt, z.B. um auch kleine Nachfrage-segmente adäquat abbilden zu können. Generell gilt es für nachfolgende Untersuchungen einen geeigneteren Ansatz zur Bestimmung des Stichprobenfehlers zu finden.

Einordnung der Ergebnisse

Bei der Auswertung und Einordnung der Ergebnisse müssen die getroffenen Modellannahmen (siehe Kapitel 5.3.1) berücksichtigt werden. Hierbei ist zu nennen, dass die Modelle sehr einfach strukturiert sind. Dies betrifft vor allem die abgebildeten Aktivitäten, Personengruppen, Modellstufen und Modi. Es wird zudem davon ausgegangen, dass alle Verkehrsangebotsdaten korrekt abgebildet werden, und es werden keine Interdependenzen der untersuchten Fehler angenommen.

Weiterhin ist zu beachten, dass die Annahmen der Mobilitätsdatenbasen, die mit dem Wegetagebuchgenerator erzeugt werden, von den makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen übernommen werden. Dies betrifft vor allem die Randsummenbedingungen der Aktivitäten. In der Praxis sind diese Randsummenbedingungen ein unbekannter Parameter in der Modellschätzung. Teilweise gilt dies auch für das eingesetzte Wahlmodell (Logit-Modell) in den mikroskopischen und makroskopischen Modellen. Hierbei ist aber die unterschiedliche Wirkung der Kapazitätsbegrenzung einer Siedlungsstrukturgröße zu beachten. Im Gegensatz zum makroskopischen Modell werden die Agenten bei der mikroskopischen Zielwahl sequentiell „abgearbeitet“. Dies kann dazu führen, dass einzelne Agenten „gezwungen“ sind, eine „unattraktive“ Verkehrszelle zu wählen.

Abschließend ist zu erwähnen, dass es neben den untersuchten Unterschieden zwischen mikroskopischen und makroskopischen Modellen natürlich auch Unterschiede zwischen den mikroskopischen Modellen und den dahinterstehenden Realitäten gibt. Dies gilt jedoch ausschließlich für die Nachfrage des 1.175-Zellen-Netzmodells, d.h. die Nachfrage des mikroskopischen Verkehrsnachfragemodells des Verbands Region Stuttgart. Im Rahmen dieser Arbeit wird dessen Modellqualität aber nicht untersucht – es sei hierfür auf HAUTZINGER ET AL. (2013, S. 45 ff.) verwiesen. Die Nachfrage der anderen Netzmodelle ist fiktiv und ohne einen realen Bezug.

[...] it does not seem helpful just to say that all models are wrong.

D. R. Cox in CHATFIELD (1995, S. 456)

6 Fazit

Verkehrsnachfragemodelle sind ein wichtiges und notwendiges Werkzeug der Verkehrsplanung. Weil sie Modelle sind, bilden sie die Realität immer vereinfacht ab. Dadurch entstehen Abweichungen zur Realität. Um komplexe Zusammenhänge im verkehrlichen Kontext zu reproduzieren, gibt es aber keine praktikablen Alternativen. Gerade aufgrund dieser Alternativlosigkeit müssen die Ergebnisse von Verkehrsnachfragemodellen einer gewissen Qualität genügen. Diese Qualität von Verkehrsnachfragemodellen stand im Fokus dieser Arbeit.

Nachdem Kapitel 2 eine Einführung in die für diese Arbeit relevanten Aspekte der Verkehrsnachfragemodellierung gegeben hat, wurden in Kapitel 3 die Unsicherheiten, die bei Verkehrsnachfragemodellen auftreten, erläutert. Anhand einer Metastudie von Ex-post-Analysen wurde gezeigt, aus welchen Gründen sich (in der Vergangenheit erstellte) Modellprognosen als ungenau erwiesen und in welchen Größenordnungen diese Ungenauigkeiten liegen. Die Metastudie kam zu dem Ergebnis, dass die Verkehrsnachfrage von Straßenbauprojekten im Mittel unterschätzt wird, während die Verkehrsnachfrage von Mautstraßenprojekten, Schienenbauprojekten und Bezugsfällen ohne Maßnahmen im Mittel überschätzt wird. Eine exemplarische Auflistung von juristischen Streitfällen zeigte darüber hinaus, welche Auswirkungen ungenaue Modellprognosen haben können. Darauf aufbauend wurde ein detaillierter Überblick über die Unsicherheiten, die im Rahmen der Verkehrsnachfragemodellierung auftreten, und die Methoden, die zur Abbildung der Unsicherheiten verwendet werden können, gegeben.

Aus vielerlei Gründen erscheint eine Abkehr vom derzeitigen Standard der Punktprognosen nicht realistisch – insbesondere bei großen und komplexen Modellen mit vielen unsicheren Eingangsdaten und Modellparametern. Derzeit scheint die Verwendung von Szenarienanalysen eine praktikable Herangehensweise für den Umgang mit Unsicherheiten zu sein. Hierbei werden plausible oder auch wünschenswerte Zukunftsvisionen erstellt und mit dem Modell berechnet. Ein solcher Ansatz hat zwar den Nachteil, dass er das Zusammenarbeiten von verschiedenen Fachbereichen erfordert. Gleichzeitig müssen aber nachfolgende Anwendungen der Modellergebnisse, wie z.B. in Lärm- oder Emissionsberechnungen, nicht angepasst werden.

Eine wichtige Voraussetzung dafür, dass Verkehrsnachfragemodelle im Rahmen der Entscheidungsfindung eingesetzt werden, ist das Vertrauen in die Modellergebnisse. Dieses Vertrauen lässt sich aufbauen, wenn die Modelle und ihre Ergebnisse qualitativ hochwertig, zuverlässig und transparent sind. In Kapitel 4 wurde ein standardisierter Qualitätsmanagementprozess beschrieben, der in jedem Schritt der Modellerstellung Prüfungen vorsieht und somit für eine vergleichbare Qualität von Verkehrsnachfragemodellen unerlässlich ist. Zu diesem Qualitätsmanagementprozess zählen Prüfungen auf fehlerhafte Eingangsdaten, Prüfungen der Parameter, Prüfungen der Modellergebnisse

und Prüfungen des Modellverhaltens (Sensitivitäts-, Realitäts- und Konsistenztests, ggf. auch die Untersuchung komplexer Szenarien). In diesem Zusammenhang wurde auch die Bedeutung einer guten Modelldokumentation aufgezeigt. Die Wirkungszusammenhänge, Modellannahmen und Unsicherheiten müssen darin klar und verständlich beschrieben werden.

Im Rahmen dieser Arbeit war es nicht möglich, alle potenziellen Einflussgrößen auf die Modellunsicherheit zu untersuchen. In Kapitel 5 wurden daher drei ausgewählte Unsicherheitseinflüsse überprüft:

- der Einfluss der verwendeten Modelltheorie (Spezifikationsfehler),
- der Einfluss der inhaltlichen Segmentierung der Nachfrage (Abstraktionsfehler) und
- der Einfluss der Stichprobengröße (Messfehler bei Mobilitätsverhaltensdaten).

Mit einem standardisierten Qualitätsmanagement war es möglich, spezifische Eigenschaften der Modelle zu prüfen und zu vergleichen. Hierzu wurden mehrere Gütemaße entwickelt und erprobt: der *mwSQV* der Nachfragematrix, der *mwSQV* einer Bestwegumlegung im Dreiecksnetz und der *mwSQV* der Reiseweitenverteilung. Die Entwicklung dieser Gütemaße umfasste zudem die notwendigen Arbeitsschritte, um die Gütemaße standardisiert anwenden zu können. Konkret sind dies die standardisierte Vorgehensweise zur Erzeugung von Dreiecksnetzen sowie die notwendige Methodik für eine standardisierte Bewertung von Kenngrößenverteilungen in äquiquantilen Verteilungsklassen.

Für die Untersuchungen wurden die Mobilitätsverhalten von mikroskopischen Populationen als Realität angenommen. Die Diskrepanzen zwischen mikroskopischen Modellen und der tatsächlichen Realität waren nicht Gegenstand dieser Arbeit. Die mikroskopischen Mobilitätsdatenbasen wurden mit makroskopischen Verkehrsnachfragemodellen reproduziert. Anschließend wurde der Grad der Annäherung mit den oben genannten selbstskalierenden Gütemaßen bestimmt. Insgesamt wurden hierbei 55 Verkehrsnachfragemodelle verschiedenster Spezifikation in drei Netzmodellgrößen erstellt. Das Auswertungsdesign war so gestaltet, dass zusätzlich zu den oben genannten Einflussgrößen auch der Einfluss der Aggregation von Modellergebnissen untersucht werden konnte.

Allgemein konnte festgestellt werden, dass die durchgeführte standardisierte Kalibrierung nie eine vollständige Übereinstimmung auf allen Aggregationsebenen erreicht – auch wenn die Erwartung bestätigt wurde, dass Mobilitätsdatenbasen und Modelle besser übereinstimmen, je stärker die Ergebnisse aggregiert werden. Generell wäre eine solche vollständige Übereinstimmung auch eine utopische Annahme, da Modelle immer eine gewisse Abstraktion beinhalten. Für reale Anwendungen muss daher vor der Modellerstellung entschieden werden, in welchen Auflösungen die Modellergebnisse bewertet und welche Kenngrößen hierfür herangezogen werden sollen. Zusätzlich ist es von Bedeutung, welche Gütemaße dafür herangezogen und welche Gütegrenzen für diese angelegt werden. Idealerweise werden diese Entscheidungen in der Modellspezifikation festgehalten.

Hinsichtlich der verwendeten Modelltheorie konnten für die Modellierung von Verkehrserzeugung und Zielwahl keine eindeutigen Vor- oder Nachteile von aktivitätenbasierten Einzelwegmodellen oder aktivitätenbasierten Wegekettensmodellen nachgewiesen werden. Bei der Untersuchung der inhaltlichen Segmentierung wurde deutlich, dass ein personengruppenübergreifender Randsummenausgleich wichtig ist. Bei der Auswahl der Modelltheorie sollte daher auch die softwareseitige Implementierung eines personengruppenübergreifenden Randsummenausgleichs geprüft werden. Zusätzlich sollte bei der Auswahl der verwendeten Optimierungsalgorithmen und ihrer Genauigkeitsschranken auf eine praktikable Rechenzeit geachtet werden. Die Auswirkungen des Stichprobenfehlers konnten nicht explizit benannt werden. Aus dem Experiment ließ sich aber dennoch ableiten, dass neben einer ausreichend großen Stichprobengröße die Gewichtung der Stichprobenelemente sehr wichtig ist. In diesem Zusammenhang ist es auch entscheidend, dass alle erwarteten Effekte (z.B. im Befragungszeitraum auftretende Aktivitätenpaare) abgebildet werden und dies auch im Stichprobendesign bzw. während der Stichprobenziehung berücksichtigt wird. Allgemein sollte schon bei der Datenerhebung auf eine breite Anwendbarkeit der Daten geachtet werden, z.B., dass verschiedene Modelltheorien mit dem Datensatz abbildbar sind.

Zusammenfassend lassen sich folgende Schlussfolgerungen für die Praxis der Verkehrsnachfragemodellierung ableiten:

- Modelle sind nur Abbilder der Realität und können diese nie vollkommen abbilden. Abweichungen von der Realität sind daher zu erwarten. Trotzdem sollte versucht werden, die Unsicherheiten, die auf die Modelle wirken, zu minimieren. Dies betrifft Fehler im Modellaufbau, bei den Eingangsdaten und beim Umgang mit dem Modell.
- Der Aufbau von Verkehrsnachfragemodellen muss von einem standardisierten Qualitätsmanagementprozess begleitet werden. Dieser beginnt mit der Formulierung einer detaillierten Spezifikation vor dem eigentlichen Beginn der Modellierung, umfasst sämtliche Überprüfungen im Rahmen der Verifizierung, Eingangsdatenprüfung und Validierung, und endet mit einer Dokumentation, die unter anderem alle Annahmen, Unsicherheiten und Einsatzgrenzen des Modells klar aufführt.
- Ungeachtet der Datengrundlage ist es aus Gründen der Abbildungsqualität von Verkehrserzeugung und Zielwahl unerheblich, ob aktivitätenbasierte Einzelwegmodelle oder aktivitätenbasierte Wegekettensmodelle verwendet werden. Ein personengruppenübergreifender Randsummenausgleich erweist sich hingegen als vorteilhaft.

Ausblick

Es gibt viele Trends für die Weiterentwicklung von Verkehrsnachfragemodellen. Dazu gehören technische Entwicklungen z.B. durch effizientere Software, schnellere Hardware oder umfassendere und besser verfügbare Eingangsdaten. Es finden sich modelltheoretische Weiterentwicklungen, um immer detailliertere Fragestellungen zu beant-

worten, z.B. durch die Integration neuer Mobilitätsformen, realistischere Verhaltensannahmen oder die Synthese von mikroskopischen und makroskopischen Modellansätzen. Neben vielen weiteren Trends werden Verkehrsnachfragemodelle auch hinsichtlich ihrer Ungenauigkeiten und Unsicherheiten optimiert. Doch während die Ungenauigkeiten durch Prüfungen des Modells analysiert und im Idealfall behoben werden können, gibt es im Allgemeinen nur wenige Entwicklungen hinsichtlich der Analyse und modellinternen Integration von Unsicherheiten. Aus diesem Grund sind bezüglich der Modellqualität zwei Entwicklungen wünschenswert:

- Unsicherheitsanalysen sollten praxistauglich in Verkehrsnachfragemodelle integriert werden. In anderen Wissenschaftsbereichen ist es Standard, dass Streubereiche von Modellergebnissen angegeben werden. Aus diversen Gründen, die in Kapitel 3 näher erläutert wurden, ist dies für Verkehrsnachfragemodelle nicht ohne weiteres möglich. Nichtsdestotrotz sollte nicht verschwiegen werden, dass Unsicherheiten bestehen: alle bekannten Unsicherheiten sowie alle getroffenen Annahmen sollten dokumentiert werden. Zusätzlich sollten die potenziellen Unsicherheiten (inklusive ihre Abhängigkeiten von anderen Unsicherheiten) genauer untersucht werden. Es muss auch genauer erforscht werden, wie diese Unsicherheiten praxistauglich (z.B. hinsichtlich der Rechenzeit) in die Modelle integriert werden können. Abschließend sollten dann auch die nachfolgenden Prozesse an die Verwendung von Modellergebnissen mit Unsicherheitsangaben angepasst werden.
- Um Ungenauigkeiten der Modelle zu minimieren, sollte es zum Standard werden, dass ein Qualitätsmanagementprozess die Modellerstellung begleitet. Dementsprechend sollten zukünftige Ausschreibungen ein solches Qualitätsmanagement fordern.

Verkehrsnachfragemodelle sind ein essenzielles Werkzeug der Verkehrsplanung. Bei korrekter Anwendung ermöglichen sie es Ingenieuren und Entscheidungsträgern, auf absehbare Entwicklungen oder neu auftretende Anforderungen bereits frühzeitig zu reagieren. Somit kann das zukünftige Verkehrsangebot bewusst und zielgerichtet gestaltet und die Verkehrsnachfrage entsprechend gelenkt werden. Der zentrale Faktor, wie zielführend diese Entscheidungen getroffen werden können, liegt in der Qualität der verwendeten Verkehrsnachfragemodelle.

Im Sinne der Aussagen von George Box („Essentially, all models are wrong, but some are useful. [...] the practical question is how wrong do they have to be to not be useful“ (BOX & DRAPER (1987, S. 424, 74))) sowie auch David Cox („[...] it does not seem helpful just to say that all models are wrong“ (CHATFIELD (1995, S. 456))) beschäftigte sich diese Arbeit damit, Unsicherheiten von Verkehrsnachfragemodellen zu quantifizieren und Grundlagen für ein an diese Unsicherheiten angepasstes Qualitätsmanagement zu erarbeiten. Mit Hilfe dieser Grundlagen können Richtlinien erarbeitet werden, die bei flächendeckender Anwendung dazu beitragen, hochwertigere Modellergebnisse und -interpretationen zu liefern. Entscheidungen, die auf solchen Ergebnissen beruhen, ermöglichen eine zielgerichtetere Verkehrsplanung und somit letztlich auch eine wünschenswertere Entwicklung unserer Gesellschaft.

7 Literatur

- AKADEMIE FÜR RAUMFORSCHUNG UND LANDESPLANUNG (2018): *Raumstruktur und Siedlungsstruktur*. Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hg.). Zugriff am: 18. September 2018. Verfügbar unter: www.arl-net.de/de/lexica/de/raumstruktur-und-siedlungsstruktur
- ALONSO, W. (1968): *The quality of data and the choice and design of predictive models*. In: Urban Development Models - Highway Research Board Special Report 97, S. 178-192. Verfügbar unter: pubsindex.trb.org/view/1968/m/130577. Zugriff am: 17. Januar 2018.
- ANDERSSON, M., BRUNDELL-FREIJ, K., ELIASSON, J. (2017): *Validation of aggregate reference forecasts for passenger transport*. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice, 96. S. 101-118. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.tra.2016.12.008](https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.12.008). Zugriff am: 20. November 2018.
- ARE - BUNDESAMT FÜR RAUMENTWICKLUNG, UVEK - EIDGENÖSSISCHES DEPARTEMENT FÜR UMWELT, VERKEHR, ENERGIE UND KOMMUNIKATION (2014): *Nationales Personenverkehrsmodell des UVEK - Aktualisierung auf den Basiszustand 2010* Endbericht. Bundesamt für Raumentwicklung, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (Hg.). Verfügbar unter: www.are.admin.ch/themen/verkehr/00256/00513/index.html?lang=de&download=NHZLp-Zeg7t,lnp6l0NTU042l2Z6ln1acy4Zn4Z2qZpnO2Yuq2Z6gpJCEenx9gmym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--. Zugriff am: 4. August 2016.
- ARMOOGUM, J., MADRE, J.-L., BUSSIÈRE, Y. (2009): *Measuring uncertainty in long-term travel demand forecasting from demographic modelling*. In: IATSS Research, 33 (2). S. 9-20. Verfügbar unter: [doi:10.1016/S0386-1112\(14\)60241-7](https://doi.org/10.1016/S0386-1112(14)60241-7). Zugriff am: 5. März 2020.
- AURENHAMMER, F., KLEIN, R., LEE, D.-T. (2013): *Voronoi diagrams and Delaunay triangulations*. New Jersey, NJ: World Scientific. ISBN 9789814447638.
- AXHAUSEN, K.W. (2019): *Verkehrserhebungen - Methoden der Verkehrsbefragungen* Forschungsauftrag VSS 2009/103. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen (Hg.). SCHWEIZERISCHER VERBAND DER STRASSEN UND VERKEHRSFACHLEUTE - 1657. Verfügbar unter: ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt/ivt-dam/vpl/reports/1001-1100/ab1064.pdf. Zugriff am: 17. April 2020.
- AXHAUSEN, K.W., EHREKE, I., GLEMSER, A., HESS, S., JÖDDEN, C., NAGEL, K., SAUER, A., WEIS, C. (2014): *Ermittlung von Bewertungsansätzen für Reisezeiten und Zuverlässigkeit auf der Basis eines Modells für modale Verlagerungen im nicht-gewerblichen und gewerblichen Personenverkehr für die Bundesverkehrswegeplanung - Entwurf Schlussbericht* FE-Projekt-Nr. 96.996/2011. Verfügbar unter: www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/BVWP/bvwp-2015-zeitkosten-pv.pdf?__blob=publicationFile. Zugriff am: 25. Juli 2016.
- BACKHAUS, K., ERICHSON, B., PLINKE, W., WEIBER, R. (2011): *Multivariate Analysemethoden - Eine anwendungsorientierte Einführung*. 13., überarbeitete Auflage. Berlin, Dordrecht, London, New York: Springer. ISBN 978-3642164903.
- BAEZA, M.A., VASSALLO, J.M. (2012): *Traffic uncertainty in toll motorway concessions in Spain*. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport, 165 (2). S. 97-105. Verfügbar unter: [doi:10.1680/tran.2012.165.2.97](https://doi.org/10.1680/tran.2012.165.2.97). Zugriff am: 11. Februar 2020.

- BAIN, R. (2009): *Error and optimism bias in toll road traffic forecasts*. In: Transportation, 36 (5). S. 469-482. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11116-009-9199-7. Zugriff am: 11. Februar 2020.
- BAIN, R. (2017): *Better Traffic Forecasts?* In: Infrastructure Investor, (81). S. 38-41. Verfügbar unter: www.robain.com/Better%20Traffic%20Forecasts_Bain.pdf. Zugriff am: 18. Oktober 2018.
- BAIN, R., PLANTAGIE, J.W. (2003): *Traffic Forecasting Risk: Study Update 2003*. Standard & Poor's, McGraw-Hill International (UK) Ltd. (Hg.). Verfügbar unter: www.infrastructureaustralia.gov.au/publications/standard-and-poor-traffic-forecasting-risk-study-update-2003. Zugriff am: 11. Februar 2020.
- BAIN, R., PLANTAGIE, J.W. (2004): *Traffic Forecasting Risk: Study Update 2004*. Standard & Poor's, McGraw-Hill International (UK) Ltd. (Hg.). Verfügbar unter: www.infrastructureaustralia.gov.au/publications/standard-and-poor-traffic-forecasting-risk-study-update-2004. Zugriff am: 11. Februar 2020.
- BAIN, R., POLAKOVIC, L. (2005): *Traffic Forecasting Risk Study Update 2005: Through Ramp-Up And Beyond*. Standard & Poor's, McGraw-Hill International (UK) Ltd. (Hg.). Verfügbar unter: www.infrastructureaustralia.gov.au/publications/standard-and-poor-traffic-forecasting-risk-study-update-2005-through-ramp-and-beyond-2005. Zugriff am: 11. Februar 2020.
- BAIN, R., WILKINS, M. (2002): *Traffic Risk in Start-Up Toll Facilities*. Standard & Poor's, McGraw-Hill International (UK) Ltd. (Hg.). Verfügbar unter: www.infrastructureaustralia.gov.au/publications/standard-and-poor-traffic-risk-start-toll-facilities. Zugriff am: 11. Februar 2020.
- BATES, J. (2010): *History of Demand Modelling*. In: Handbook of Transport Modelling (D.A. Hensher und K.J. Button (Hg.)). 2. ed. Amsterdam: Elsevier, S. 11-34. ISBN 978-0-08-045376-7.
- BELLMAN, R.E. (1961): *Adaptive control processes*: Princeton University Pres. ISBN 9780691652214.
- BEN-AKIVA, M.E., LERMAN, S.R. (2006): *Discrete choice analysis - Theory and application to travel demand*. [Nachdr.]. Cambridge, Mass.: MIT Press. In: MIT Press series in transportation studies. 9. ISBN 0262022176.
- BMVBS. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hg.) (2012): *Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (Ausgabe 2012) - TLS 2012*. Berlin. Verfügbar unter: www.bast.de/BAST_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Verkehrstechnik/Unterseiten/V5-tls-2012.pdf?__blob=publicationFile&v=1. Zugriff am: 18. Februar 2020.
- BOLTZE, M., HESS, R., BALLUFF, J. (2014): *Konzeption eines integrierten Qualitätsmanagements für das Straßen- und Verkehrswesen*. In: Straßenverkehrstechnik, (9). S. 607-613. Verfügbar unter: www.researchgate.net/publication/275948439. Zugriff am: 8. Oktober 2019.
- BOX, G.E.P., DRAPER, N.R. (1987): *Empirical model-building and response surfaces*. [7. Dr.]. New York: Wiley. In: Wiley series in probability and mathematical statistics. Applied probability and statistics. ISBN 0471810339.
- BOYCE, D.E., NIE, Y.(., BAR-GERA, H., LIU, Y., HU, Y. (2010): *Field Test of a Method for Finding Consistent Route Flows and Multiple-Class Link Flows in Road Traffic Assignments* Final Report. Federal Highway Administration (Hg.). Washington, DC. Verfügbar unter: translab.civil.northwestern.edu/nutrend/wp-content/uploads/2011/06/Boyce-et-al-Consistent-Route-Flows-Field-Test-2010.pdf. Zugriff am: 30. Mai 2016.

- BRILON, W. (2005): *Grundlagen der Bemessung von Verkehrsanlagen*. In: Stadtverkehrsplanung - Grundlagen, Methoden, Ziele (G. Steierwald, H.D. Kühne und W. Vogt (Hg.)). 2., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer. ISBN 3-540-40588-7.
- BUNDESRECHNUNGSHOF (2016): *Bericht an den Haushaltsausschuss des Deutschen Bundestages nach § 88 Absatz 2 BHO über die Plausibilisierung der Investitionskosten von Straßenbauprojekten zur Aufstellung des Bundesverkehrswegeplans 2030*. Bonn. Verfügbar unter: www.bundesrechnungshof.de/de/veroeffentlichungen/produkte/beratungsberichte/langfassungen/langfassungen-2016/2016-bericht-plausibilisierung-der-investitions-kosten-von-strassenbauprojekten-zur-aufstellung-des-bundesverkehrswege-plans-2030-pdf. Zugriff am: 12. Februar 2020.
- BURKARD, R.E., ZIMMERMANN, U. (2012): *Verfahren zur Minimierung ohne Restriktionen*. In: Einführung in die Mathematische Optimierung (R.E. Burkard und U. Zimmermann (Hg.)). Berlin: Springer, S. 275-283. 10.1007/978-3-642-28673-5. ISBN 978-3-642-28673-5. Verfügbar unter: doi.org/10.1007/978-3-642-28673-5_15
- CAMBRIDGE SYSTEMATICS INC. (2006): *FSUTMS-Cube Framework Phase I - Default Model Parameters* final report. Cambridge Systematics Inc. (Hg.). Tallahassee, Florida. Verfügbar unter: www.fsutmsonline.net/images/uploads/reports/FR1_FSUTMS-Cube_Parameters_All-in-One_Version_10-31-06%5B1%5D.pdf. Zugriff am: 4. November 2015.
- CAMBRIDGE SYSTEMATICS INC. (2008): *FSUTMS-Cube Framework Phase II - Model Calibration and Validation Standards* final report. Cambridge Systematics Inc. (Hg.). Tallahassee, Florida. Verfügbar unter: www.fsutmsonline.net/images/uploads/reports/FR2_FDOT_Model_CalVal_Standards_Final_Report_10.2.08.pdf. Zugriff am: 4. November 2015.
- CAMBRIDGE SYSTEMATICS INC. (2014): *Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual - Second Edition*. Federal Highway Administration (Hg.). FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. 2nd ed. Cambridge, Massachusetts. Verfügbar unter: connect.ncdot.gov/projects/planning/tpb%20training%20presentations/fhwa%20model%20validation%20handbook.pdf. Zugriff am: 25. April 2019.
- CHATFIELD, C. (1995): *Model Uncertainty, Data Mining and Statistical Inference*. In: Journal of the Royal Statistical Society. Series A (Statistics in Society), 158 (3). S. 419-466. Verfügbar unter: [doi:10.2307/2983440](https://doi.org/10.2307/2983440). Zugriff am: 13. November 2018.
- CRUDE OIL PEAK (2015): *North South Bypass Tunnel (Clem7) Brisbane*. Crude Oil Peak (Hg.). Zugriff am: 12. Februar 2020. Verfügbar unter: crudeoilpeak.info/i-told-you-so/north-south-bypass-tunnel-clem7-brisbane
- DE JONG, G., DALY, A., PIETERS, M., MILLER, S., PLASMEIJER, R., HOFMAN, F. (2005): *Uncertainty in traffic forecasts - Literature review and new results for the netherlands*. Association for European Transport and contributors (Hg.). RAND EUROPE, et al. Verfügbar unter: www.rand.org/content/dam/rand/pubs/working_papers/2005/RAND_WR268.pdf. Zugriff am: 4. November 2015.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (1995) DIN EN ISO 8402, *Qualitätsmanagement – Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (1995) DIN 1319-1, *Grundlagen der Meßtechnik – Teil 1: Grundbegriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2000) DIN EN ISO 9000, *Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2013) DIN ISO 3534-2, *Statistik – Begriffe und Formelzeichen – Teil 2: Angewandte Statistik*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2015) DIN EN ISO 9000:2015, *Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DUGGE, B. (2006): *Ein simultanes Erzeugungs-, Verteilungs-, Aufteilungs- und Routenwahlmodell (EVA-U)* Dissertation. Dresden. In: Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, TU Dresden. Heft 9. Verfügbar unter: tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/vnm/ressourcen/dateien/institutsschriftenreihe/Heft-09.pdf?lang=de. Zugriff am: 27. November 2017.
- ECKE, L., CHLOND, B., MAGDOLEN, M., EISENMANN, C., HILGERT, T., VORTISCH, P. (2019): *Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2017/2018: Alltagsmobilität und Fahrleistung* Forschungsprojekt FE-Nr. 70.938/17. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.). KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT): INSTITUT FÜR VERKEHRSWESSEN. Karlsruhe. Verfügbar unter: mobilitaetspanel.ifv.kit.edu/downloads/Bericht_MOP_17_18.pdf. Zugriff am: 10. Februar 2020.
- FEHNDRICH, M. (1999): *Sitzzuteilung nach Hare/Niemeyer*. Zugriff am: 30. Oktober 2019. Verfügbar unter: www.wahlrecht.de/verfahren/hare-niemeyer.html
- FGSV - FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRAßEN- UND VERKEHRSWESSEN (2013): *Marktabschätzung Verkehrsnachfragemodelle, Niederschrift der Sitzung des AK 1.2.6 "Konzeption und Einsatz von Verkehrsnachfragemodellen des Personenverkehrs" vom 08.10.2013*. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.).
- FGSV. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.) (2005): *Hinweise zum induzierten Verkehr*. In: FGSV W1 - Wissensdokumente. 141. Ausg. 2005: FGSV-Verl. Köln. ISBN 3937356576.
- FGSV. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.) (2006): *Hinweise zur mikroskopischen Verkehrsflusssimulation - Grundlagen und Anwendungen*. In: FGSV. 388: FGSV Verlag. Köln. ISBN 3939715115.
- FGSV. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.) (2008): *Richtlinien für integrierte Netzgestaltung - RIN*. In: FGSV R1 - Regelwerke. 121: FGSV Verlag. Köln. ISBN 3939715794.
- FGSV. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.) (2012a): *Begriffsbestimmungen - Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb*. In: FGSV. 220. Ausg. 2012: FGSV Verlag. Köln. ISBN 9783864460241.
- FGSV. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.) (2012b): *Empfehlungen für Verkehrserhebungen - EVE*. In: FGSV. 125: FGSV Verlag. Köln. ISBN 9783941790995.
- FGSV. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.) (2018): *Hinweise für die Durchführung von Haushaltsbefragungen zum Mobilitätsverhalten - Ergänzungen zu den EVE (Empfehlungen für Verkehrserhebungen) aus der Perspektive der Planungspraxis*. Ausgabe 2018. Köln: FGSV Verlag. In: FGSV W1 - Wissensdokumente. 125/1. ISBN 978-3-86446-211-5. Verfügbar unter: www.fgsv.de/fileadmin/road_maps/125_1.pdf. Zugriff am: 12. Dezember 2019.
- FLYVBJERG, B. (2005): *Measuring inaccuracy in travel demand forecasting: methodological considerations regarding ramp up and sampling*. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice, 39 (6). S. 522-530. Verfügbar unter: [doi:10.1016/j.tra.2005.02.003](https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.02.003). Zugriff am: 19. Oktober 2018.
- FLYVBJERG, B., COWI (2004): *Procedures for Dealing with Optimism Bias in Transport Planning - Guidance Document*. The British Department for Transport (Hg.). Ver-

- füßbar unter: assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/191523/Procedures_for_dealing_with_optimism_bias_in_transport_planning.pdf. Zugriff am: 22. Oktober 2018.
- FLYVBJERG, B., SKAMRIS HOLM, M.K., BUHL, S.L. (2006): *Inaccuracy in Traffic Forecasts*. In: *Transport Reviews*, 26 (1). S. 1-24. Verfügbar unter: doi:10.1080/01441640500124779. Zugriff am: 4. November 2015.
- FRIEDRICH, M. (2010): *Qualitätsmanagement für Verkehrsnachfragemodelle*. In: *Qualitätsanforderungen an Verkehrsnachfragemodelle - DVWG Symposium*, 25./26. März 2010 (Deutsche Verkehrswissenschaftliche Gesellschaft (Hg.)). Berlin: Deutsche Verkehrswissenschaftliche Gesellschaft. ISBN 9783937877983. Verfügbar unter: www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/publikationen/downloads/2010_DVWG_QM_Verkehrsmodelle_M_Friedrich_mit_Deckblatt.pdf. Zugriff am: 19. Dezember 2017.
- FRIEDRICH, M. (2011): *Wie viele? Wohin? Womit? Was können uns Verkehrsnachfragemodelle wirklich sagen?* In: *Heureka '11 - Optimierung in Verkehr und Transport*. 16./17. März 2011 Stuttgart (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.)). Köln: FGSV Verlag. ISBN 9783941790728. Verfügbar unter: www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/publikationen/downloads/2011_Friedrich_Nachfragemodelle_Heureka2011_mit_Deckblatt.pdf. Zugriff am: 19. Dezember 2017.
- FRIEDRICH, M. (2015): *Verkehrsnachfragemodelle - Ein Werkzeug für die nachhaltige Verkehrsplanung*. In: *Wissenstransfer von der Forschung in die Praxis* (25.2.2015). Verfügbar unter: www.youtube.com/watch?v=fJQw6tsgKBc. Zugriff am: 25. März 2020.
- FRIEDRICH, M. (2019): *Verkehrsplanung und Verkehrsmodelle - Skript - WS 2019/2020*. Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik (Hg.). LEHRSTUHL FÜR VERKEHRSPLANUNG UND VERKEHRSLITTECHNIK - .
- FRIEDRICH, M., HARTL, M., MAGG, C. (2018): *A modeling approach for matching ridesharing trips within macroscopic travel demand models*. In: *Transportation*, 45 (6). S. 1639-1653. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11116-018-9957-5. Zugriff am: 12. Juni 2019.
- FRIEDRICH, M., PESTEL, E., SCHILLER, C., SIMON, R. (2019a): *Scalable GEH: A Quality Measure for Comparing Observed and Modeled Single Values in a Travel Demand Model Validation*. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2673 (4). S. 722-732. Verfügbar unter: doi:10.1177/0361198119838849. Zugriff am: 21. August 2019.
- FRIEDRICH, M., PESTEL, E., SCHILLER, C., SIMON, R., HEIDL, U., PILLAT, J. (2019b): *Anforderungen an städtische Verkehrsnachfragemodelle - FE-Projekt 70.893/2014*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.).
- FRIEDRICH, M., SCHILLER, C., PESTEL, E., SIMON, R., SCHIMPF, M. (2019c): *Einflussgrößen auf die Qualität von makroskopischen Nachfragemodellen im Personenverkehr - Influencing factors on the quality of macroscopic travel demand models* DFG-Projekt (FR 2666/3-1 & SCHI 1113/4-1). Verfügbar unter: www.isv.uni-stuttgart.de/vuv/forschung/. Zugriff am: 14. Mai 2018.
- HAHN, W. (2016): *Anhörung zum Entwurf des 6. Gesetzes zum Fernstraßenausbaugesetz - Ausschussdrucksache 18(15)391-C*. In: *Ausschussdrucksache 18(15)391-A-D - Stellungnahme zur ÖA - 87. Sitzung am 09.11.2016* (Ausschuss für Verkehr (Hg.)).
- HAHN, W. (2020): *Empfehlungen für Verkehrsnachfragemodelle im Wirtschaftsverkehr und „Gerichtsfestigkeit“ von Verkehrsmodellen - 23.04.2020*. Online-Konferenz.

- In: Abstimmung zu Sachstand und Planungen für Empfehlungen zu Verkehrsnachfragemodellen in den DACH-Ländern.
- HARTGEN, D.T. (2013): *Hubris or humility? - Accuracy issues for the next 50 years of travel demand modeling*. In: *Transportation*, 40 (6). S. 1133-1157. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11116-013-9497-y. Zugriff am: 10. Januar 2018.
- HARTL, M. (2020): *Integrierte ÖV-Planung - Entwurf, Vergleich und Bewertung von planerischen und algorithmischen Lösungsverfahren*. Stuttgart: Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart. In: Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen. Heft 59 (Januar 2020). ISBN 9783982113807.
- HAUTZINGER, H., KAGERBAUER, M., MALLIG, N., PFEIFFER, M., ZUMKELLER, D. (2013): *Mikromodellierung für die Region Stuttgart - Schlussbericht*. INOVAPLAN GMBH, INSTITUT FÜR VERKEHRSWESEN AM KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE, INSTITUT FÜR ANGEWANDTE VERKEHRS- UND TOURISMUSFORSCHUNG E.V. Karlsruhe und Heilbronn. Verfügbar unter: [www2.hs-esslingen.de/~rwoerner/02%20Kolloquium%20Nachhaltige%20Mobilit%E4t/20130129_Bericht_Mikromodell-Stuttgart_final%20\(2\).pdf](http://www2.hs-esslingen.de/~rwoerner/02%20Kolloquium%20Nachhaltige%20Mobilit%E4t/20130129_Bericht_Mikromodell-Stuttgart_final%20(2).pdf). Zugriff am: 9. Dezember 2019.
- HERKT, S., LEERKAMP, B., ALTHOFF, T., GOEBEL, D., JANSEN, T., MEIßNER, A. (2008): *QUALIMOD - Qualitätsanforderungen und -standards für Verkehrsmodellrechnungen*. FH BOCHUM, IVV GMBH & CO. KG, STADT DORTMUND - .
- HUELSENBECK, J.P., CRANDALL, K.A. (1997): *Phylogeny Estimation and Hypothesis Testing Using Maximum Likelihood*. In: *Annual Review of Ecology and Systematics*, 28. S. 437-466. Verfügbar unter: [www.jstor.org/stable/pdf/2952500.pdf?_ =](http://www.jstor.org/stable/pdf/2952500.pdf?_=) 1467361228073. Zugriff am: 23. April 2018.
- HUGOSSON, M.B. (2005): *Quantifying uncertainties in a national forecasting model*. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 39 (6). S. 531-547. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tra.2005.02.010. Zugriff am: 5. März 2020.
- INTRAPLAN. Intraplan Consult GmbH, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hg.) (2016): *Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im schienengebundenen ÖPNV - Version 2016 FE-Projekt 70.893/2014*. München.
- JENTSCH, H. (2009): *Konzeption eines integrierten Qualitätsmanagements für den Stadtverkehr* Dissertation. Darmstadt.
- JUSTEN, A., MARTÍNEZ, F.J., CORTÉS, C.E. (2013): *The use of space-time constraints for the selection of discretionary activity locations*. In: *Journal of Transport Geography*, 33. S. 146-152. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jtrangeo.2013.10.009. Zugriff am: 20. Juli 2019.
- KÖHLER, U., ZÖLLNER, R., WERMUTH, M., EMIG, J. (2001): *Analyse der Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen - Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 01.144/1996/HGB*. Bonn: Bundesdr. Zweigniederlassung Bonn. In: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*. Heft 804. ISBN 3934458378.
- KRISHNAMURTHY, S., KOCKELMAN, K.M. (2003): *Propagation of Uncertainty in Transportation Land Use Models: Investigation of DRAM-EMPAL and UTPP Predictions in Austin, Texas*. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1831 (1). S. 219-229. Verfügbar unter: doi:10.3141/1831-25
- LELEUR, S., SALLING, K.B., PILKAUSKIENE, I., NICOLAISEN, M.S. (2015): *Combining Reference Class Forecasting with Overconfidence Theory for Better Risk Assessment of Transport Infrastructure Investments*. In: *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 15 (3). S. 362-375. Verfügbar unter: bit.ly/2UJ9145. Zugriff am: 6. April 2020.

- LEMP, J.D., KOCKELMAN, K.M. (2009): *Understanding and accommodating risk and uncertainty in toll road projects - A review of the literature*. In: Transportation Research Record, (2132). S. 106-112. Verfügbar unter: www.caee.utexas.edu/prof/kockelman/public_html/trb09risk&uncertaintytolledprojects.pdf. Zugriff am: 4. November 2015.
- LI, Z., HENSHER, D.A. (2010): *Toll Roads in Australia - An Overview of Characteristics and Accuracy of Demand Forecasts*. In: Transport Reviews, 30 (5). S. 541-569. Verfügbar unter: doi:10.1080/01441640903211173. Zugriff am: 10. Januar 2018.
- LOHSE, D., TEICHERT, H., DUGGE, B., BACHNER, G. (1997): *Ermittlung von Verkehrsströmen mit n-linearen Gleichungssystemen unter Beachtung von Nebenbedingungen einschließlich Parameterschätzung (Verkehrsnachfragemodellierung: Erzeugung, Verteilung, Aufteilung) - Abschlußbericht zum DFG-Forschungsthema*. Dresden. In: Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, TU Dresden. Heft 5. Verfügbar unter: tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/nvz/resources/dateien/institutsschriftenreihe/Heft-05.pdf. Zugriff am: 27. November 2017.
- LYONS, G. (2014): *Future Demand - Summary report*. The Ministry of Transport, New Zealand (Hg.). Verfügbar unter: www.transport.govt.nz/multi-modal/keystrategie-sandplans/strategic-policy-programme/future-demand/. Zugriff am: 27. April 2020.
- MACKIE, P., PRESTON, J. (1998): *Twenty-one sources of error and bias in transport project appraisal*. In: Transport Policy, 5 (1). S. 1-7. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0967-070X(98)00004-3
- MANZO, S., NIELSEN, O.A., PRATO, C.G. (2014): *Uncertainty calculation in transport models and forecasts*. PhD Thesis. Lyngby. Verfügbar unter: orbit.dtu.dk/files/110362883/PhD_Thesis_DTU_Transport_2014_Uncertainty_calculation_in_transport_models_and_forecasts.pdf. Zugriff am: 4. November 2015.
- MANZO, S., NIELSEN, O.A., PRATO, C.G. (2015a): *How uncertainty in input and parameters influences transport model - Output A four-stage model case-study*. In: Transport Policy, 38. S. 64-72. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tranpol.2014.12.004. Zugriff am: 9. November 2015.
- MANZO, S., NIELSEN, O.A., PRATO, C.G. (2015b): *How uncertainty in socio-economic variables affects large-scale transport model forecasts*. In: European Journal of Transport and Infrastructure Research, 15 (3). S. 304-316. Verfügbar unter: orbit.dtu.dk/files/110657388/2015_03_03.pdf. Zugriff am: 4. November 2015.
- MARSDEN, G. (2017): *Recognising uncertainty is not the same as accepting it*. Zugriff am: 6. Februar 2020. Verfügbar unter: drgregmarsden.wordpress.com/2017/03/10/recognising-uncertainty-is-not-the-same-as-accepting-it/
- MARSDEN, G., DALES, J., JONES, P., SEAGRIFF, E., SPURLING, N. (2018): *All Change? - The future of travel demand and the implications for policy and planning* The First Report of the Commission on Travel Demand. Essex: Solopress Ltd. ISBN 978-1-899650-83-5. Verfügbar unter: www.demand.ac.uk/commissionon-. Zugriff am: 10. Februar 2020.
- MCNALLY, M.G., RINDT, C.R. (2010): *The Activity-Based Approach*. In: Handbook of Transport Modelling (D.A. Hensher und K.J. Button (Hg.)). 2. ed. Amsterdam: Elsevier, S. 55-73. ISBN 978-0-08-045376-7.
- MEADOWS, D.H. (2009): *Thinking in systems - A primer*. London: Earthscan. ISBN 978-1-84407-726-7. Verfügbar unter: wtf.tw/ref/meadows.pdf. Zugriff am: 9. April 2020.

- MILLER, E.J. (2020): *Travel demand models, the next generation - Boldly going where no-one has gone before*. In: Mapping the travel behavior genome (K.G. Goulias und A.W. Davis (Hg.): Elsevier, S. 29-46. 10.1016/C2018-0-02132-5. ISBN 9780128173404. Verfügbar unter: www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128173404000036?via%3Dihub. Zugriff am: 8. April 2020.
- MILLER, M., SZIMBA, E. (2015): *How to avoid unrealistic appraisal results? - A concept to reflect the occurrence of risk in the appraisal of transport infrastructure projects*. In: Research in Transportation Economics, 49. S. 65-75. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.retrec.2015.04.007
- MOTOS (2007): *MOTOS Handbook containing guidelines for constructing national and regional transport models - Handbook of transport modelling (in Europe): learning from best practice* Transport Modelling: Towards Operational Standards in Europe. MOTOS (Hg.). EUROPEAN COMMISSION'S DIRECTORATE GENERAL FOR MOBILITY AND TRANSPORT. Verfügbar unter: trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20090928_091637_67695_MOTOS%20-%20Handbook.pdf. Zugriff am: 11. Mai 2020.
- NICOLAISEN, M.S. (2012): *Forecasts: Fact or Fiction? - Uncertainty and Inaccuracy in Transport Project Evaluation* PhD Thesis. 2. Edition. Aalborg. Verfügbar unter: www.researchgate.net/publication/275213963_Forecasts_Fact_or_Fiction_Uncertainty_and_Inaccuracy_in_Transport_Project_Evaluation. Zugriff am: 20. Dezember 2017.
- NICOLAISEN, M.S., DRISCOLL, P.A. (2014): *Ex-Post Evaluations of Demand Forecast Accuracy: A Literature Review*. In: Transport Reviews, 34 (4). S. 540-557. Verfügbar unter: doi:10.1080/01441647.2014.926428. Zugriff am: 20. November 2018.
- NICOLAISEN, M.S., NÆSS, P. (2015): *Roads to nowhere - The accuracy of travel demand forecasts for do-nothing alternatives*. In: Transport Policy, 37. S. 57-63. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tranpol.2014.10.006. Zugriff am: 13. September 2018.
- NOBIS, C., KUHNIMHOF, T. (2018): *Mobilität in Deutschland - MiD Ergebnisbericht - Studie von infas, DLR, IVT und infas 360 im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15)*. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) Referat G 13 (Hg.). Bonn, Berlin. Verfügbar unter: www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf. Zugriff am: 11. Februar 2019.
- ODECK, J., WELDE, M. (2017): *The accuracy of toll road traffic forecasts: An econometric evaluation*. In: Transportation Research Part A: Policy and Practice, 101. S. 73-85. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tra.2017.05.001. Zugriff am: 20. November 2018.
- ORTÚZAR, J.D.D., WILLUMSEN, L.G. (2011): *Modelling Transport*. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons. ISBN 9780470760390.
- OZ (2017): *50-Millionen-Jubiläum für den Warnowtunnel*. Ostsee-Zeitung.de (Hg.). Zugriff am: 10. Februar 2020. Verfügbar unter: www.ostsee-zeitung.de/Mecklenburg/Rostock/50-Millionen-Jubilaum-fuer-den-Warnowtunnel
- PARTHASARATHI, P., LEVINSON, D. (2010): *Post-construction evaluation of traffic forecast accuracy*. In: Transport Policy, 17 (6). S. 428-443. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tranpol.2010.04.010. Zugriff am: 13. September 2018.
- PEDERSEN, N.J., SAMDAHL, D.R. (1982): *Highway traffic data for urbanized area project planning and design - NCHRP Report 255*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council. In: NCHRP Report. 255. ISBN 0-309-03450-7. Verfügbar unter: teachamerica.com/tih/PDF/nchrp255.pdf. Zugriff am: 27. Februar 2017.

- PESTEL, E. (2020): *Considerations about the quality assessment of travel time and travel distance distributions in transport modelling - A proposal for a standardized methodology*. In: Transportation. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11116-020-10095-y. Zugriff am: 11. März 2020.
- PESTEL, E., FRIEDRICH, M., HEIDL, U., PILLAT, J., SCHILLER, C., SCHIMPF, M. (2016): *Qualitätssicherung von Verkehrsnachfragemodellen*. In: Straßenverkehrstechnik, 60 (10). S. 658-670.
- PHLEPS, P., FEIGE, I., ZAPP, K. (2015): *Die Zukunft der Mobilität - Szenarien für Deutschland in 2035*. Institut für Mobilitätsforschung - Eine Forschungseinrichtung der BMW Group (Hg.). IFMO. Druckerei Humburg, Berlin. Verfügbar unter: www.ifmo.de/publikationen.html?t=144. Zugriff am: 28. Oktober 2020.
- PILLAT, J. (2014): *Methoden zur Analyse und Prognose des Verkehrsaufkommens unter Berücksichtigung des Wetters auf Autobahnen* Dissertation. Stuttgart. In: Veröffentlichungen aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Universität Stuttgart. 49. ISBN 9783981057386.
- PTV AG (2020): *Activity Based Modelling with PTV Visum - Webinar*. Zugriff am: 3. Juli 2020. Verfügbar unter: www.youtube.com/watch?v=HvxDVkPmS-s
- PTV. PTV AG (Hg.) (2018): *PTV Visum 18 - Handbuch*.
- PTV. PTV AG (Hg.) (2020): *PTV Visum 2020 - Handbuch*.
- RASOULI, S., TIMMERMANS, H. (2012): *Uncertainty in travel demand forecasting models - Literature review and research agenda*. In: Transportation Letters: The International Journal of Transportation Research, 4 (1). S. 55-73. Verfügbar unter: doi:10.3328/TL.2012.04.01.55-73. Zugriff am: 4. November 2015.
- READ, C. (1914): *Logic: Deductive and Inductive*. 4. Auflage. Gloucester: DODO PRESS. ISBN 1406537624. Verfügbar unter: archive.org/details/logicdeductivein00read_119. Zugriff am: 22. Oktober 2020.
- RECHNUNGSHOF BADEN-WÜRTTEMBERG (2009): *Kernstadtentlastungsstraße in Riedlingen*. Zugriff am: 10. Februar 2020. Verfügbar unter: www.rechnungshof.baden-wuerttemberg.de/de/veroeffentlichungen/denkschriften/210382/210499.html
- REZAEESTAKHRUIE, H. (2017): *Analytical Error Propagation in Four-Step Transportation Demand Models* PhD Thesis. Brisbane. Verfügbar unter: espace.library.uq.edu.au/view/UQ:499811. Zugriff am: 6. April 2020.
- RIESER, N., TASNÁDY, B., FRIEDRICH, M., PESTEL, E., VRIES, N. de, ROTHENFLUH, M., FISCHER, R. (2018): *Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen* SVI-Forschungsauftrag Nr. 2015/001. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen (Hg.). SCHWEIZERISCHE VEREINIGUNG DER VERKEHRSINGENIEURE UND VERKEHRSEXPERTEN - 1645. Verfügbar unter: bit.ly/2XdgyCY. Zugriff am: 6. April 2020.
- ROADS AND MARITIME SERVICES. Roads and Maritime Services (Hg.) (2013): *Traffic Modelling Guidelines*. ISBN 9781922194213. Verfügbar unter: www.rms.nsw.gov.au/business-industry/partners-suppliers/documents/technical-manuals/modellingguidelines.pdf. Zugriff am: 16. Dezember 2015.
- SALTELLI, A., BAMMER, G., BRUNO, I., CHARTERS, E., DI FIORE, M., DIDIER, E., NELSON ESPELAND, W., KAY, J., LO PIANO, S., MAYO, D., PIELKE, R., PORTALURI, T., PORTER, T.M., PUY, A., RAFOLS, I., RAVETZ, J.R., REINERT, E., SAREWITZ, D., STARK, P.B., STIRLING, A., VAN DER SLUIJS, J., VINEIS, P. (2020): *Five ways to ensure that models serve society: a manifesto*. In: Nature, 582 (7813). S. 482-484. Verfügbar unter: doi:10.1038/d41586-020-01812-9

- SAMMER, G. (2020): *Gerichtliche Verfahren zur Qualität von Verkehrsnachfragemodellen - Erfahrungen aus Österreich - 23.04.2020*. Online-Konferenz. In: Abstimmung zu Sachstand und Planungen für Empfehlungen zu Verkehrsnachfragemodellen in den DACH-Ländern.
- SAMMER, G., GRUBER, C., ROESCHEL, G., TOMSCHY, R., HERRY, M. (2018): *The dilemma of systematic underreporting of travel behavior when conducting travel diary surveys – A meta-analysis and methodological considerations to solve the problem*. In: *Transportation Research Procedia*, 32. S. 649-658. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.trpro.2018.10.006. Zugriff am: 17. Oktober 2019.
- SAMMER, G., RÖSCHEL, G., GRUBER, C. (2012): *Qualitätssicherung für die Anwendung von Verkehrsnachfragemodellen und Verkehrsprognosen - Quality Management and Model Validation for Application of Transport Demand Modelling and Forecast*. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene, Verkehr. In: *Straßenforschung*. Heft 604.
- SCHILLER, C. (2004): *Integration des ruhenden Verkehrs in die Verkehrsangebots- und Verkehrsnachfragemodellierung* Dissertation. Dresden. In: Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, TU Dresden. 8. Verfügbar unter: d-nb.info/973092653/34. Zugriff am: 7. Mai 2019.
- SCHILLER, C. (2007): *Erweiterung der Verkehrsnachfragemodellierung um Aspekte der Raum- und Infrastrukturplanung* Habilitation. Dresden. In: Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr, TU Dresden. Heft 10. Verfügbar unter: tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/vkw/ivs/tvp/Downloads/Schriftenreihe/Heft-10.pdf. Zugriff am: 30. Mai 2016.
- SCHILLER, C. (2017): *Erweiterung von wegebasierten Modellansätzen der simultanen Ziel- und Moduswahl für große Modellanalysen*. In: *Heureka '17 - Optimierung in Verkehr und Transport*. 22./23. März 2017, Stuttgart (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.)). Köln: FGSV Verlag. ISBN 9783864461774.
- SCHLAICH, J., HEIDL, U., POHLNER, R. (2012): *Verkehrsmodellierung für die Region Stuttgart - Analyseverkehr 2009/2010 Schlussbericht Modellierung*. PTV AG (Hg.). Karlsruhe.
- SCHNABEL, W., LOHSE, D. (1997): *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung*. 2., neu bearb. Aufl. Berlin: Verlag für Bauwesen. Band 2. ISBN 3345005662.
- SCS. Society for Modeling & Simulation International (Hg.) (2019): *Simulationist Code of Ethics*. Verfügbar unter: scs.org/ethics/. Zugriff am: 13. März 2020.
- SIMON, R. (2018): *Betrachtung von Konvexitätseffekten in der makroskopischen Verkehrsmodellierung*. Obergurgl. In: Universitätstagung Verkehrswesen.
- SIMON, R., SCHILLER, C., PESTEL, E., FRIEDRICH, M. (2020): *Next Generation Verkehrsnachfragemodelle*. In: *Preprints von Heureka '21 - Optimierung in Verkehr und Transport*. Proceedings. 13./14. April 2021 Stuttgart (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.)). Köln: FGSV Verlag. Verfügbar unter: bit.ly/2JGj5o2. Zugriff am: 6. April 2020.
- SRV. Technische Universität Dresden, Lehrstuhl Verkehrs- und Infrastrukturplanung (Hg.) (2019): *Mobilität in Städten - SrV 2018*. Dresden. Verfügbar unter: tu-dresden.de/bu/verkehr/ivs/srv/srv-2018
- STUTTS, J. (2019): *Macquarie settlement shows cost of getting traffic forecasts wrong*. Infrastructure Investor (Hg.). Zugriff am: 11. Februar 2020. Verfügbar unter:

- www.infrastructureinvestor.com/macquarie-settlement-shows-cost-getting-traffic-forecasts-wrong/
- TADI, R.R., KHASNABIS, S. (1990): *Error analysis - A tool for selecting travel demand models*. In: Mathematical and Computer Modelling, 14. S. 1170-1176. Verfügbar unter: doi:10.1016/0895-7177(90)90361-P. Zugriff am: 17. Januar 2018.
- TE BRÖMMELSTROET, M., SKOU NICOLAISEN, M., BÜTTNER, B., FERREIRA, A. (2017): *Experiences with transportation models - An international survey of planning practices*. In: Transport Policy, 58. S. 10-18. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.transpol.2017.04.007. Zugriff am: 23. Januar 2018.
- TFR (2020a): *Choice models*. The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (Hg.). Zugriff am: 1. Oktober 2020. Verfügbar unter: tfresource.org/topics/Choice_models.html
- TFR (2020b): *Joint / Conditional Destination Choices*. The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (Hg.). Zugriff am: 3. Juli 2020. Verfügbar unter: tfresource.org/topics/Joint_Conditional_Destination_Choices.html
- TRAIN, K.E. (2009): *Discrete choice methods with simulation*. 2nd ed. Cambridge, New York: Cambridge University Press. ISBN 0521747387.
- UK DfT. UK Department for Transport (Hg.) (2014): *TAG UNIT M3.1 - Highway Assignment Modelling*. In: Transport analysis guidance: WebTAG. M3.1. Verfügbar unter: www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/427124/webtag-tag-unit-m3-1-highway-assignment-modelling.pdf. Zugriff am: 3. November 2015.
- UK DfT. UK Department for Transport (Hg.) (2017): *TAG UNIT M2 - Variable Demand Modelling*. In: Transport analysis guidance: WebTAG. M2. Verfügbar unter: www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/603266/webtag-tag-unit-m2-variable-demand-modelling-march-2017.pdf. Zugriff am: 14. Dezember 2018.
- UK DfT. UK Department for Transport (Hg.) (2018a): *TAG UNIT A1.1 - Cost -Benefit Analysis*. In: Transport analysis guidance: WebTAG. A1.1. Verfügbar unter: assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/712699/tag-unit-a1.1-cost-benefit-analysis-may-18.pdf. Zugriff am: 12. Dezember 2018.
- UK DfT. UK Department for Transport (Hg.) (2018b): *TAG UNIT M4 - Forecasting and Uncertainty*. In: Transport analysis guidance: WebTAG. M4. Verfügbar unter: www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/712788/tag-unit-m4-forecasting-and-uncertainty-may-2018.pdf. Zugriff am: 13. Dezember 2018.
- VAN VUREN, T. (2020): *Learning from a crisis*. Transport Network (Hg.). Zugriff am: 8. Mai 2020. Verfügbar unter: www.transport-network.co.uk/Analysis-Learning-from-a-crisis/16611
- VANDEPUT, N. (2019): *Forecast KPI: RMSE, MAE, MAPE & Bias*. Zugriff am: 6. November 2019. Verfügbar unter: medium.com/analytics-vidhya/forecast-kpi-rmse-mae-mape-bias-cdc5703d242d
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (2007) VDI 4003, *Zuverlässigkeitsmanagement*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VERROEN, E. (2017): *Dealing with Uncertainty in Transport Planning - Planning Contribution to Commission on Travel Contribution to Commission on Travel Demand*

- Evidence Session 6* November 21, 2017. London. Verfügbar unter: www.demand.ac.uk/wp-content/uploads/2017/12/Presentation-Erik-Verroen-evidence-session-11212017-b.pdf. Zugriff am: 27. April 2020.
- VON SCHMIDT, A., CYGANSKI, R., KRAJZEWICZ, D. (2017): *Generierung synthetischer Bevölkerungen für Verkehrsnachfragemodelle, ein Methodenvergleich am Beispiel von Berlin*. In: Heureka '17 - Optimierung in Verkehr und Transport. 22./23. März 2017, Stuttgart (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hg.)). Köln: FGSV Verlag, www.researchgate.net/publication/316272255_Generierung_synthetischer_Bevölkerungen_für_Verkehrsnachfragemodelle_-_Ein_Methodenvergleich_am_Beispiel_von_Berlin. ISBN 9783864461774.
- VRS. Verband Region Stuttgart (Hg.) (2011): *Mobilität und Verkehr in der Region Stuttgart 2009/2010 - Regionale Haushaltsbefragung zum Verkehrsverhalten* Begleituntersuchungen zur Fortschreibung des Regionalverkehrsplans – Band 1. In: Schriftenreihe Verband Region Stuttgart. 29. Stuttgart.
- WALKER, W.E., HARREMOËS, P., ROTMANS, J., VAN DER SLUIJS, J.P., VAN ASSELT, M., JANSSEN, P., KRAYER VON KRAUSS, M.P. (2003): *Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support*. In: Integrated Assessment, 4 (1). S. 5-17. Verfügbar unter: doi:10.1076/iaij.4.1.5.16466. Zugriff am: 27. Januar 2020.
- WARMUTH, V. (2001): *Modellierung der Wirkungen verkehrsreduzierender Siedlungskonzepte* Dissertation. Karlsruhe. In: Schriftenreihe, Universität Karlsruhe (TH). 60.
- WEIS, C., VRTIC, M., AXHAUSEN, K.W., BALAC, M. (2016): *SP-Befragung 2015 zum Verkehrsverhalten - Grundlagen*. Bundesamt für Raumentwicklung (Hg.). Verfügbar unter: www.are.admin.ch/are/de/home/verkehr-und-infrastruktur/grundlagen-und-daten/stated-preference-befragung.html. Zugriff am: 9. März 2020.
- WERMUTH, M. (2005): *Modellvorstellungen zur Prognose*. In: Stadtverkehrsplanung - Grundlagen, Methoden, Ziele (G. Steierwald, H.D. Kühne und W. Vogt (Hg.)). 2., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer. ISBN 3-540-40588-7.
- WILLUMSEN, L.G. (2016a): *Model design and forecasting errors*. Zugriff am: 31. August 2018. Verfügbar unter: www.linkedin.com/pulse/mode-design-forecasting-errors-luis-pilo-willumsen/
- WILLUMSEN, L.G. (2016b): *Modelling errors, accidents and Swiss cheese*. Zugriff am: 31. August 2018. Verfügbar unter: www.linkedin.com/pulse/modelling-errors-accidents-swiss-cheese-luis-pilo-willumsen/
- WILLUMSEN, L.G. (2016c): *Modelling mistakes do happen*. Zugriff am: 31. August 2018. Verfügbar unter: www.linkedin.com/pulse/modelling-mistakes-do-happen-luis-pilo-willumsen/
- WILLUMSEN, L.G. (2017): *Make transport modelling fitter for tomorrow, again* Pre-publication version. In: UK Local Transport Today. Verfügbar unter: www.researchgate.net/publication/313895060_Make_transport_modelling_fitter_for_tomorrow_again. Zugriff am: 9. Januar 2018.
- WILLUMSEN, L.G. (2020a): *Diskussion in der Gruppe "Transport & Traffic Modelling": Transport Modelling and COVID-19*. Zugriff am: 24. März 2020. Verfügbar unter: www.linkedin.com/feed/update/urn:li:groupPost:2168238-6647838517152088064/
- WILLUMSEN, L.G. (2020b): *Thinking about travel demand after COVID-19*. Zugriff am: 17. April 2020. Verfügbar unter: www.linkedin.com/pulse/thinking-travel-demand-after-covid-19-luis-pilo-willumsen/

- WOHLTMANN, H.-W., WÜBBENHORST, K. (2020a): *Definition: Ex-ante-Analyse*. Zugriff am: 29. Januar 2020. Verfügbar unter: wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/ex-ante-analyse-35713
- WOHLTMANN, H.-W., WÜBBENHORST, K. (2020b): *Definition: Ex-post-Analyse*. Zugriff am: 29. Januar 2020. Verfügbar unter: wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/ex-post-analyse-36889
- WVI - PROF. DR. WERMUTH VERKEHRSFORSCHUNG UND INFRASTRUKTURPLANUNG GMBH, IVT - INSTITUT FÜR ANGEWANDTE VERKEHRS- UND TOURISMUSFORSCHUNG E.V., DLR - DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V., KBA - KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (2012): *Mobilitätsstudie „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010“ (KiD 2010) - Ergebnisse im Überblick* Forschungsprojekt FE-Nr. 70.0829/2008. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hg.). Braunschweig. Verfügbar unter: www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/kid-2010.pdf?__blob=publicationFile. Zugriff am: 26. April 2019.
- ZHAO, Y., KOCKELMAN, K.M. (2002): *The propagation of uncertainty through travel demand models: an exploratory analysis*. In: Annals of Regional Science, 36 (1). S. 145-163. Verfügbar unter: www.caee.utexas.edu/prof/kockelman/public_html/ARS01ErrorPropagation.pdf. Zugriff am: 4. November 2015.

8 Begriffs- und Abkürzungsverzeichnis

Das im Folgenden dargestellte Begriffs- und Abkürzungsverzeichnis entstammt FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 255 ff.) und umfasst die für diese Arbeit relevanten Begriffe.

Aktivitätenpaar (Quelle-Ziel-Gruppe)	~ beschreibt eine Teilkette einer Aktivitätenkette mit genau einem Weg, d.h. mit einer Quelle und einem Ziel. Ein solches Aktivitätenpaar wird durch die Aktivität an der Quelle und durch die Aktivität am Ziel charakterisiert.
Analysefall	~ beschreibt den Zustand für den Zeitpunkt, für den das Verkehrsnachfragemodell mit erhobenen Daten kalibriert und validiert wurde. Der Zeitpunkt dieses Zustandes liegt in der Vergangenheit.
Analysezeitpunkt	~ beschreibt den Zeitpunkt des Analysefalls. Das Verkehrsnachfragemodell wird für den ~ mit erhobenen Daten kalibriert und validiert.
Anpassungszeit	~ bezeichnet die Zeitdifferenz zwischen der Wunschabfahrtszeit des Fahrgastes und der angebotenen Abfahrtszeit.
Attraktionsrate	Die Attraktionsraten (oder Erzeugungsrate ist ein Maß für die mittlere Wegeanzahl pro Tag und Siedlungsstrukturgröße
Außenraum	~ umfasst den Raum außerhalb des Planungsraumes und besitzt keine oder nur eine geringe verkehrliche Wechselwirkung mit dem Planungsraum. Der ~ symbolisiert den „Rest der Welt“. Die Grenze zwischen dem Untersuchungsraum und dem Außenraum wird im Verkehrsnetz durch Kordonpunkte bzw. Kordonzellen definiert.
äquiquantile Klassen	Klassen, die die gleiche Nachfragemenge enthalten
Befragung	siehe Mobilitätserhebung
Betrachtungszeitraum	~ beschreibt den zeitlichen Rahmen, den das Modell repräsentiert, z.B. bei einem Tagesmodell einen (Werk-)Tag oder bei einem Spitzenstundenmodell die jeweiligen Spitzenstunden.
Bezugsfall	~ beschreibt den Zustand für einen Zeitpunkt in der Zukunft. Dieser Prognosezeitpunkt liegt bezogen auf den Analysezeitpunkt meist zwischen 10 und 20 Jahren in der Zukunft. Der Bezugsfall enthält Annahmen über eine Menge von – als gesichert anzunehmenden – Entwicklungen und Maßnahmen, die bis zu diesem Zeitpunkt eingetreten sein werden.

BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
Choice Set	Menge der alternativen Handlungsoptionen, aus denen ein Entscheider auswählen kann
COM	Component Object Model: Windows Programmierschnittstelle zur Programmsteuerung mit Visual Basic, Python oder anderen Programmiersprachen
CR-Funktion	Eine CR-Funktion (Capacity-Restraint-Funktion) beschreibt den Zusammenhang zwischen der Auslastung und der Fahrtzeit einer Strecke im Kfz-Verkehr. Auch wenn Capacity Restraint ein englischer Begriff ist, wird in englischsprachigen Ländern von Volume-Delay-Funktionen (VDF) gesprochen.
Delaunay-Triangulation	Eine Delaunay-Triangulation vernetzt zwei beliebige Punkte p und q der Punktmenge S , wenn für sie ein Kreis existiert, der durch p und q verläuft, aber keinen anderen Punkt von S in seinem Inneren oder auf seiner Grenze hat. (AURENHAMMER ET AL. (2013, S. 12))
Einzelwegmodell (aktivitätenbasiertes Einzelwegmodell)	~ bestimmen Ortsveränderungen zwischen Verkehrszellen ohne den Kontext innerhalb einer Aktivitätenkette zu berücksichtigen. Dazu werden die Aktivitätenketten in Teilketten mit genau einem Weg, d.h. mit einer Quelle und einem Ziel, unterteilt.
ER	Erzeugungsrate, siehe Attraktionsrate
EVA	~ (Erzeugung, Verteilung, Aufteilung) ist die softwareseitige Umsetzung eines aktivitätenbasierten Einzelwegmodells in der Verkehrsplanungssoftware PTV VISUM.
EVE	Empfehlungen für Verkehrserhebungen (FGSV (2012b))
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Fzg	Fahrzeuge
Güterverkehr	~ beschreibt außerbetriebliche Ortsveränderungen von Gütern aufgrund von wirtschaftlicher Aktivität. Es kann zwischen Versorgungs- und Entsorgungsverkehren unterschieden werden.
Haushaltsbefragung	siehe Mobilitätserhebung
HH-Bef	Haushaltsbefragung (siehe Mobilitätserhebung)

IV	Individualverkehr: umfasst den Fußgängerverkehr und Verkehrsmittel, die nur von Privatpersonen oder Unternehmen genutzt werden können, die eine Verfügbarkeit auf dieses Verkehrsmittel haben. Im IV können die Verkehrsteilnehmenden den Abfahrtszeitpunkt und die Fahrroute bestimmen. Wichtige IV-Verkehrsmittel sind Rad, Krad, Pkw und Lkw.
Kalibrierung	~ bezeichnet das Anpassen der Modellparameter, sodass die mit dem Modell berechneten Werte möglichst gut mit der beobachteten Realität übereinstimmen.
Kenngröße	<p>Kenngrößen beschreiben den Zustand eines Systems durch einen quantifizierbaren Kennwert. Kenngrößen in einem Verkehrsnachfragemodell beschreiben</p> <ul style="list-style-type: none">• das Verkehrsangebot: z.B. Netzlänge, Fahrplankilometer, Haltestellendichte• die Qualität des Verkehrsangebots: z.B. Reisezeit, Bedienungshäufigkeit• die Verkehrsnachfrage: z.B. Verkehrsaufkommen <p>Kenngrößen können sich auf eine Quelle-Ziel-Relation, auf ein Netzelement, auf eine Verkehrszelle, auf einen Teilraum oder auf den gesamten Untersuchungsraum beziehen.</p>
Kenngrößenmatrix	Eine ~ enthält die Kennwerte einer Kenngröße, die den Aufwand für eine Ortsveränderung zwischen Verkehrszellen quantifizieren. Typische Aufwände sind Zeiten, Kosten und Umsteigehäufigkeiten. Kenngrößenmatrizen beschreiben so die Qualität eines Verkehrsangebots.
Kennwertmodell	<p>Ein ~ ist ein einfaches Modell, dessen Ergebnis sich aus dem Produkt einer Variablen und einem Parameter – dem sog. Kennwert – ergibt. Beispiele für Kennwertmodelle als Teil eines Verkehrsplanungsmodells sind</p> <ul style="list-style-type: none">• Emissionsmodell HBEFA: Variable = Kfz-Verkehrsstärke, Kennwert = Emissionsfaktor differenziert nach Verkehrszustand und Fahrzeugart• Erlösmodell-ÖV: Variable = Personenkilometer, Kennwert = Erlös pro Kilometer• Verkehrserzeugungsmodell: Variable = Zahl der Personen, Kennwert = Wege pro Person differenziert nach Wegezweck und Personeneigenschaften <p>SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 149 ff.) beschreiben das ~ der Verkehrserzeugung (siehe Kapitel 2.4.2.1). Das Modell bestimmt personengruppen-, Quelle-Ziel-Gruppen- und zum Teil auch modusfein das Verkehrsaufkommen für jede Verkehrszelle unter Einhaltung bestimmter Randsummenbedingungen (hart, weich, offen). Der Kennwert ist dabei das spezifische Verkehrsaufkommen.</p>

Kfz	Kraftfahrzeug
KiD	Mobilitätsstudie „Kraftverkehr in Deutschland“ (WVI ET AL. (2012); siehe Mobilitätserhebungen)
Klassenanzahl	~ beschreibt die Anzahl der diskreten Klassen in einer diskreten Klasseneinteilung.
Klassenbreite	~ beschreibt den Kenngrößenwertebereich bei einer diskreten Klasseneinteilung.
KNV	Kosten-Nutzen-Verhältnis
Konsistenztest	~ prüfen, ob das Modell Anforderungen erfüllt, die sich aus der Logik von Ortsveränderungen ergeben.
Konvergenz	~ beschreibt die Annäherung an einen Gleichgewichtszustand innerhalb eines iterativen Prozesses.
Kordonpunkt	~ definiert im Verkehrsnetz die Grenze zwischen dem Untersuchungsraum und dem Außenraum.
Kordonzelle	~ definiert eine Verkehrszelle an der Grenze zwischen dem Untersuchungsraum und dem Außenraum, an der externer Verkehr eingespeist wird. Alternativ kann der externe Verkehr in einer Außenzelle eingespeist werden.
Lkw	Lastkraftwagen
Log-Summe	<p>Das Konzept der ~ ermöglicht es sequentielle Entscheidungen miteinander zu koppeln. Entscheidungen der unteren Ebene beeinflussen die Entscheidungen der oberen Ebene. So kann die Routenwahl mit der übergeordneten Moduswahl oder die Moduswahl mit der übergeordneten Zielwahl gekoppelt werden.</p> <p>Die ~ bewertet dabei die Menge der Alternativen der unteren Ebene durch die Ermittlung der Nutzensumme über alle Alternativen. Der Nutzen einer Alternativen-Menge (z.B. eines Modus oder eines Ziels) ergibt sich aus der Summe der bewerteten Nutzen aller Alternativen. Diese Summe wird dann – bei Anwendung eines Logit-Modells – logarithmiert. Durch diese Umkehrfunktion wird der bewertete Nutzen wieder in einen unbewerteten Nutzen des gesamten Modus transformiert. Dieser Wert wird als ~ bezeichnet.</p>
MaaS	Mobility as a Service (siehe On-Demand-Angebot)
MiD	Mobilität in Deutschland (NOBIS & KUHNIMHOF (2018); siehe Mobilitätserhebungen)
MIV	Motorisierter Individualverkehr

Mobilitätserhebung

Eine ~ liefert Kenngrößen des Mobilitätsverhaltens von Personen (siehe „Empfehlungen für Verkehrserhebungen“ (EVE, FGSV (2012b)) bzw. deren Ergänzung „Hinweise für die Durchführung von Haushaltsbefragungen zum Mobilitätsverhalten“ (FGSV (2018))) oder Kenngrößen zu Ortsveränderungen des Wirtschaftsverkehrs. Sie stellt damit eine wichtige Datenquelle für Verkehrsnachfragemodelle dar. Beispiele für ~ sind:

- Mobilität in Deutschland (MiD)
- System repräsentativer Verkehrsbefragungen bzw. Mobilität in Städten (SrV)
- Deutsches Mobilitätspanel (MOP)
- Kraftverkehr in Deutschland (KiD)

~ können an verschiedenen Orten durchgeführt werden:

- am Wohnort: Haushaltsbefragung mit Wegetagebüchern
- am Arbeitsort: Arbeitsplatzbefragung mit Erfassung des Arbeitswegs und Wegetagebüchern für dienstliche Wege
- im Verkehrssystem: ÖV-Fahrgastbefragung im Verkehrsmittel oder Kfz-Befragung an einem Punkt im Verkehrsnetz

**Mobilitätsverhalten
(Verkehrsverhalten)**

~ beschreibt die Ortsveränderungen einer Person. Wesentliche Eigenschaften des Mobilitätsverhaltens werden durch folgende Kenngrößen quantifiziert:

- Zahl der Ortsveränderungen (Wegeanzahl),
- Reisezeit und Reiseweite, differenziert nach Verkehrsmittel oder Modus.

Beobachtetes und damit tatsächlich realisiertes Mobilitätsverhalten ist ein erforderlicher Input für die Schätzung von Modellparametern. Realisiertes Verhalten muss von Verhaltenspräferenzen unterschieden werden. Realisiertes Verhalten berücksichtigt Randbedingungen (z.B. verfügbare Verkehrsmittel, Preise), die die Personen vorfinden und bei ihrer Entscheidung berücksichtigen müssen. Verhalten verändert sich bei einer Veränderung der Randbedingungen relativ schnell, Präferenzen ändern sich aufgrund von Erfahrungen, Bildung oder kulturellen Änderungen relativ langsam. Bei der Schätzung vom Modellparametern wird versucht, alle bekannten Randbedingungen der Verhaltensentscheidungen zu berücksichtigen, sodass die Parameter nicht Verhalten sondern Präferenzen beschreiben.

Mobilitätswerkzeug	Ein ~ bezeichnet ein Fahrzeug im Privatbesitz (Pkw, Rad), eine ÖV-Zeitkarte (z.B. Jahreskarte, oder BahnCard) oder eine Berechtigung zur Nutzung eines Fahrzeuges (z.B. Mitgliedschaft in einer Sharingorganisation). Die Anschaffung des Mobilitätswerkzeugs ist mit einmaligen Investitionskosten verbunden und das Ergebnis eines Entscheidungsprozesses, bei dem die Anschaffungskosten dem Nutzen des Besitzes gegenübergestellt werden. Die Verfügbarkeit eines bestimmten Mobilitätswerkzeug beeinflusst die Moduswahl, wenn der Modus die Verfügbarkeit des Fahrzeuges erfordert (z.B. Pkw) oder die Fahrkosten des Modus reduziert werden.
Modal-Split	~ beschreibt die Verteilung der Anteile der Verkehrsmittel (und des Fußgängerverkehrs) am Gesamtverkehrsaufkommen, z.B. bezogen auf die Anzahl durchgeführter Ortsveränderungen oder zurückgelegter Personenkilometer. (PILLAT (2014, S. XLI))
Modellanwendende Personen	Personen, die ein validiertes Verkehrsnachfragemodell für Fragestellungen in der Praxis oder in der Forschung für Modellrechnungen anwenden. Sie lassen die Modellarchitektur und die Modellparameter unverändert.
Modellergebnisnutzende Personen	Personen, die nur die Modellergebnisse nutzen, das Modell aber nicht notwendigerweise selber bedienen.
Modellerstellende Personen	Personen, die Verkehrsnachfragemodelle nach den definierten Anforderungen entwickeln. Dabei müssen sie ihre Vorgehensweise bei Modellaufbau, Kalibrierung und Validierung angemessen dokumentieren.
Modellprüfende Institutionen	Institutionen, die beratende oder prüfende Tätigkeiten ausführen (z.B. Rechnungshöfe, Sachverständige, Gerichte) und die die Modelle hinsichtlich ihrer Validität prüfen. Dies kann als externe Beratung im Modellerstellungsprozess oder bei juristischen Streitfällen geschehen.
Modus	Ein Modus umfasst die Menge der Verkehrsmittel, die die Verkehrsteilnehmenden für eine Ortsveränderung benötigen.
Moduswahl (Verkehrsaufteilung)	Bezeichnet die dritte Stufe des Vier-Stufen-Modells. In der ~ wird die Wahl des Modus für die einzelnen Ortsveränderungen nachgebildet. Ergebnis dieses Teilmodells ist eine Nachfragematrix je Modus und Nachfragegruppe.
MOP	Deutsches Mobilitätspanel (ECKE ET AL. (2019); siehe Mobilitätserhebungen)

Motorisierungsgrad (Pkw-Besitz)	<p>~ beschreibt das Verhältnis der Anzahl der amtlich angemeldeten Kraftfahrzeuge zur Einwohnerzahl. Der Kehrwert des Motorisierungsgrades, also Einwohner pro Kraftfahrzeug, wird Motorisierungskennziffer genannt. (FGSV (2012a, S. 23))</p> <p>Pkw-Besitz beschreibt den ~ als Personeneigenschaft. Er kann z.B. aus Haushaltsbefragungen ermittelt werden.</p>
Nachfragegruppe (Nachfragesegment, Nachfrageschicht, Nachfrageklasse)	<p>Eine ~ beschreibt einen Teil der Nachfrage mit vergleichbarem Verhalten bei den Wahlentscheidungen. Typische ~ im Personenverkehr sind Wegezwecke, ggf. differenziert nach Personengruppen. Im Güterverkehr kann die Nachfrage nach Gutart differenziert werden. Mit Clusteranalysen kann die Nachfrage in geeignete Gruppen unterteilt werden. Häufig werden aber auch Personengruppen oder Wegezwecke aus anderen Untersuchungen oder aus der Literatur übernommen (siehe zum Beispiel SCHNABEL & LOHSE (1997)).</p> <p>Während sich der Begriff der Nachfragegruppe eignet, um die Nachfrage bei Wahlentscheidungen zu differenzieren, wird der Begriff der Verkehrsart genutzt, um die Nachfrage unabhängig von den Wahlentscheidungen zu differenzieren, z.B. in Nah- und Fernverkehr.</p>
Nachfragematrix (Wegematrix, Fahrtenmatrix, Verkehrsstrommatrix)	<p>Eine ~ enthält die Menge von Ortsveränderungen zwischen den Verkehrszellen.</p>
On-Demand-Angebot	<p>Ein ~ (im verkehrlichen Kontext) beschreibt ein Verkehrsangebot ohne festen Fahrplan, welches flexibel auf die Nachfrage seiner Kunden reagiert. Wird häufig auch als Mobility as a Service (MaaS) bezeichnet.</p>
ÖPNV	<p>Öffentlicher Personennahverkehr: umfasst die Verkehrsmittel des SPNV (Schienenpersonennahverkehr: Interregio-Express, Regionalexpress, Regionalbahn und S-Bahn) und des ÖSPV (öffentlicher Straßenpersonennahverkehr: Bus, U-Bahn, Stadtbahn, Tram)</p>
ÖV	<p>Öffentlicher Verkehr: umfasst Verkehrsmittel, die allen Bürgern zugänglich sind. Die Fahrtrouten und Abfahrtszeiten des ÖV sind in der Regel in einem Fahrplan vorgegeben.</p>
Parameter	<p>~ sind die Stellschrauben des Modells, mit deren Hilfe das Modell bei der Modellerstellung an die Realität angepasst wird.</p>
Parametereinstellung	<p>~ bezeichnet die Festlegung der Modellparameter durch eine Schätzung oder eine Setzung.</p>
PG	<p>Personengruppe</p>

Pkw	Personenkraftwagen
Pkw-Verfügbarkeit	~ beschreibt, ob eine Person regelmäßig oder nach Absprache Zugriff auf einen Pkw hat, den der Haushalt besitzt. Die Personeneigenschaft ~ wird in der Verkehrsnachfragemodellierung als erklärende Variable in der Moduswahl genutzt. Die ~ entspricht nicht dem Motorisierungsgrad, da sich Personen eines Haushalts ein Fahrzeug teilen können. Der Zusammenhang zwischen Motorisierungsgrad und ~ kann aus Haushaltsbefragungen abgeleitet werden.
Planfall (Szenario)	~ beschreibt einen denkbaren Zustand zum Prognosezeitpunkt, geht dabei aber im Gegensatz zum Bezugsfall von zusätzlichen Maßnahmen oder anderen (Struktur-) Entwicklungen aus.
Planungsraum	~ umfasst den räumlichen Bereich, in dem die planungsauslösenden Defizite liegen und mögliche Maßnahmen ihre Wirkungen ausüben. (WERMUTH (2005, S. 250))
POI	Points-of-Interest
Produktionsrate	Die Produktionsraten (oder das spezifische Verkehrsaufkommen) beschreiben die mittlere Wegeanzahl pro Tag und Person.
Prognosezeitpunkt	~ beschreibt einen Zeitpunkt in der Zukunft. Der ~ liegt bezogen auf den Analysezeitpunkt meist zwischen 10 und 20 Jahren in der Zukunft.
Punktprognose	~ beschreibt eine Prognose, bei der alle Modellergebnisse genau einen Wert annehmen. Es werden keine Streubreiche der Modellergebnisse ermittelt.
QA	Quellaufkommen
Randsummenbedingungen der Verkehrserzeugung	<p>In Modellen der Verkehrserzeugung wird die Anzahl der erzeugten und angezogenen Wege pro Verkehrszelle berechnet. Spezielle ~ bestimmen dabei, inwieweit diese Anzahl flexibel / elastisch ist:</p> <ul style="list-style-type: none">• Wenn das Quell- und Zielverkehrsaufkommen der Verkehrszellen in der Verkehrserzeugung durch die maßgebenden Siedlungsstrukturdaten direkt bestimmt werden kann und somit deren Erreichbarkeit ohne Bedeutung ist, werden harte (oder unelastische) ~ verwendet. Dies ist in der Regel für Wege mit Pflichtaktivitäten der Fall.

**Randsummenbedingungen der Verkehrserzeugung
(Fortsetzung)**

- Wenn das Quell- und Zielverkehrsaufkommen der Verkehrszellen in der Verkehrserzeugung nur bedingt durch die maßgebenden Siedlungsstrukturdaten (im Sinne einer minimal nötigen und maximal möglichen Wegeanzahl) bestimmt werden kann und somit deren Erreichbarkeit ebenfalls in die Berechnung einfließt, werden weiche (oder elastische) ~ verwendet. Dies ist in der Regel für Wege mit substituierbaren Aktivitäten der Fall.
- Ein Sonderfall der weichen ~ sind offene ~. Hierbei wird durch die maßgebende Siedlungsstrukturgröße kein minimal nötiges oder maximal mögliches Verkehrsaufkommen vorgegeben, sodass die berechnete Wegeanzahl ausschließlich von der Erreichbarkeit der Siedlungsstrukturgröße abhängig ist. Dies ist in der Regel für Freizeitwege der Fall.

Realitätstests

~ prüfen die Prognosefähigkeit eines Modells, in dem die Variablen des Modells verändert werden. Dazu werden das Verkehrsangebot oder die Siedlungsstrukturdaten im Analysefall in kontrollierter Weise verändert (z.B. Veränderung der Fahrtzeit, der Preise oder der Einwohnerzahl). Dann wird überprüft, ob die Modellergebnisse in der erwarteten Größenordnung liegen.

**Reiseweite
(Wegeweite)**

~ beschreibt die zurückgelegte Entfernung eines Weges einer Einzelperson.

**Reisezeit
(Wegezeit, Wegedauer)**

~ beschreibt die benötigte Zeit einer Einzelperson zum Zurücklegen eines Weges.

Relation

Quelle-Ziel-Relation

**Routen- bzw. Verbindungswahl
(Umlegung)**

Bezeichnet die vierte Stufe des Vier-Stufen-Modells. In der ~ werden die Routen im Verkehrsnetz ermittelt und die Nachfrage auf die Routen und damit auf die Netzelemente (Strecken, Knoten) im Verkehrsnetz verteilt. Ergebnis sind Verkehrsstärken auf den Netzelementen.

RSA

Randsummenausgleich

RSB

Randsummenbedingung

RSF

Randsummenfaktor

Rubberbanding

~ bezeichnet das Einhängen von Nicht-Pflichtaktivitätsorten zwischen die Orte von Wohn- und Pflichtaktivitäten.

Screenline	Eine ~ umfasst eine Menge von Strecken, die durch einen Polygonzug definiert werden. Alle Strecken, die durch den Polygonzug geschnitten werden, gehören zur ~, z.B. alle Brücken über einen Fluss. Die Verkehrsstärken aller Strecken einer ~ werden zu einer ~-Verkehrsstärke aufsummiert.
Sensitivitätstests	~ prüfen den Einfluss der Modellparameter auf das Model- ergebnis. Dabei werden die Modellvariablen – in der Regel die Modellvariablen des Analysefalls – unverändert gelassen, sodass Ergebnisänderungen auf einzelne Parameter zurückgeführt werden können.
Siedlungsstrukturdaten (Siedlungsstrukturgrößen, Strukturdaten)	„Die räumliche Struktur ist das Ergebnis des Zusammenwirkens aller für den Zustand eines Raumes wesentlichen Faktoren, also der natürlichen und administrativen Gegebenheiten, Arbeits- und Wohnstätten, Verkehrserschließung und -bedienung sowie Erholungs- und Freizeitmöglichkeiten. Die Raumstruktur ergibt sich also aus der Gesamtheit der räumlich verankerten Lebens- und Arbeitsverhältnisse, die sich weitgehend gegenseitig bedingen und somit den Aufbau oder das Gefüge des Raumes bestimmen und beeinflussen. Die Siedlungsstruktur ergibt sich aus dem quantitativen und qualitativen Verteilungsmuster von Wohnungen, Arbeitsstätten und Infrastruktur innerhalb eines bestimmten Gebietes. Der Begriff Raumstruktur wird häufig im Zusammenhang mit dem Begriff Siedlungsstruktur als Begriffspaar „Raum- und Siedlungsstruktur“ verwendet.“ (AKADEMIE FÜR RAUMFORSCHUNG UND LANDESPLANUNG (2018))
Simultane Modellstufen (integrierte, kombinierte oder gekoppelte Modellstufen)	~ werden im Gegensatz zu sequentiellen berechneten Modellstufen nicht einzeln und nacheinander berechnet, sondern in einem gemeinsamen Rechenschritt. Es wird in hierarchisch simultane und vollständig simultane Modellstufen unterschieden: <ul style="list-style-type: none">• Für hierarchisch simultane Modelle kommen sog. Log-Summen oder Nested-Logit-Modelle zum Einsatz.• Vollständig simultane Modelle lösen ein trilineares Gleichungssystem, das die drei Wahlereignisse Quelle / Ziel / Modus abbildet. Hierfür werden spezielle Lösungsverfahren wie MULTI oder FURNESS verwendet.
Spinnenauswertung	Eine ~ umfasst eine Teilmenge der Routen einer Nachfragegruppe. Sie kann als ein Routenfilter bezeichnet werden. Filterkriterien können dabei sein: Quellverkehrszelle, Zielverkehrszelle, überfahrene Netzelemente etc.
SrV	System repräsentativer Verkehrsbefragungen bzw. Mobilität in Städten (SRV (2019); siehe Mobilitätserhebungen)
sV	Spezifisches Verkehrsaufkommen, siehe Produktionsrate

Szenario	siehe Planfall
Startwartezeit	~ beschreibt den Zeitpuffer, den ein Fahrgast im ÖV zwischen Ankunft an der Starthaltestelle und der Abfahrt einplant.
TET	Teilzeiterwerbstätige
Überprüfung	~ ist ein allgemeiner Begriff für die Kontrolle von Eingangsdaten und Ergebnisdaten.
Umlegung	siehe Routen- bzw. Verbindungswahl
Untersuchungsraum	~ umfasst den Planungsraum und den Einflussraum.
UR	Untersuchungsraum
Validierung	~ bezeichnet die Überprüfung der Modellparameter, der Modellergebnisse und des Modellverhaltens mit geeigneten Gütemaßen und Tests.
Variablen	~ eines Verkehrsnachfragemodells umfassen Größen, die sich im Laufe der Zeit verändern (z.B. Bevölkerungsstruktur oder Energiepreise) oder die durch planerische Entscheidungen (z.B. ein neues Siedlungsgebiet, eine neue Straße, eine neue ÖV-Linie, Gebühren für die Nutzung von Straßen, Parkplätzen und öffentlichen Verkehrsmitteln) gesetzt werden.
Verbindung (Zeit-Weg-Trajektorie)	~ bezeichnet eine zeitlich differenzierte Route. Während bei einer statischen Umlegung die Nachfrage auf eine Menge von räumlich unterschiedlichen Routen, deren Eigenschaften sich im Betrachtungszeitraum nicht ändern, verteilt wird, ist bei dynamischen Umlegungen neben der Route auch der Zeitpunkt der Ortsveränderung relevant.
Verifizierung	~ bezeichnet den Vorgang, bei dem eine unabhängige Person überprüft, ob zwischen Modellbesteller und Modellersteller vereinbarte Vorgaben tatsächlich umgesetzt wurden.
Verkehrsart	~ beschreibt eine Menge von Verkehrselementen mit gleichen Merkmalen (FGSV (2012a, S. 28)). Verkehrsarten eignen sich, z.B. um Verkehrsmittel (Pkw, Lkw, Bus, Bahn, etc.), Verkehrsmodi (Pkw, ÖV, Straßengüterverkehr) oder räumliche Ausprägungen (Binnen-, Quell-, Ziel-, Durchgangsverkehr oder Nah-, Fernverkehr) zu unterscheiden.
Verkehrserzeugung (Aktivitätenwahl)	Bezeichnet die erste Stufe des Vier-Stufen-Modells. In der ~ wird die Zahl der Ortsveränderungen bestimmt, die von den Bewohnern des Untersuchungsraumes in einem Zeitraum durchgeführt werden. Ergebnis dieses Teilmodells sind die produzierten und angezogenen Ortsveränderungen einer Nachfragegruppe.

Verkehrsstärke	~ ist eine Einheit für die Anzahl der Verkehrseinheiten pro Zeiteinheit an einem bestimmten Streckenquerschnitt, z.B. Fahrzeuge / Stunde (BRILON (2005, S. 327)).
Verkehrszelle (Zelle)	~ beschreibt eine Raumeinheit, die den Raum gliedert.
VET	Vollzeiterwerbstätige
Vier-Stufen-Algorithmus	Bezeichnung für die sequentielle Berechnung der Modellstufen Verkehrserzeugung, Zielwahl, Moduswahl und Umlegung (inkl. Routen- bzw. Verbindungssuche und Routen- bzw. Verbindungs-wahl).
WISEM	~ (V erkehr I n S tädten E rzeugungs- M odell) ist die softwareseitige Umsetzung eines aktivitätenbasierten Wegekettenmodells in der Verkehrsplanungssoftware PTV VISUM.
Wegekettenmodell (aktivitätenbasiertes Wegekettenmodell)	Ein ~ betrachtet alle Wege bzw. Aktivitäten einer Person während einer geschlossenen Rundtour – vom Verlassen der Wohnung bis zur Rückkehr. Es entstehen dadurch sogenannte Aktivitätsketten, z.B. Wohnen – Arbeiten – Einkaufen – Wohnen. Werden den Aktivitäten der Kette Aktivitätenorte zugewiesen, wird die Aktivitätskette in eine Wegekette mit Ortsbezug überführt.
Wirtschaftsverkehr	~ bezeichnet die Obermenge von Güterverkehr und Personenwirtschaftsverkehr. ~ beschreibt alle außerbetrieblichen Ortsveränderungen aufgrund von wirtschaftlicher Aktivität.
ZA	Zielaufkommen
Zählung	Mit einer ~ werden Mengen von Verkehrselementen (Personen, Fahrzeuge) im Verkehrsnetz erfasst.
Zeitraum (Zeitscheibe, Zeitintervall)	~ beschreibt eine Zeitdauer, meist in der Größenordnung von 15 Minuten bis zu mehreren Stunden oder einem Tag. In diesem Zeitraum werden Nachfrage und Angebot als konstant angenommen.
Zellenschwerpunkt	Im ~ werden – analoge der Massepunkte in der Physik – alle Raum- und Siedlungsstrukturorte (Aktivitätenorte) der jeweiligen Verkehrszelle gebündelt. ~ sind damit Start und Ziel jeder Ortsveränderung im Modell.
Zielwahl (Verkehrsverteilung)	Bezeichnet die zweite Stufe des Vier-Stufen-Modells. In der ~ werden die Quellen und die Ziele der Ortsveränderungen und somit die Ortsveränderungen zwischen den Verkehrszellen ermittelt. Ergebnis dieses Teilmodells ist eine Nachfragematrix je Nachfragegruppe.

9 Formelverzeichnis

Mengen und Indizes

$g \in G$	Menge G der Nachfragegruppen g (Personengruppen, Wegezwecke)
$i \in I$	Menge I der Alternativen i
$k \in K$	Menge K der Attribute, Kenngrößen, Siedlungsstrukturgrößen oder Verteilungsklassen k
$m \in M$	Menge M der Modi m
$p_g \in P_g$	Menge P_g der Agenten p_g der Personengruppe g
$r \in R$	Menge R der Routen oder Verbindungen r
$s \in S$	Menge S der Netzelemente s (supply)
$z \in Z$ $o \in Z$ $d \in Z$	Menge Z der Zellen z , Quellverkehrszellen o (origin) und Zielverkehrszellen d (destination)

Parameter

β	allgemeiner Parameter
β_g	Parameter der Bewertungsfunktion der Gruppe g
β_{kgi}	Parameter zur Gewichtung des Attributes k der Alternative i für die Gruppe g
β_{0gi}	alternativenspezifische Konstante der Alternative i für die Gruppe g
β_{kg}^a	Attraktionsrate der Nachfragegruppe g für die k . Siedlungsstrukturgröße
β_{kg}^p	Produktionsrate der Nachfragegruppe g für die k . Siedlungsstrukturgröße
β_{kg}^d	Aufwandsempfindlichkeitsparameter der Nachfragegruppe g bei der Zielwahl für die k . Kenngröße der Angebotsqualität
β_{kgm}^m	Aufwandsempfindlichkeitsparameter der Nachfragegruppe g bei der Moduswahl für die k . Kenngröße der Angebotsqualität mit dem Modus m
β_{0gm}^m	modusspezifische Konstante
β_{go}	Nest-Parameter der Nachfragegruppe g in der Quellverkehrszelle o (im Nested-Logit-Modell)

Variablenbezeichner

c_{gm}	Gewichtskonstante c des Modus m der Nachfragegruppe g
d	allgemeiner Bezeichner für Ortsveränderungen (demand) bzw. für den Gesamtverkehr der Matrix D
d_{gd}^a	angezogene Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Zielverkehrszelle d
$d_{gd}^{a,\min}$	minimal angezogene Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Zielverkehrszelle d
$d_{gd}^{a,\max}$	maximal angezogene Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Zielverkehrszelle d
d_{go}^p	produzierte Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Quellverkehrszelle o
$d_{go}^{p,\min}$	minimal produzierte Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Quellverkehrszelle o
$d_{go}^{p,\max}$	maximal produzierte Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g in der Quellverkehrszelle o
d_{god}	Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d
d_{godm}	Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d mit dem Modus m
d_{gm}	Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g mit dem Modus m
d_{godmr}	Ortsveränderungen d der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d mit dem Modus m auf Route r
ε_{gi}	zufallsabhängiger, stochastischer Nutzenbetrag ε der Alternative i für die Gruppe g
$f(v_{gi})$	bewertete Nutzenfunktion v_{gi}
$f(v_{god})$	bewertete Nutzenfunktion v_{god}
$f(v_{godm})$	bewertete Nutzenfunktion v_{godm}
$f(x_{god})$	bewertete Log-Summe x_{god}
$f_{d_{gd}^a}$	Anpassungsfaktoren für das zieleitige Verkehrsaufkommen zur Lösung des bi- bzw. trilinearen Gleichungssystems
$f_{d_{go}^p}$	Anpassungsfaktoren für das quellseitige Verkehrsaufkommen zur Lösung des bi- bzw. trilinearen Gleichungssystems

f_{dgm}	Anpassungsfaktoren für das modusseitige Verkehrsaufkommen zur Lösung des trilinearen Gleichungssystems
N_g^G	Größe der Personengruppe g in der Grundgesamtheit G
N_g^S	Größe der Personengruppe g in der Stichprobe S
N^G	Größe der Grundgesamtheit G über alle Personengruppen g
p_{gi}	Wahrscheinlichkeit p , dass eine Person der Gruppe g die Alternative i wählt
p_{godm}	Wahrscheinlichkeit p für eine Ortsveränderung der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d mit dem Modus m
p_{gomnqd}	Wahrscheinlichkeit p für eine Ortsveränderung der Nachfragegruppe g von Verkehrszelle o nach d über m , n und q
q_s	Verkehrsstärke q des Netzelementes s
u_{gi}	subjektiver Gesamtnutzen u der Alternative i für die Gruppe g
u_{go}^a	Anteil der Ortsveränderungen des angezogenen Verkehrs in der Quellverkehrszelle o , deren Quelle und Ziel im Untersuchungsraum liegt
u_{gd}^p	Anteil der Ortsveränderungen des produzierten Verkehrs in der Zielverkehrszelle d , deren Quelle und Ziel im Untersuchungsraum liegt
v_{gi}	deterministischer, objektiver Nutzenbetrag v der Alternative i für die Gruppe g
v_{god}	Nutzenfunktion v für eine Ortsveränderung der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d
v_{godm}	Nutzenfunktion v für eine Ortsveränderung der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d mit dem Modus m
w_{pg}	Gewicht w des Agenten p der Personengruppe g in der Stichprobe S
x_{god}	Log-Summe der Nutzen über alle Modi für eine Ortsveränderungen d zwischen Zelle o und Zelle d
x_{kgi}	Wert x des Attributes k der Alternative i für die Gruppe g
x_{kod}	Wert x der Kenngröße k zur Beschreibung der Angebotsqualität zwischen den Verkehrszellen o und d
x_{kodm}	Wert x der Kenngröße k zur Beschreibung der Angebotsqualität zwischen den Verkehrszellen o und d mit dem Modus m

Δx_{kod}	relative Abweichung Δx zwischen gewünschter und tatsächlicher Kenngröße k
z_{zk}	Wert z einer Siedlungsstrukturgröße k in der Verkehrszelle z (z.B. Personen einer Personengruppe, Arbeitsplätze, Einkaufsgelegenheiten)
Δz_{zk}	verfügbare Siedlungsstrukturgrößenplätze z der Siedlungsstrukturgröße k in der Verkehrszelle z

Matrizen

D	Nachfragematrix
D^c	Referenzmatrix
D^m	Vergleichsmatrix

Gütemaße

a	absolute Abweichung
c	Erhebungswert
c_s^{rel}	relative Verkehrsstärke des Referenzmodells (m) auf Strecke s
CR	Coincidence Ratio
d_{od}^c	(absolute) Nachfrage d zwischen den Verkehrszellen o und d der Referenzmatrix D^c
$d_{od}^{c,rel}$	relative Nachfrage d zwischen den Verkehrszellen o und d der Referenzmatrix D^c
d_{od}^m	(absolute) Nachfrage d zwischen den Verkehrszellen o und d der Vergleichsmatrix D^m
$d_{od}^{m,rel}$	relative Nachfrage d zwischen den Verkehrszellen o und d der Vergleichsmatrix D^m
d_t	Nachfrage zum Zustand t
ε	Preiselastizität
f	Skalierungsfaktor
f_a^M	absoluter mittleren Modellfehler
$f_{r,t}^P$	relativer Prognoseannahmefehler des Sensitivitätstest t

GEH	Gütemaß GEH (benannt Geoffrey E. Havers)
m	Modellwert
m_{Modell}	„normale“ (Punkt-) Modellprognose
m_{Prognose}	Modellprognose
$m_{\text{Prognose},t}$	Modellprognose mit Sensitivitätsannahmen t
m_{Prognose}^-	minimale Modellprognose
m_{Prognose}^+	maximale Modellprognose
m_s^{rel}	relative Verkehrsstärke des Vergleichsmodells auf Strecke s
MAE	mittlerer absoluter Fehler
$\%MAE$	relativer mittlerer absoluter Fehler
ME	mittlerer Fehler
$mwSQV$	(engl.: mean weighted SQV) mittlerer, gewichteter SQV (über alle Verteilungsklassen bzw. über alle Matrixelemente bzw. über alle Strecken im Dreiecksnetz)
r	relative Abweichung
R	Korrelationskoeffizient
$RMSE$	Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers
$\%RMSE$	relative Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers
s_x	Standardabweichungen der Verteilungen x
SQV	Gütemaß SQV (Scalable Quality Value)
SQV_k	SQV für die Verteilungsklasse k
SQV_s	SQV für die Strecke s
SQV_{od}	SQV für eine Ortsveränderung zwischen den Verkehrszellen o und d
U^M	Fehler, der aus systematischen Unterschieden in den Mittelwerten resultiert
U^S	Fehler, der aus systematischen Unterschieden in den Varianzen resultiert
U^C	Fehler, der aus unsystematischen, zufälligen Fehlern resultiert
\bar{x}	Mittelwerte der Verteilungen x über alle Klassen

x_k	Häufigkeiten der Verteilungen x in Verteilungsklasse k
x_k^{rel}	relative Häufigkeiten der Verteilungen x in Verteilungsklasse k
x_t	Kenngroße zum Zustand t

10 Anhang

Anhang 1 Berechnung des Kennwertmodells der Verkehrserzeugung

Typ	Quellverkehrsaufkommen $d_{go}^p, d_{go}^{p,\max}$	Gesamtverkehrsaufkommen d	Zielverkehrsaufkommen $d_{gd}^a, d_{gd}^{a,\max}$
1	1. Schritt: $d_{go}^p = u_{go}^p \cdot \sum_{k=1}^K (\beta_{kg}^p \cdot z_{ok})$	2. Schritt: $d = \sum_{o \in Z} d_{go}^p$	3. Schritt: $d_{gd}^a = f_d \cdot u_{gd}^a \cdot \sum_{k=1}^K (\beta_{kg}^a \cdot z_{dk})$ $f_d = \frac{d}{\sum_{d \in Z} \left(u_{gd}^a \cdot \sum_{k=1}^K (\beta_{kg}^a \cdot z_{dk}) \right)}$
2	3. Schritt: $d_{go}^p = f_o \cdot u_{go}^p \cdot \sum_{k=1}^K (\beta_{kg}^p \cdot z_{ok})$ $f_o = \frac{d}{\sum_{o \in Z} \left(u_{go}^p \cdot \sum_{k=1}^K (\beta_{kg}^p \cdot z_{ok}) \right)}$	2. Schritt: $d = \sum_{d \in Z} d_{gd}^a$	1. Schritt: $d_{gd}^a = u_{gd}^a \cdot \sum_{k=1}^K (\beta_{kg}^a \cdot z_{dk})$
3 (ohne RSA 2)	2. Schritt: $d_{go}^p = f_o \cdot u_{go}^p \cdot \sum_{k=1}^K (\beta_{kg}^p \cdot z_{ok})$ $f_o = \frac{d}{\sum_{o \in Z} \left(u_{go}^p \cdot \sum_{k=1}^K (\beta_{kg}^p \cdot z_{ok}) \right)}$	1. Schritt: $d = \sum_{z \in Z} \left(u_{gz}^p \cdot \sum_{k=1}^K (\beta_{kg}^p \cdot z_{zk}) \right)$	2. Schritt: $d_{gd}^a = f_d \cdot u_{gd}^a \cdot \sum_{k=1}^K (\beta_{kg}^a \cdot z_{dk})$ $f_d = \frac{d}{\sum_{d \in Z} \left(u_{gd}^a \cdot \sum_{k=1}^K (\beta_{kg}^a \cdot z_{dk}) \right)}$
3 (mit RSA 2)	2. Schritt: $d_{go}^p = f_o \cdot u_{go}^p \cdot \sum_{k=1}^K (\beta_{kg}^p \cdot z_{ok}) \cdot \left(\frac{\sum_{o \in Z} \Delta d_{go}^{p*}}{d} + \Delta d_{go}^{p*} \right)$ $f_o = \frac{d}{\sum_{o \in Z} \left(u_{go}^p \cdot \sum_{k=1}^K (\beta_{kg}^p \cdot z_{ok}) \right)}$ $\Delta d_{go}^{p*} = \max \left(0; \sum_{\text{Typ1 \& 2}} d_{gd, OZG-\text{Typ1 \& 2}}^a - \sum_{\text{Typ1 \& 2}} d_{go, OZG-\text{Typ1 \& 2}}^p \right)$	1. Schritt: $d = \sum_{z \in Z} \left(u_{gz}^p \cdot \sum_{k=1}^K (\beta_{kg}^p \cdot z_{zk}) \right)$	2. Schritt: $d_{gd}^a = f_d \cdot u_{gd}^a \cdot \sum_{k=1}^K (\beta_{kg}^a \cdot z_{dk}) \cdot \left(\frac{\sum_{d \in Z} \Delta d_{gd}^{a*}}{d} + \Delta d_{gd}^{a*} \right)$ $f_d = \frac{d}{\sum_{d \in Z} \left(u_{gd}^a \cdot \sum_{k=1}^K (\beta_{kg}^a \cdot z_{dk}) \right)}$ $\Delta d_{gd}^{a*} = \max \left(0; \sum_{\text{Typ1 \& 2}} d_{go, OZG-\text{Typ1 \& 2}}^p - \sum_{\text{Typ1 \& 2}} d_{gd, OZG-\text{Typ1 \& 2}}^a \right)$

Abbildung 39: Berechnungsansätze des Kennwertmodells der Verkehrserzeugung
(Bildquelle: modifizierte Abbildung in Anlehnung an
SCHNABEL & LOHSE (1997, S. 166 f.)).

Anhang 2 Verhaltenskodex für Spezialisten im Bereich der Simulation

Übersetzung des „Simulationist Code of Ethics“ der „Society for Modeling & Simulation International“ (SCS (2019), übersetzt vom Eric Pestel im Rahmen der vorliegenden Dissertation):

Präambel

Spezialisten im Bereich der Simulation sind in einem oder mehreren der folgenden Bereiche tätig:

- Modellierungs- und Simulationsaktivitäten.
- Bereitstellung von Modellierungs- und Simulationsprodukten.
- Bereitstellung von Modellierungs- und Simulationsdienstleistungen.

1. Persönliche Entwicklung und Tätigkeitsbereich

Als Spezialist im Bereich der Simulation werde ich:

- 1.1 Fachliche Kompetenzen und Haltungen erwerben und aufrechterhalten.
- 1.2 Angestellte, Kunden, Nutzer, Kollegen und Arbeitgeber fair behandeln.
- 1.3 Berufsanfänger ermutigen und unterstützen.
- 1.4 Kollegen und Angehörige anderer Professionen unterstützen, die sich mit Modellierung und Simulation befassen.
- 1.5 Kollegen dabei unterstützen, zuverlässige Ergebnisse zu erzielen.
- 1.6 Den zuverlässigen und glaubwürdigen Einsatz von Modellierung und Simulation fördern.
- 1.7 Die Profession der Modellierung und Simulation fördern; z.B. die öffentliche Kenntnis und Wertschätzung von Modellierung und Simulation fördern und falsche oder irreführende Aussagen klären und ihnen entgegenwirken.

2. Fachliche Kompetenz

Als Spezialist im Bereich der Simulation werde ich:

- 2.1 Die Qualität von Produkten und / oder Dienstleistungen durch den Einsatz geeigneter Methoden und Technologien sicherstellen.
- 2.2 Kritische professionelle Überprüfung einholen, anwenden und anbieten.
- 2.3 Geeignete und erreichbare Ziele für jedes Projekt empfehlen und festlegen.

- 2.4 Simulationsstudien und / oder -systeme für autorisierte Parteien verständlich und genau dokumentieren.
- 2.5 Alle Annahmen zum Systementwurf sowie bekannte Einschränkungen und Probleme gegenüber den autorisierten Parteien vollständig offenlegen.
- 2.6 Die Bedingungen für die Anwendbarkeit bestimmter Modelle und der damit verbundenen Simulationsergebnisse explizit und unmissverständlich darlegen.
- 2.7 Vor der Akzeptanz von Modellierungs- und Simulationsergebnissen warnen, wenn es keine ausreichenden Beweise für eine gründliche Validierung und Verifizierung gibt.
- 2.8 Gründliche und unvoreingenommene Interpretationen und Bewertungen der Ergebnisse von Modellierungs- und Simulationsstudien gewährleisten.

3. Glaubwürdigkeit

Als Spezialist im Bereich der Simulation werde ich:

- 3.1 Hinsichtlich aller Umstände, die zu einem Interessenkonflikt führen könnten, ehrlich sein.
- 3.2 Verträge, Vereinbarungen und zugewiesene Verantwortlichkeiten und Zuständigkeiten einhalten.
- 3.3 Dazu beitragen, ein organisatorisches Umfeld zu schaffen, das ethischem Verhalten förderlich ist.
- 3.4 Studien unterstützen, die den Menschen (dieser und zukünftiger Generationen) sowie der Umwelt keinen Schaden zufügen.

4. Eigentumsrechte und gebührende Würdigung

Als Spezialist im Bereich der Simulation werde ich:

- 4.1 Die Beiträge der anderen in vollem Umfang anerkennen.
- 4.2 Geistiges Eigentum angemessen würdigen.
- 4.3 Eigentumsrechte einschließlich Urheberrechte und Patente achten.
- 4.4 Die Persönlichkeitsrechte von Einzelpersonen und Organisationen sowie die Vertraulichkeit der relevanten Daten und Kenntnisse achten.

5. Einhaltung des Kodex

Als Spezialist im Bereich der Simulation werde ich:

- 5.1 mich an diesen Kodex halten und andere Spezialisten im Bereich der Simulation ermutigen, sich daran zu halten.
- 5.2 Verstöße gegen diesen Kodex als unvereinbar mit der Profession der Modellierung und Simulation behandeln.
- 5.3 Rat von fachlichen Kollegen einholen, wenn ich mit einem ethischen Dilemma bei Modellierungs- und Simulationsaktivitäten konfrontiert bin.
- 5.4 Jede professionelle Gesellschaft, die diesen Kodex unterstützt, über wünschenswerte Aktualisierungen beraten.

Anhang 3 Empfehlungen zur Überprüfung der Modellergebnisse

	Kenngröße	Differenzierung		Kontrollda- ten	statistisches Gütemaß
		inhaltlich	räumlich		
Verkehrsaufkommen	mittlere Anzahl Wege pro Person	<ul style="list-style-type: none"> • alle Einwohner • pro Modus • pro NGruppe • pro Modus x NGruppe 	<ul style="list-style-type: none"> • gesamter UR • Teilräume 	HH-Bef	<ul style="list-style-type: none"> • Gütemaß SQV für $f = 1$
Verkehrsleistung	Reiseweitenverteilung [km] pro Weg	<ul style="list-style-type: none"> • alle Einwohner • pro Modus • pro NGruppe 	<ul style="list-style-type: none"> • gesamter UR 	HH-Bef	<ul style="list-style-type: none"> • mittlere Reiseweite pro Weg: Gütemaß SQV für $f = 10$ • Reiseweitenverteilung: $CR \geq 0,7$
	mittlere Verkehrsleistung [km] pro Person	<ul style="list-style-type: none"> • alle Einwohner • pro Modus • pro NGruppe • Modus ÖV • ÖV-Betriebszweige 	<ul style="list-style-type: none"> • gesamter UR • Teilräume 	HH-Bef ÖV-Erhebung	<ul style="list-style-type: none"> • mittlere Reiseweite pro Tag: Gütemaß SQV für $f = 10$
Verkehrszeitaufwand	Reisezeitverteilung [min] pro Weg	<ul style="list-style-type: none"> • alle Einwohner • pro Modus • pro NGruppe 	<ul style="list-style-type: none"> • gesamter UR 	HH-Bef	<ul style="list-style-type: none"> • mittlere Reisezeit pro Weg: Gütemaß SQV für $f = 30$ • Reisezeitverteilung: $CR \geq 0,7$
	mittlerer Verkehrszeitaufwand [min] pro Person	<ul style="list-style-type: none"> • alle Einwohner • pro Modus • pro NGruppe 	<ul style="list-style-type: none"> • gesamter UR 	HH-Bef	<ul style="list-style-type: none"> • mittlere Reisezeit pro Tag: Gütemaß SQV für $f = 100$
Verkehrsstärke	tägliche und stündliche Verkehrsstärke	<ul style="list-style-type: none"> • Pkw • Lkw • Rad • Bus • Bahn 	<ul style="list-style-type: none"> • Screenline • Strecke • Abbieger • Strecke einer Linienroute • Haltestellen 	Zählung	<ul style="list-style-type: none"> • Tageswerte: Gütemaß SQV für $f = 10.000$ • Stundenwerte: Gütemaß SQV für $f = 1.000$
Matrixkorrektur	mittlere Anzahl Wege pro Person in der Matrix nach Matrixkorrektur	<ul style="list-style-type: none"> • pro Modus 	<ul style="list-style-type: none"> • gesamter UR • Teilräume 	Matrix vor Matrixkorrektur	<ul style="list-style-type: none"> • Ausweisung des $\%MAE$, des mittleren SQV aus normierten Matrixsummen und des $mwSQV$ (optional) jeweils für alle Korrekturen und gesondert für positive und negative Korrekturen
	mittlere Verkehrsleistung [km] pro Person in der Matrix nach Matrixkorrektur				

	Kenngröße	Differenzierung		Kontrolldaten	statistisches Gütemaß
		inhaltlich	räumlich		
Matrixkorrektur	Verkehrsstärke, aus Bestwegumlegung der Matrizen vor und nach der Korrektur	<ul style="list-style-type: none"> • pro Modus 	<ul style="list-style-type: none"> • gesamter UR 	Matrix vor Matrixkorrektur	<ul style="list-style-type: none"> • grafische Darstellung (Differenzplot) • optional: Auswertung der <i>SQV</i>-Statistik (für Tageswerte: $f = 10.000$; für Stundenwerte: $f = 1.000$)
Fahrtzeiten	Fahrtzeiten zwischen zwei Punkten im Netz	<ul style="list-style-type: none"> • unbelastetes Netz • belastetes Netz für relevante Tageszeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Streckenzug • Relationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrtzeitmessung • Floating Car Data • Fahrplandaten 	<ul style="list-style-type: none"> • absolute Abweichungen nach Abbildung 15 (S. 71) auf 20 bis 50 Relationen oder charakteristischen Streckenzügen
<p>HH-Bef: Haushaltsbefragung mit Wegetagebüchern. Die Datensätze sollten gewichtet vorliegen. Für die Validierung werden alle Wege der Einwohner im Erhebungsraum der Haushaltsbefragung genutzt. Es werden nur solche Wege als Kontrolldaten berücksichtigt, die im Untersuchungsraum beginnen und enden.</p> <p>ÖV-Erhebung: Quelle-Ziel-Befragungen im ÖV-Fahrzeug, die mit Einsteigerzählungen hochgerechnet werden oder aus Fahrkartendaten abgeleitete Verkehrsleistung.</p> <p>UR: Untersuchungsraum, in dem die Verkehrsnachfrage modelliert wird.</p> <p>NGruppe: Nachfragegruppe (Personengruppe und / oder Wegezweck)</p> <p>Alle Kenngrößen beziehen sich auf einen Tag.</p>					

Tabelle 18: Empfehlungen zur Überprüfung der Modellergebnisse in Anlehnung an FRIEDRICH ET AL. (2019b, S. 186).

Anhang 4 Dokumentation des Wegetagebuchgenerators für die Untersuchungen in Kapitel 5

Im Folgenden werden die wichtigsten Spezifikationen und Funktionsweisen des Wegetagebuchgenerators näher erläutert.

Spezifikationen

Allgemeine Spezifikationen

Der Wegetagebuchgenerator liefert reproduzierbare Ergebnisse. Zu diesem Zweck muss zu Beginn eine Startzufallszahl festgelegt werden. Zudem kann er mehrere Simulationen berechnen. Im Sinne eines makroskopischen Verkehrsnachfragemodells werden die Ergebnisse der einzelnen Simulationen im Anschluss zu nicht-ganzzahligen Ergebnissen gemittelt.

Spezifikationen des Netzes

Es sind die Anzahl an Verkehrszellen, die Modellausdehnung, der Mindestabstand zwischen zwei Verkehrszellen sowie die Geschwindigkeiten auf den Strecken zu definieren.

Spezifikationen der Siedlungsstrukturgrößen und der Personengruppen

Es ist zu definieren, welche Siedlungsstrukturgrößen im Netz vorkommen und wie groß deren maximale Aufnahmefähigkeit (= Potenzial) ist.

Analog zu den Siedlungsstrukturgrößen, ist bei den Personengruppen zu definieren, welche Personengruppen vorkommen und wie viele Personen zu einer Personengruppe zählen. Außerdem können Personen bzw. Agenten einer Personengruppe Pflichtaktivitäten zugewiesen, ein gewisser Anteil als immobil definiert und der Motorisierungsgrad je Gruppe festgelegt werden.

Spezifikation der Aktivitätenketten

Es werden Aktivitätenketten aus einer Haushaltsbefragung⁶⁵ (VRS (2011)) in ihrer feinstmöglichen inhaltlichen Auflösung (Personengruppen, Aktivitäten und Modus des nächs-

⁶⁵ Folgende Modifikationen sind dabei zu berücksichtigen:

- Die Aktivitätenketten sind teilweise sehr lang (maximale Länge = 22 Aktivitäten).
- Die Aktivitätenketten beginnen und enden alle mit der Aktivität Wohnen.
- Tritt die Aktivität Wohnen mehrmals hintereinander auf, werden diese Einzelaktivitäten zusammengefasst (W–W–W → W). Daraus folgt, dass die minimale Aktivitätenkettenlänge 3 beträgt.

ten Weges) und zeitlichen Auflösung (Dauer der Aktivitäten) vorgegeben. Unter Berücksichtigung einer maximalen Anzahl von Aktivitäten pro Aktivitätenkette zieht der Wegetagebuchgenerator zufällig aus dieser vorgegebenen Liste. Dies hat den Vorteil, dass es sich um sehr realistische – weil real durchgeführte – Aktivitätenketten handelt und somit die Komplexität der Modellierung reduziert wird. Da sich die Aktivitäten und Personengruppen der Haushaltsbefragung und des Wegetagebuchgenerators unterscheiden, müssen sie mittels *1:n*-Zuordnungslisten verknüpft werden.

Spezifikationen der Nachfrageberechnung

Es ist festzulegen, anhand welcher Kriterien ein Agent seine Aktivitäten bzw. die zugehörigen Aktivitätenorte auswählt. Dazu sind eine Kenngröße für die Widerstandsberechnung, ein Nutzenparameter, der Typ des Wahlmodells (z.B. ein zweiseitig gewichtetes Logit-Modell) und ein Zellinnenwiderstand zu definieren.

Methodik des Wegetagebuchgenerators

Erzeugung der Raum- und Soziostruktur

Zu Beginn wird die räumliche Lage der Verkehrszellen bestimmt. Die Verkehrszellen werden dabei durch zufälliges Ziehen (unter Berücksichtigung vorgegebener Grenzen) angeordnet. Anschließend werden jeder Verkehrszelle ein zufälliger Anteil Personengruppen und Siedlungsstrukturgrößen zugeordnet. Auch hierbei werden vorgegebene Randbedingungen berücksichtigt. Das Ergebnis dieses Schrittes ist in allen Simulationen identisch.

Erzeugung der Personen

Im nächsten Schritt bekommt jeder Agent eine zufällig gezogene Verkehrszelle als Wohnortzelle zugewiesen. Wenn diese Verkehrszelle keine mögliche Wohnortzelle sein kann, d.h., wenn die Gesamtzahl pro Personengruppe und Verkehrszelle schon erreicht ist, wird erneut gezogen. Auch das Ergebnis dieses Schrittes ist in allen Simulationen identisch.

Zuweisen weiterer Personeneigenschaften

Ab dieser Prozessstufe unterscheiden sich die einzelnen Simulationen, d.h. weitere Personeneigenschaften und die Lage der Aktivitätenorte unterscheidet sich für alle Agenten zwischen den Simulationen.

-
- Die Summe der Aktivitätendauern und der dazwischenliegenden Wege ergibt in der Haushaltsbefragung 24 Stunden. Hierbei wird die letzte Aktivitätendauer ggf. gestreckt. Dies muss aufgrund des abweichenden Netzes im Wegetagebuchgenerator nicht gelten, d.h. die Summe aus Wegedauern und Aktivitätendauern muss nicht 24 Stunden betragen.

Für jeden Agenten wird bestimmt, ob er mobil oder immobil ist und ob ihm ein Pkw zur Verfügung steht. Dafür wird mittels Monte-Carlo-Simulation ein vorgegebener Anteil reproduziert. Weiterhin wird jedem Agenten eine Aktivitätenkette aus einer vorgegebenen Menge an Aktivitätenketten zugewiesen. Dabei wird darauf geachtet,

- dass die Personengruppe und Pkw-Verfügbarkeit der gezogenen Aktivitätenkette zum betrachteten Agenten passt,
- dass die Aktivitätenkettenlänge die definierte Maximallänge nicht übersteigt,
- dass die Aktivitätenkette nur definierte Aktivitäten enthält,
- dass die Aktivitätenkette die Pflichtaktivität des betrachteten Agenten enthält und
- dass eine Aktivität nicht häufiger ausgeführt wird, als durch die Randsummenbedingung der Aktivität maximal zulässig ist.

Zielwahl der Pflichtaktivität

Nachdem die Population erzeugt und die Wohnortzellen, Aktivitätenketten etc. zugewiesen sind, wird für jeden Einwohner, der zu einer Personengruppe gehört, die eine Pflichtaktivitäten besitzt, ein Pflichtaktivitätenort bestimmt. Dies geschieht ohne Sortierung der Einwohner. Vor jeder Verkehrszellenzuweisung wird geprüft, ob in der Verkehrszelle noch Siedlungsstrukturgrößenplätze verfügbar sind – ggf. wird eine neue Verkehrszelle gezogen. Dies führt dazu, dass die Agenten zum Teil „gezwungen“ sind eine „unattraktive“ Verkehrszelle zu wählen. Alle folgenden Methoden berücksichtigen, dass nur eine endliche Anzahl von Siedlungsstrukturgrößenplätzen in einer Verkehrszelle verfügbar sind.

- Zufallsbasierte Zielwahl der Pflichtaktivität ohne Restriktionen:
Es wird eine Verkehrszelle gezogen, wobei alle Verkehrszellen die gleiche Auswahlwahrscheinlichkeit haben.
- Zufallsbasierte Zielwahl der Pflichtaktivität mit Entfernungsobergrenze:
Es wird eine Verkehrszelle gezogen, wobei alle Verkehrszellen die gleiche Auswahlwahrscheinlichkeit haben. Liegt die gewählte Verkehrszelle außerhalb einer festgelegten zweckspezifischen Entfernung zur Wohnortzelle, wird die Wahl verworfen und erneut gezogen.
- Zielwahl der Pflichtaktivität basierend auf einem ungewichteten Logit-Modell:
Die Agenten wählen ihre Pflichtaktivitätenzelle anhand einer Auswahlwahrscheinlichkeit p , die abhängig vom zu überwindenden Widerstand ist. Die Wahrscheinlichkeit wird mit einem Logit-Modell⁶⁶ bestimmt.

⁶⁶ Da die Quellverkehrszelle o eines Agenten bekannt ist, wird auf die Summierung über alle Quellen verzichtet. Wird $\beta = 0$ gewählt, wird die Auswahlwahrscheinlichkeit nur von den Strukturgrößen bestimmt (= Zufallsmodell).

$$p_{god} = \frac{\exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{kod})}{\sum_{d \in Z} \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{kod})} \quad (58)$$

mit

p_{god} Wahrscheinlichkeit p für eine Ortsveränderung der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d

β_{kg}^d Aufwandsempfindlichkeitsparameter der Nachfragegruppe g bei der Zielwahl für die k . Kenngröße der Angebotsqualität

x_{kod} Wert x der Kenngröße k zur Beschreibung der Angebotsqualität zwischen den Verkehrszellen o und d

Z Menge der Verkehrszellen

- Zielwahl der Pflichtaktivität basierend auf einem zieleseitig gewichteten Logit-Modell: Die Agenten wählen ihre Pflichtaktivitätenzelle anhand einer Auswahlwahrscheinlichkeit p , die abhängig vom zu überwindenden Widerstand ist. Die Wahrscheinlichkeit wird mit einem Logit-Modell⁶⁶ bestimmt, wobei die zieleseitige Siedlungsstrukturgröße k als Gewicht einfließt.

$$p_{god} = \frac{z_{dk} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{kod})}{\sum_{d \in Z} z_{dk} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{kod})} \quad (59)$$

mit

p_{god} Wahrscheinlichkeit p für eine Ortsveränderung der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d

z_{dk} Wert z einer Siedlungsstrukturgröße k in der Zielverkehrszelle d

β_{kg}^d Aufwandsempfindlichkeitsparameter der Nachfragegruppe g bei der Zielwahl für die k . Kenngröße der Angebotsqualität

x_{kod} Wert x der Kenngröße k zur Beschreibung der Angebotsqualität zwischen den Verkehrszellen o und d

Z Menge der Verkehrszellen

- Zielwahl der Pflichtaktivität basierend auf einem quellseitig gewichteten Logit-Modell: Die Agenten wählen ihre Pflichtaktivitätenzelle anhand einer Auswahlwahrscheinlichkeit p , die abhängig vom zu überwindenden Widerstand ist. Die Wahrscheinlichkeit wird mit einem Logit-Modell⁶⁶ bestimmt, wobei die quellseitige Siedlungsstrukturgröße k (hier: die Einwohnerzahl EW der Wohnortzelle o) als Gewicht einfließt.

$$p_{god} = \frac{z_{ok} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{kod})}{\sum_{o \in Z} z_{ok} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{kod})} = \frac{z_{o,EW} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{kod})}{\sum_{o \in Z} z_{o,EW} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{kod})} \quad (60)$$

mit

p_{god}	Wahrscheinlichkeit p für eine Ortsveränderung der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d
z_{ok}	Wert z einer Siedlungsstrukturgröße k (hier: Einwohnerzahl EW) in der Quellverkehrszelle o
β_{kg}^d	Aufwandsempfindlichkeitsparameter der Nachfragegruppe g bei der Zielwahl für die k . Kenngröße der Angebotsqualität
x_{kod}	Wert x der Kenngröße k zur Beschreibung der Angebotsqualität zwischen den Verkehrszellen o und d
Z	Menge der Verkehrszellen

- Verteilungsbasierte Zielwahl der Pflichtaktivität:
Es werden Entfernungsklassen definiert, welchen mit dem Hare-Niemeyer-Verfahren (siehe z.B. FEHNDRICH (1999)) eine ganzzahlige Personenzahl zugeordnet wird. Für die Entscheidung, welche Verkehrszelle gewählt wird, stehen wiederum drei Untermethoden zur Auswahl:
 - Abweichung von Wunschentfernung:
Die Entscheidung wird aufgrund der minimalen relativen Abweichung zwischen Wunschentfernung zur Wohnortzelle und tatsächlicher Entfernung zur Wohnortzelle getroffen. Ist eine Verkehrszelle in Wunschentfernung zur Wohnortzelle nicht verfügbar, wird die Verkehrszelle gewählt, die die nächstgrößere Entfernung zur Wohnortzelle aufweist.

$$\Delta x_{kod} = \frac{|x_{kod}^{\text{Wunsch}} - x_{kod}^{\text{Tatsächlich}}|}{x_{kod}^{\text{Wunsch}}} \quad (61)$$

mit

Δx_{kod}	relative Abweichung Δx zwischen gewünschter und tatsächlicher Kenngröße k (hier: Entfernung zwischen den Verkehrszellen o und d)
------------------	---

- Entfernungsabhängiges Potenzial:
Die Agenten wählen ihre Pflichtaktivitätenzelle anhand der Attraktivität a , die ab-

hängig vom zu überwindenden Widerstand ist. Die Attraktivität wird mit einem Potenzial definiert, das sich aus der Abweichung zwischen Wunschentfernung zur Wohnortzelle und tatsächlicher Entfernung zur Wohnortzelle ergibt⁶⁷.

$$a_{god} = \exp(\beta_{kg}^d \cdot \Delta x_{kod}) \quad (62)$$

mit

a_{god} Attraktivität der Zielverkehrszelle d bei gegebener Wohnortzelle o für die Nachfragegruppe g

β_{kg}^d Aufwandsempfindlichkeitsparameter der Nachfragegruppe g bei der Zielwahl für die k . Kenngröße der Angebotsqualität

Δx_{kod} relative Abweichung Δx zwischen gewünschter und tatsächlicher Kenngröße k (hier: Entfernung zwischen den Verkehrszellen o und d ; siehe Formel (61)))

- Entfernungs- und strukturgrößenabhängiges Potenzial:

Die Agenten wählen ihre Pflichtaktivitätenzelle anhand der Attraktivität a , die abhängig vom zu überwindenden Widerstand ist. Die Attraktivität wird mit einem Potenzial definiert, das sich aus der Abweichung zwischen Wunschentfernung zur Wohnortzelle und tatsächlicher Entfernung zur Wohnortzelle sowie den noch verfügbaren Siedlungsstrukturgrößenplätzen der Siedlungsstrukturgröße k in der Zielverkehrszelle d ergibt⁶⁸.

$$a_{god} = \Delta z_{dk} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot \Delta x_{kod}) \quad (63)$$

$$\Delta z_{dk} = z_{dk}^{\text{insgesamt verfügbar}} - z_{dk}^{\text{bereits vergeben}} \quad (64)$$

mit

a_{god} Attraktivität der Zielverkehrszelle d bei gegebener Wohnortzelle o für die Nachfragegruppe g

β_{kg}^d Aufwandsempfindlichkeitsparameter der Nachfragegruppe g bei der Zielwahl für die k . Kenngröße der Angebotsqualität

Δz_{dk} verfügbare Siedlungsstrukturgrößenplätze z der Siedlungsstrukturgröße k in der Zielverkehrszelle d

Δx_{kod} relative Abweichung Δx zwischen gewünschter und tatsächlicher Kenngröße k (hier: Entfernung zwischen den Verkehrszellen o und d ; siehe Formel (61)))

⁶⁷ Für $\beta = 0$ wird das Potenzial = 1, d.h. alle Zellen haben die gleiche Auswahlwahrscheinlichkeit (= Zufallsmodell).

⁶⁸ Für $\beta = 0$ wird das Potenzial nur von den noch verfügbaren Strukturgrößen bestimmt.

Zielwahl der Nicht-Pflichtaktivität

Das Ergebnis der bisherigen Rechenschritte ist eine Population, deren Einwohner über Eigenschaften (z.B. Wohnortzelle, Immobilitätsstatus oder Pkw-Verfügbarkeitsstatus), eine Aktivitätenkette und ggf. die Verkehrszelle einer Pflichtaktivität verfügen. Da die Orte von Wohnort und Pflichtaktivität bereits bekannt sind, gilt es im Folgenden noch die Lage für die Nicht-Pflichtaktivitäten zu bestimmen. Auch für die Zielwahl der Nicht-Pflichtaktivitäten stehen mehrere Methoden zur Verfügung:

- **Logit-Modell ohne Randsummenbedingungen:**
Bei dieser Methode der Zielwahl der Nicht-Pflichtaktivitäten wird für jede Zielverkehrszelle eine Auswahlwahrscheinlichkeit bestimmt, basierend auf der Anzahl der Siedlungsstrukturgrößenplätze der Siedlungsstrukturgröße k und des Widerstandes. Es wird nicht berücksichtigt, ob etwaige spätere Pflichtaktivitäten die Zielwahl beeinflussen. Zur Berechnung wird ein zweiseitig gewichtetes Logit-Modell (siehe Formel (59)) verwendet.
- **Logit-Modell mit Randsummenbedingungen:**
Da eine Aktivitätenkette immer mit „Wohnen“ beginnt und endet, wird eine Sequenz von Nicht-Pflichtaktivitäten immer von Aktivitäten eingeschlossen, bei denen der Aktivitätenort bereits feststeht. Wohnortgebundene Aktivitäten („Wohnen“) und Pflichtaktivitäten beeinflussen die Zielwahl dieser eingeschlossenen Sequenz von Nicht-Pflichtaktivitäten. Soll dieser Effekt berücksichtigt werden, muss die komplette Aktivitätenkette in die Berechnung eingehen. Hierbei wird die Vereinfachung getroffen, dass maximal drei Nicht-Pflichtaktivitäten zwischen zwei wohnortgebundenen Aktivitäten bzw. Pflichtaktivitäten verteilt werden, um den Einfluss der zweiten Pflichtaktivität (= Zielpflichtaktivität) in der Berechnung zu berücksichtigen. Ist die Sequenz länger als drei Nicht-Pflichtaktivitäten, werden die ersten Nicht-Pflichtaktivitäten mit einem einfachen Logit-Modell ohne Randsummenbedingungen verteilt, bis nur noch drei Nicht-Pflichtaktivitäten übrig sind. Für die Berechnung stehen zwei Berechnungswege zur Verfügung:
 - **Logit-Modell mit Rubberbanding bzw. mit bipolarer Zielwahl:**
Zur Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeit einer zellenbezogenen Aktivitätenkette wird das folgende erweiterte Logit-Modell verwendet⁶⁹. Die Auswahlwahrscheinlichkeit ergibt sich aus dem Produkt der relevanten Siedlungsstrukturgrößen mit einem bewerteten Widerstand der kompletten Aktivitätenkette (siehe hierzu das Beispiel in Abbildung 40).
Die Berechnungsvorschrift der Zielwahl von drei Nicht-Pflichtaktivitäten in den Verkehrszellen n , m und q , die von zwei Pflichtaktivitäten in den Verkehrszellen o und d begrenzt werden, sieht wie folgt aus:

⁶⁹ Da die Quellverkehrszelle o und die Zielverkehrszelle d eines Agenten bekannt sind, werden nur die Zwischenziele betrachtet. Für $\beta = 0$ wird die Auswahlwahrscheinlichkeit nur vom Produkt der Strukturgrößen bestimmt.

$$p_{gomnqd} = \frac{z_{mk} \cdot z_{nk} \cdot z_{qk} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{komnqd})}{\sum_{m \in Z} \sum_{n \in Z} \sum_{q \in Z} z_{mk} \cdot z_{nk} \cdot z_{qk} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{komnqd})} \quad (65)$$

mit

p_{gomnqd} Wahrscheinlichkeit p für eine Ortsveränderung der Nachfragegruppe g von Verkehrszelle o nach d über m , n und q

z_{zk} Wert z einer Siedlungsstrukturgröße k in der Verkehrszelle z

β_{kg}^d Aufwandsempfindlichkeitsparameter der Nachfragegruppe g bei der Zielwahl für die k . Kenngröße der Angebotsqualität

x_{komnqd} Wert x der Kenngröße k zur Beschreibung der Angebotsqualität für eine Ortsveränderung von Verkehrszelle o nach d über m , n und q

Z Menge der Verkehrszellen

- Logit-Modell mit vollständiger Enumeration:

Im Unterschied zur vorhergehenden Berechnungsmethode basiert diese Berechnung auf dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten, mit denen

- eine bestimmte Zielverkehrszelle von der vorhergehenden Quellverkehrszelle aus gewählt wird (berechnet mit einem zielgewichteten Logit-Modell) und
- eine bestimmte Quellverkehrszelle für den Weg zur nächsten Pflichtaktivität gewählt wird (berechnet mit einem quellgewichteten Logit-Modell).

Um die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Wegekette zu bestimmen, werden die einzelnen Wahrscheinlichkeiten multipliziert (siehe hierzu das Beispiel in Abbildung 40). Die Berechnungsvorschrift der Zielwahl von drei Nicht-Pflichtaktivitäten in den Verkehrszellen n , m und q , die von zwei Pflichtaktivitäten in den Verkehrszellen o und d begrenzt werden, sieht wie folgt aus:

$$p_{om} = \frac{z_{mk} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{om})}{\sum_{m \in Z} z_{mk} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{om})} \cdot \frac{z_{mk} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{md})}{\sum_{m \in Z} z_{mk} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{md})} \quad (66)$$

$$p_{gmn} = \frac{z_{nk} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{kmn})}{\sum_{n \in Z} z_{nk} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{kmn})} \cdot \frac{z_{nk} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{knd})}{\sum_{n \in Z} z_{nk} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{knd})} \quad (67)$$

$$p_{gnq} = \frac{z_{qk} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{knq})}{\sum_{q \in Z} z_{qk} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{knq})} \cdot \frac{z_{qk} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{kqd})}{\sum_{q \in Z} z_{qk} \cdot \exp(\beta_{kg}^d \cdot x_{kqd})} \quad (68)$$

$$p_{gomnqd} = p_{gom} \cdot p_{gmn} \cdot p_{gnq} = \prod_{a \in \{om, mn, nq\}} p_{ga} \quad (69)$$

mit

p_{god}	Wahrscheinlichkeit p für eine Ortsveränderung der Nachfragegruppe g zwischen den Verkehrszellen o und d
z_{zk}	Wert z einer Siedlungsstrukturgröße k in der Verkehrszelle z
β_{kg}^d	Aufwandsempfindlichkeitsparameter der Nachfragegruppe g bei der Zielwahl für die k . Kenngröße der Angebotsqualität
x_{kod}	Wert x der Kenngröße k zur Beschreibung der Angebotsqualität zwischen den Verkehrszellen o und d
p_{gomnqd}	Wahrscheinlichkeit p für eine Ortsveränderung der Nachfragegruppe g von Verkehrszelle o nach d über m , n und q
Z	Menge der Verkehrszellen

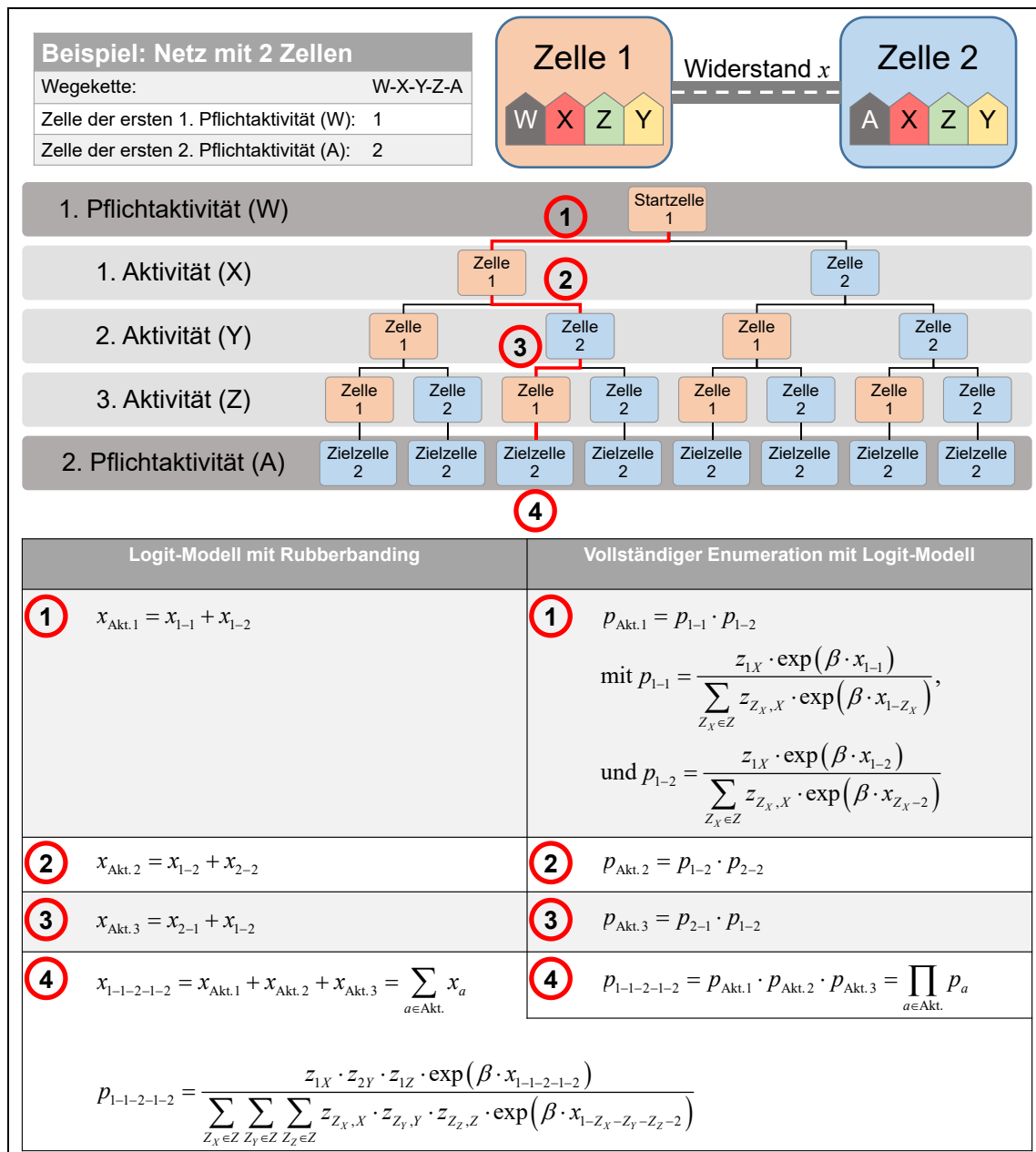


Abbildung 40: Beispiel für Logit-Modell: pflichtaktivitätsgebunden (Rubberbanding) und Logit-Modell: Vollständige Enumeration (Bildquelle: eigene Darstellung).

Kenngroößen

Nach bzw. während der Zielwahl werden die Kenngroößenmatrizen und Nachfragematrizen (für die gesamte sowie die aktivitätenpaarfeine Nachfrage) für jede Simulation berechnet. Die Kenngroößen sind auslastungsunabhängig, da keine Umlegung aufs Netz erfolgt. Folgende Kenngroößen werden ausgegeben:

- Luftlinienentfernung in km
- Zu- und Abgangsweite in km

- Reiseweite ohne Anbindungen in km
- Reiseweite mit Anbindungen in km
- Zu- und Abgangszeit in min
- Reisezeit ohne Anbindungen in min
- Reisezeit mit Anbindungen in min

Erzeugung von Stichproben

Nach der Berechnung des Wegetagebuchgenerators kann aus der erzeugten Population eine Stichprobe gezogen werden. Dazu sind als Eingangsgrößen eine Startzufallszahl für die Reproduzierbarkeit und eine Stichprobengröße zu definieren. Dann werden aus dem kombinierten Personen- und Wegebogen einer zufällig ausgewählten Simulation zufällig Agenten gezogen (ohne Zurücklegen). Dies geschieht zunächst so lang, bis die gewünschte Stichprobengröße erreicht ist. Sollten zu diesem Zeitpunkt manche Personengruppen noch nicht gezogen worden sein, wird zufällig ein Agent aus diesen Personengruppen gezogen.

Die gezogenen Agenten erhalten abschließend noch ein Personengewicht, was den Anteil dieser Agenten an der zugehörigen Personengruppe widerspiegelt. Die Summe dieser Gewichte über alle gezogenen Agenten ergibt die Populationsgröße.

$$w_{p_g} = \frac{N_g^G}{N_g^S} \text{ wobei gilt: } \sum_{g \in G} \sum_{p_g \in P_g} w_{p_g} = N^G \quad (70)$$

mit

w_{p_g}	Gewicht w des Agenten p der Personengruppe g in der Stichprobe S
N_g^G	Größe der Personengruppe g in der Grundgesamtheit G
N_g^S	Größe der Personengruppe g in der Stichprobe S
N^G	Größe der Grundgesamtheit G über alle Personengruppen g
G	Menge der Personengruppen
P_g	Menge der Agenten der Personengruppe g

Analysemöglichkeiten

Die Prüfung des Netzes ist möglich durch folgende Listen:

- Liste der Verkehrszellen, mit ihrer Verteilung im Raum und der Zuordnung der Personengruppen und Siedlungsstrukturgrößen,
- Liste von Anbindungen,
- Liste von Strecken,
- zweckfeine Auswertung der Randsummenbedingungen,
- zweck- und zellenfeine Auswertung der Randsummenbedingungen.

Es findet eine Auswertung hinsichtlich der Anzahl der Simulationsläufe statt, d.h. ob genug Simulationsläufe gelaufen sind, um eine statistisch signifikante Aussage zu treffen. Die Mobilitätsrate wird für jede Simulation verkehrszellenfein und gemittelt dargestellt.

Ebenso werden die Nachfrage- und Kenngrößenmatrizen für jede Simulation und gemittelt ausgewiesen, wobei sich die Kenngrößenmatrizen zwischen den Simulationsläufen nicht unterscheiden. Die Nachfrage wird unsegmentiert und für jedes Aktivitätenpaar ausgewertet.

Export der Wegetagebuchgeneratorergebnisse

Export des Netzes

Das Ergebnis des Wegetagebuchgenerators kann als *.net-Datei exportiert und z.B. in die Verkehrsplanungssoftware PTV VISUM 18 importiert werden⁷⁰. Es werden jeweils zwei *.net-Dateien erzeugt:

- eine *.net-Datei inkl. aller Aktivitätenorte als POIs (siehe Abbildung 21 (S. 120)),
- eine *.net-Datei ohne Aktivitätenorte, die als Grundlage für die anschließende Modellerstellung dienen soll (siehe Abbildung 41).

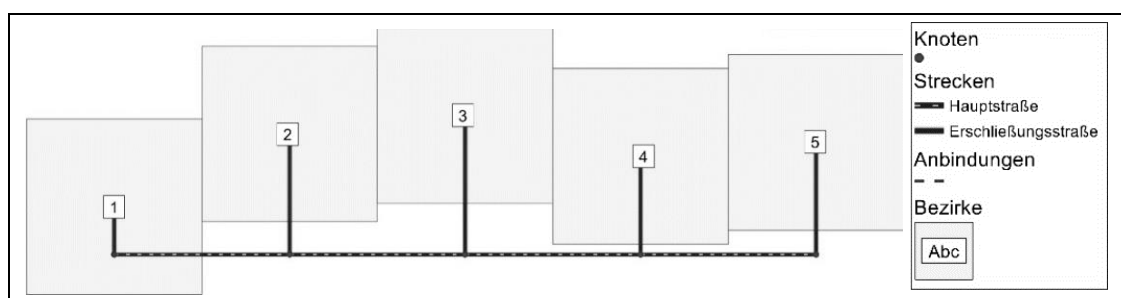


Abbildung 41: Beispiel eines 5-Zonen-Netzmodells ohne Aktivitätenorte (Bildquelle: eigene Darstellung).

⁷⁰ Die *.net-Datei hat kein Koordinatensystem, d.h. es gibt keine Projektion. Der Skalierungsfaktor auf 1.000 gesetzt.

Export der Matrizen

Es ist möglich, die entstandenen Kenngrößen- und Nachfragematrizen der kompletten Bevölkerung und / oder der jeweiligen Stichprobe im O-Format zu speichern. Diese können dann in z.B. PTV VISUM 18 importiert werden.

Folgende Hinweise müssen bezüglich der Kenngrößen auf der Hauptdiagonale (Zellinnenverkehr) beachtet werden:

- Luftlinie = 0, da von Verkehrszellenpunkt zu Verkehrszellenschwerpunkt (ggf. einwohnergewichtet) gemessen wird.
- Fahrtweite > 0, da von Verkehrszellenschwerpunkt zu Anbindungsknoten und wieder zurück gemessen wird. Der Verkehrszellenschwerpunkt wird als gewichteter Mittelwert aller Aktivitätenorte der Verkehrszelle bestimmt und ist daher immer leicht vom Anbindungsknoten, der genau in der Mitte der Verkehrszelle liegt, verschoben.
- Reisezeiten > 0, da die Reisezeiten aus den Fahrtweiten und den entsprechenden Streckengeschwindigkeiten bestimmt werden.

Export von Nachfragemodellen

Darüber hinaus können für Stichproben vordefinierte Nachfragemodelle in einer *.dmd-Datei exportiert werden. Dies funktioniert für 4-Stufen-, EVA- und VISEM-Modelle (nach dem Import in PTV VISUM 18 sollte trotzdem noch eine Prüfung erfolgen). Das Nachfragemodell basiert auf der Stichprobe, d.h. es kommen nur Aktivitätenpaare / Wegeketten vor, die auch in der Stichprobe realisiert werden.

Anhang 5 Spezifikationen des Wegetagebuchgenerators für die Untersuchungen in Kapitel 5

Wegetagebuch-Generator

Start	Zellen	5					
Version 5.1	Modellausdehnung [km]	20,0					
	Min. Abstand zwischen Zellen [km]	1,0					
	Y-Skalierungsfaktor (0-1)	0,3					
	Startzufallszahl	838					
	Anzahl Simulationen	75					
	Messung der Luftlinienentfernung	vom Zellenschwerpunkt aus					
	Anbindungsgeschwindigkeit [km/h]	10					
	Hauptstraßengeschwindigkeit [km/h]	50					
	Erschließungsstraßengeschwindigkeit [km/h]	30					
	Max. Aktivitätskettenlänge	3					
Kriterium für Widerstandsrechnung	Reisezeit ohne Anbindungen [min]						
Zellinnenwiderstand [km]	4,5						
Standortwahl (Pflichtaktivität)	Logit-Modell (zielseitig gewichtet)						
Wenn Entfernungsverteilung							
	β	-0,2					
Zielwahlmethode (Nicht-Pflichtaktivität)	Logit-Modell: pflichtaktivitätsgebunden						
	β (wenn $\beta = 0 \rightarrow$ Zufallsmodell)	-0,2					
#							
Export von net-Datei	Ja						
Export von Matrizen	Ja						
Speicherpfad für Export							
#							
	Stichprobe 1	Stichprobe 2	Stichprobe 3	Stichprobe 4	Stichprobe 5		
Ziehung von Stichprobe	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja		
Startzufallszahl für Stichprobe	777	9787	2222	334	2221		
Stichprobengröße (0-1)	1	0,75	0,25	0,1	0,05		
Ausgabetafelblatt	Sample_1	Sample_2	Sample_3	Sample_4	Sample_5		
Export von Nachfragemodell	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja		
Speicherpfad für DMD-Export							
#							
Nur Stichprobe							
#							
Strukturgrößen-ID	Name	Code	max. Aufnahme-fähigkeit	Randsummen-bilanz	Strukturgrößen in max. ... Zellen	Entfernungsobergrenze [km]	
100	A	Arbeit	1000	1,0	5		
#							
Personengruppen-ID	Name	Code	Anzahl Personen	Personen-gruppe wohnt in max. ... Zellen	Nr. der SG der Pflichtakt.	Anteil Immobile (0 - 1)	Motorisierungs-grad (0 - 1)
1000	ET	Erwerbstätig	1000	5	100	0,01	1,00

Abbildung 42: Wegetagebuchgeneratorspezifikationen für die Untersuchungen mit einer Personengruppe, einer Aktivität und fünf Verkehrszellen (Experiment 1, Bildquelle: eigene Darstellung).

Wegetagebuch-Generator

Start

Version 5.1

Zellen	5
Modellausdehnung [km]	20,0
Min. Abstand zwischen Zellen [km]	1,0
Y-Skalierungsfaktor (0-1)	0,3
Startzufallszahl	984
Anzahl Simulationen	75
Messung der Luftlinienentfernung	vom Zellenschwerpunkt aus
Anbindungsgeschwindigkeit [km/h]	10
Hauptstraßengeschwindigkeit [km/h]	50
Erschließungsstraßengeschwindigkeit [km/h]	30
Max. Aktivitätenkettenlänge	4
Kriterium für Widerstandsberechnung	Reisezeit ohne Anbindungen [min]
Zellbinnenwiderstand [km]	4,5
Standortwahl (Pflichtaktivität)	Logit-Modell (zielseitig gewichtet)
Wenn Entfernungsverteilung	
β	-0,2
Zielwahlmethode (Nicht-Pflichtaktivität)	Logit-Modell: pflichtaktivitätsgebunden (Rubberbanding)
β (wenn $\beta = 0 \rightarrow$ Zufallsmodell)	-0,2
#	
Export von net-Datei	Ja
Export von Matrizen	Ja
Speicherpfad für Export	
#	
	Stichprobe 1
Ziehung von Stichprobe	Ja
Startzufallszahl für Stichprobe	5485
Stichprobengröße (0-1)	1
Ausgabetafelblatt	Sample 1
Export von Nachfragemodell	Ja
Speicherpfad für DMD-Export	
#	
	Stichprobe 2
	6444
	0,75
	Sample 2
	Ja
#	
	Stichprobe 3
	211
	0,25
	Sample 3
	Ja
#	
	Stichprobe 4
	1
	0,1
	Sample 4
	Ja
#	
	Stichprobe 5
	235
	0,05
	Sample 5
	Ja
#	
	Nur Stichprobe
#	
Strukturgrößen-ID	Name
100	A
200	E
#	
Code	max. Aufnahmefähigkeit
Arbeit	1000
Einkaufen	1000
#	
Randsummenbilanz	Strukturgrößen in max. ... Zellen
1,0	5
3,0	3
#	
Entfernungsobergrenze [km]	
#	
Personengruppen-ID	Name
1000	ET
#	
Code	Anzahl Personen
Erwerbstätig	1000
#	
Personengruppe wohnt in max. ... Zellen	Nr. der SG der Pflichtakt.
5	100
#	
Anteil Immobile (0-1)	Motorisierungsgrad (0-1)
0,01	1,00

Abbildung 43: Wegetagebuchgeneratorspezifikationen für die Untersuchungen mit einer Personengruppe, zwei Aktivitäten und fünf Verkehrszellen (Experiment 2, Bildquelle: eigene Darstellung).

Wegetagebuch-Generator

Start

Version 5.1

Zellen	25
Modellausdehnung [km]	100,0
Min. Abstand zwischen Zellen [km]	1,0
Y-Skalierungsfaktor (0-1)	1
Startzufallszahl	746
Anzahl Simulationen	75
Messung der Luftlinienentfernung	vom Zellenschwerpunkt aus
Anbindungsgeschwindigkeit [km/h]	10
Hauptstraßengeschwindigkeit [km/h]	50
Erschließungsstraßengeschwindigkeit [km/h]	30
Max. Aktivitätenkettenlänge	3
Kriterium für Widerstandsrechnung	Reisezeit ohne Anbindungen [min]
Zellbinnenwiderstand [km]	10,0
Standortwahl (Pflichtaktivität)	Logit-Modell (zielseitig gewichtet)

Wenn Entfernungsverteilung

β	-0,2
Zielwahlmethode (Nicht-Pflichtaktivität)	Logit-Modell: pflichtaktivitätsgebunden (Rubberbanding)
β (wenn $\beta = 0 \rightarrow$ Zufallsmodell)	-0,2

#

Export von net-Datei	Ja
Export von Matrizen	Ja
Speicherpfad für Export	

#

	Stichprobe 1	Stichprobe 2	Stichprobe 3	Stichprobe 4	Stichprobe 5
Ziehung von Stichprobe	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Startzufallszahl für Stichprobe	464	1564	4	556	21220
Stichprobengröße (0-1)	1	0,75	0,25	0,1	0,05
Ausgabetafelblatt	Sample_1	Sample_2	Sample_3	Sample_4	Sample_5
Export von Nachfragemodell	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Speicherpfad für DMD-Export					

#

Nur Stichprobe

#

Strukturgrößen-ID	Name	Code	max. Aufnahmefähigkeit	Randsummenbilanz	Strukturgrößen in max. ... Zellen	Entfernungsobergrenze [km]
100	A	Arbeit	1000	1,0	20	

#

Personengruppen-ID	Name	Code	Anzahl Personen	Personengruppe wohnt in max. ... Zellen	Nr. der SG der Pflichttakt.	Anteil Immobile (0-1)	Motorisierungsgrad (0-1)
1000	ET	Erwerbstätig	1000	25	100	0,01	1,00

Abbildung 45: Wegetagebuchgeneratorspezifikationen für die Untersuchungen mit einer Personengruppe, einer Aktivität und 25 Verkehrszellen (Experiment 1, Bildquelle: eigene Darstellung).

Wegetagebuch-Generator

Start

Version 5.1

Zellen	25
Modellausdehnung [km]	100,0
Min. Abstand zwischen Zellen [km]	1,0
Y-Skalierungsfaktor (0-1)	1
Startzufallszahl	5969
Anzahl Simulationen	75
Messung der Luftlinienentfernung	vom Zellenschwerpunkt aus
Anbindungsgeschwindigkeit [km/h]	10
Hauptstraßengeschwindigkeit [km/h]	50
Erschließungsstraßengeschwindigkeit [km/h]	30
Max. Aktivitätenkettenlänge	4
Kriterium für Widerstandsrechnung	Reisezeit ohne Anbindungen [min]
Zellinnenwiderstand [km]	10,0
Standortwahl (Pflichtaktivität)	Logit-Modell (zielseitig gewichtet)
Wenn Entfernungsverteilung	
β	-0,2
Zielwahlmethode (Nicht-Pflichtaktivität)	Logit-Modell: pflichtaktivitätsgebunden (Rubberbanding)
β (wenn $\beta = 0 \rightarrow$ Zufallsmodell)	-0,2
#	
Export von net-Datei	Ja
Export von Matrizen	Ja
Speicherpfad für Export	
#	
	Stichprobe 1
Ziehung von Stichprobe	Ja
Startzufallszahl für Stichprobe	645
Stichprobengröße (0-1)	1
Ausgabetablenblatt	Sample_1
Export von Nachfragemodell	Ja
Speicherpfad für DVID-Export	
#	
#	
Nur Stichprobe	
Strukturgrößen-ID	Name
100	A
200	E
#	
Personengruppen-ID	Name
1000	ET

Code	max. Aufnahmefähigkeit	Randsummenbilanz	Strukturgrößen in max. ... Zellen	Entfernungsobergrenze [km]
Arbeit	1000	1,0	20	
Einkaufen	1000	3,0	10	

Anzahl Personen	Personengruppe wohnt in max. ... Zellen	Nr. der SG der Pflichttakt.	Anteil Immobiler (0-1)	Motorisierungsgrad (0-1)
1000	25	100	0,01	1,00

Abbildung 46: Wegetagebuchgeneratorspezifikationen für die Untersuchungen mit einer Personengruppe, zwei Aktivitäten und 25 Verkehrszellen (Experiment 2, Bildquelle: eigene Darstellung).

Wegetagebuch-Generator

Start

Version 5.1

Zellen 25

Modellausdehnung [km] 100,0

Min. Abstand zwischen Zellen [km] 1,0

Y-Skalierungsfaktor (0-1) 1

Startzufallszahl 846

Anzahl Simulationen 75

Messung der Luftlinienentfernung vom Zellenschwerpunkt aus

Anbindungsgeschwindigkeit [km/h] 10

Hauptstraßengeschwindigkeit [km/h] 50

Erschließungsstraßengeschwindigkeit [km/h] 30

Max. Aktivitätenkettenlänge 3

Kriterium für Widerstandsrechnung Reisezeit ohne Anbindungen [min]

Zellbinnenwiderstand [km] 10,0

Standortwahl (Pflichtaktivität) Logit-Modell (zielseitig gewichtet)

Wenn Entfernungsverteilung

β -0,2

Zielwahlmethode (Nicht-Pflichtaktivität) Logit-Modell: pflichtaktivitätsgebunden (Rubberbanding)

β (wenn $\beta = 0 \rightarrow$ Zufallsmodell) -0,2

#

Export von net-Datei Ja

Export von Matrizen Ja

Speicherpfad für Export

#

	Stichprobe 1	Stichprobe 2	Stichprobe 3	Stichprobe 4	Stichprobe 5
Ziehung von Stichprobe	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Startzufallszahl für Stichprobe	5488	23126	69	21	333
Stichprobengröße (0-1)	1	0,75	0,25	0,1	0,05
Ausgabetafelblatt	Sample_1	Sample_2	Sample_3	Sample_4	Sample_5
Export von Nachfragemodell	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Speicherpfad für DMD-Export					

#

Nur Stichprobe

Strukturgrößen-ID	Name	Code	max. Aufnahmefähigkeit	Randsummenbilanz	Strukturgrößen in max. ... Zellen	Entfernungsobergrenze [km]
100	A	Arbeit	500	1,0	20	

#

Personengruppen-ID	Name	Code	Anzahl Personen	Personengruppe wohnt in max. ... Zellen	Nr. der SG der Pflichttakt.	Anteil Immobile (0-1)	Motorisierungsgrad (0-1)
1000	ET	Erwerbstätig	375	25	100	0,01	1,00
2000	TET	Erwerbstätig Teilze	125	25	100	0,01	1,00

Abbildung 47: Wegetagebuchgeneratorspezifikationen für die Untersuchungen mit zwei Personengruppen, einer Aktivität und 25 Verkehrszellen (Experiment 3, Bildquelle: eigene Darstellung).

Anhang 6 Modelltheorie des mikroskopischen Verkehrsnachfragemodells des Verbands Region Stuttgart

Im Folgenden werden die Passagen, die die Verkehrserzeugung und die Zielwahl betreffen, aus dem Schlussbericht des mikroskopischen Verkehrsnachfragemodells des Verbands Region Stuttgart (HAUTZINGER ET AL. (2013)) zitiert.

Verkehrserzeugung

„Die Bevölkerungssynthese erfolgt auf Verkehrszellenebene. Sie besteht aus der eigentlichen Bevölkerungssynthese, bei der basierend auf 12 Haushaltstypen (Haushaltsgröße X Anzahl PKW im HH) die notwendige Anzahl Haushalte aus den Daten der Mobilitäts-erhebung zufällig gezogen werden. Mit dem Haushalt werden gleichzeitig alle zum Haushalt gehörigen Personen mit ihren Aktivitätenprogrammen (Wochentag, Zweck, Dauer, geplanter Beginn) ausgewählt. Außerdem erfolgt bei der Haushaltsziehung implizit die Zuordnung des PKW-Besitzes (Anzahl PKW im Haushalt).

Des Weiteren wird neben der eigentlichen Bevölkerungssynthese noch die Zuordnung der fixen Ziele für Arbeit und Ausbildung (sogenannte Pole) und die Zuordnung des Zeitkartenbesitzes durchgeführt.“ (HAUTZINGER ET AL. (2013, S. 10))

„Die Verkehrsentstehung entsteht implizit mit der Haushaltsziehung. Bei der Haushaltsziehung werden zusammen mit den Haushalten auch die zugehörigen Personen ausgewählt. Mit den Personen werden auch die zugehörigen Aktivitätenprogramme (alle Aktivitäten mit den Attributen: Wochentag, Zweck, Dauer und geplanter Beginn) für eine komplette Woche ausgewählt. In der anschließend folgenden Simulation führen alle Personen ihr Aktivitätenprogramm über den Verlauf der gesamten Woche durch.

Aus den hierzu notwendigen Ortsveränderungen entsteht der Verkehr.“ (HAUTZINGER ET AL. (2013, S. 13))

Zielwahl

„Bei der Zielwahl wird unterschieden, ob es sich um eine Aktivität mit einem fixen Ziel (Pol) handelt (Wohnen, Arbeit, Ausbildung) oder um eine Aktivität mit einem flexiblen Ziel. Im Falle einer Aktivität mit fixem Ziel wird der entsprechende Pol, der in der Verkehrsentstehung modelliert wurde, als Ziel gewählt. Im Falle einer Aktivität mit flexiblem Ziel wird überprüft, ob im Verlauf der Woche bereits eine Aktivität desselben Typs durchgeführt wurde. Falls das der Fall ist, wird mit Hilfe des Längsschnittmodells der Zielwahl ermittelt, ob ein bereits gewähltes Ziel erneut aufgesucht werden soll oder ein neues Ziel gewählt werden soll. Falls noch keine Aktivität desselben Typs durchgeführt wurde wird mit Hilfe des grundständigen Zielwahlmodells unter allen Zellen ein Ziel bestimmt. Falls das Längsschnittmodell ergibt, dass ein bereits gewähltes Ziel aufgesucht werden soll,

wird mit Hilfe des einfachen Zielwahlmodells unter allen bereits für diesen Zweck genutzten Zielen gewählt. Ergibt das Längsschnittmodell, dass ein neues Ziel gewählt werden soll, wird mit Hilfe des einfachen Zielwahlmodells unter den bisher noch nicht gewählten Zielen (für diesen Zweck) ein neues Ziel bestimmt.“ (HAUTZINGER ET AL. (2013, S. 27))

„Das grundständige Zielwahlmodell basiert auf einem Gravitationsmodell-Ansatz bei dem die Gelegenheiten in den potentiellen Zielen, Reisezeit, Kosten sowie die verfügbaren Verkehrsmittel berücksichtigt werden. Dabei werden nicht nur Reisezeit und Kosten zum potentiellen Ziel betrachtet, sondern zusätzlich auch noch Reisezeit/ Kosten vom potentiellen Ziel zum nächsten Pol (vgl. [WAßMUTH (2001, S. 71 ff.)]).“ (HAUTZINGER ET AL. (2013, S. 27))

„Die Gelegenheiten je Verkehrszelle wurden, soweit vorhanden, aus den entsprechenden Attributen des Makromodell übernommen. Für die Außenzellen, für die im Makromodell keine Gelegenheiten vorhanden waren, wurden die Daten von vergleichbaren Zellen (z.B. Stadt gleicher Größenordnung) imputiert, dabei wurden die Gelegenheiten entsprechend dem Verhältnis der Einwohnerzahlen angepasst. Für den Zweck „Dienstlich“ (z.B. Fahrten von Handwerkern) sowie „Außer Haus“ wurde das Attribut „Einwohner“, für den Zweck „Freizeit Sonstiges“ die Summe der Attribute „Privater Besuch“, „Freizeit (Restaurant, Kultur)“ und „Freizeit (Sport, Grünanlagen)“ verwendet.

Die Modell-Parameter für jeden Zweck wurden mittels eines Logit-Modells geschätzt. Hierzu wurde zu jedem gewählten Ziel zufällig 100 nicht gewählte Alternativen gezogen und auf dieser Basis das Modell geschätzt.“ (HAUTZINGER ET AL. (2013, S. 28))

Anhang 7 Spezifikationen der Nachfragemodelle für die Untersuchungen in Kapitel 5

Experiment 1

Modelltheorie		
Vier-Stufen-Algorithmus		
Personengruppen		
Code	ET-4STEP	
Name	Erwerbstätig 4STEP	
Aktivitätenpaare		
Code	AW-4STEP	WA-4STEP
Name	Arbeit-Wohnen 4STEP	Wohnen-Arbeit 4STEP
Nachfrageschichten		
Code, Name	AW_ET-4STEP	WA_ET-4STEP
Personengruppen	ET-4STEP	ET-4STEP
Aktivitätenpaar	AW-4STEP	WA-4STEP
Verkehrserzeugung		
Nachfrageschicht	AW_ET-4STEP	WA_ET-4STEP
Normierung der Summen	Summe der ZA	Summe der QA
QAdefinition	[Anz. Arbeitsplätze] * [ER Datenbasis]	[Anz. Erwerbstätige] * [sV Datenbasis]
ZAdefinition	[Anz. Erwerbstätige] * [sV Datenbasis]	[Anz. Arbeitsplätze] * [ER Datenbasis]
Zielwahl		
Nachfrageschicht	AW_ET-4STEP	WA_ET-4STEP
Nutzendefinition	71	
Nutzenfunktion	<ul style="list-style-type: none">• Logit (c = 1)• gekoppelt bzgl. ZA• zweiseitig gekoppelt (RSA bzgl. der Summe der ZA)• max. Iterationen = 99.999 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)• Gütefaktor = 99.999 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)• Optimierungsverfahren: MULTI	<ul style="list-style-type: none">• Logit (c = 1)• gekoppelt bzgl. QA• zweiseitig gekoppelt (RSA bzgl. der Summe der QA)• max. Iterationen = 99999 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)• Gütefaktor = 99999 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)• Optimierungsverfahren: MULTI

Tabelle 19: Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (Vier-Stufen-Algorithmus).

⁷¹ Der grundsätzliche Aufbau der Nutzenfunktion ist in allen Nachfragemodellen identisch: $u = \beta_t \cdot M_t + \beta_d \cdot M_d$ (mit u : Nutzen, M_t : Matrix der Reisezeit, β_t : Parameter der Reisezeit, M_d : Matrix der Reiseweite, β_d : Parameter der Reiseweite). Die jeweiligen Parameterwerte und die Elemente der symmetrisierten Kenngrößenmatrizen sind jedoch verschieden.

Modelltheorie		
EVA		
Personengruppen		
Code	ET-EVA	
Name	Erwerbstätig EVA	
Strukturgrößen		
Code	A-EVA	
Name	Arbeit EVA	
Aktivitäten		
Code	A-EVA	W-EVA
Name	Arbeit EVA	Wohnen EVA
Heimat	Nein	Ja
Strukturgrößen	A-EVA	nicht relevant
Aktivitätenpaare		
Code	AW-EVA	WA-EVA
Name	Arbeit-Wohnen EVA	Wohnen-Arbeit EVA
Quellaktivität	A-EVA	W-EVA
Zielaktivität	W-EVA	A-EVA
Quelle-Ziel-Typ	2	1
Nachfrageschichten gemeinsam koppeln	quellseitig gemeinsam gekoppelt	zielseitig gemeinsam gekoppelt
Nachfrageschichten		
Code, Name	AW_ET-EVA	WA_ET-EVA
Personengruppen	ET-EVA	ET-EVA
Aktivitätenpaar	AW-EVA	WA-EVA
Quelle-Ziel-Typ	2	1
Strukturgrößen Quelle	A-EVA	Nicht relevant
Strukturgrößen Ziel	Nicht relevant	A-EVA
Gewicht	-	
Randsummenbedingungen		
NSchicht Code	AW_ET-EVA	WA_ET-EVA
Quelle-Ziel-Typ	2	1
RSA	-	
RSB Quelle, RSB Ziel	hart	
RSF QMin konst., RSF ZMin konst.	Ja	
RSF QMin, RSF ZMin	1	
RSF QMax konst., RSF ZMax konst.	Ja	
RSF QMax, RSF ZMax	1	
Aufk. als Potential	-	
Verkehrserzeugung		
Rate konstant	Ja ⁷²	
Untersuchungsraumanteil konstant	Ja (= 1)	
Skripte	Ausführung des RSA 1	

Zielwahl	
Nutzendefinition	71
Nutzenfunktion	<ul style="list-style-type: none"> • Logit ($c = 1$) • Heimatbezirk für Nachfrageschichten vom Typ 3 berücksichtigen • max. Iterationen = 65000 • Toleranz harte RSB = 1000 • Toleranz nicht-harte RSB = 1000 • Optimierungsverfahren: FURNESS

Tabelle 20: Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (EVA).

⁷² Für das Heimatverkehrsaufkommen werden die Produktionsraten der Mobilitätsdatenbasen verwendet. Für die Quell- bzw. Zielverkehrsaufkommen werden die Verkehrserzeugungsparameter der Mobilitätsdatenbasen verwendet.

Modelltheorie		
VISEM		
Personengruppen		
Code	ET-VISEM	
Name	Erwerbstätig VISEM	
Strukturgrößen		
Code	A-VISEM	
Name	Arbeit VISEM	
Aktivitäten		
Code	A-VISEM	W-VISEM
Name	Arbeit VISEM	Wohnen VISEM
Heimat	Nein	Ja
Rang	1	-
Strukturgröße	A-VISEM	nicht relevant
Zielseitige Kopplung	Ja	Ja
Nachfrageschichten gemeinsam koppeln	Ja	-
RSF ZMin, RSF ZMax	1	1
Aktivitätenpaare		
Code	AW-VISEM	WA-VISEM
Name	Arbeit-Wohnen VISEM	Wohnen-Arbeit VISEM
Quellaktivität	A-VISEM	W-VISEM
Zielaktivität	W-VISEM	A-VISEM
Ganglinie(n)	konst.	konst.
Aktivitätenketten		
Code, Name	WAW-VISEM	
Aktivitäten-Sequenz	W-VISEM, A-VISEM, W-VISEM	
Nachfrageschichten		
Code, Name	WAW_ET-VISEM	
Personengruppen	ET-VISEM	
Aktivitätenkette	W-VISEM, A-VISEM, W-VISEM	
Verkehrserzeugung		
Mobilitätsrate konstant	Ja ⁷³	
Untersuchungsraumanteil Heimat konstant	Ja (= 1)	
Zielwahl		
Nutzendefinition	71	
Nutzenfunktion	<ul style="list-style-type: none">• Logit (c = 1)• Rubberbanding für Pflichtaktivität mit Gewicht 1• max. Iterationen = 65000 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)• Genauigkeitsfaktor = 99999 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)	

Tabelle 21: Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (WISEM).

Experiment 2

Modelltheorie						
Vier-Stufen-Algorithmus						
Personengruppen						
Code	ET-4STEP					
Name	Erwerbstätig 4STEP					
Aktivitätenpaare						
Code	WE-4STEP	WA-4STEP	AE-4STEP	EA-4STEP	EW-4STEP	AW-4STEP
Name	Wohnen-Einkaufen 4STEP	Wohnen-Arbeit 4STEP	Arbeit-Einkaufen 4STEP	Einkaufen-Arbeit 4STEP	Einkaufen-Wohnen 4STEP	Arbeit-Wohnen 4STEP
Nachfrageschichten						
Code, Name	WE_ET-4STEP	WA_ET-4STEP	AE_ET-4STEP	EA_ET-4STEP	EW_ET-4STEP	AW_ET-4STEP
Personengruppen	ET-4STEP	ET-4STEP	ET-4STEP	ET-4STEP	ET-4STEP	ET-4STEP
Aktivitätenpaar	WE-4STEP	WA-4STEP	AE-4STEP	EA-4STEP	EW-4STEP	AW-4STEP
Verkehrserzeugung						
Nachfrageschicht	WE_ET-4STEP	WA_ET-4STEP	AE_ET-4STEP	EA_ET-4STEP	EW_ET-4STEP	AW_ET-4STEP
Normierung der Summen	Summe der QA			Summe der ZA		
QAdefinition	[Anz. Erwerbstätige] * [sV Datenbasis]			[Einkaufsfläche] * [ER Datenbasis]	[Einkaufsfläche] * [ER Datenbasis]	[Anz. Arbeitsplätze] * [ER Datenbasis]
ZAdefinition	[Einkaufsfläche] * [ER Datenbasis]	[Anz. Arbeitsplätze] * [ER Datenbasis]	[Einkaufsfläche] * [ER Datenbasis]	[Anz. Erwerbstätige] * [sV Datenbasis]		
Zielwahl						
Nachfrageschicht	WE_ET-4STEP	WA_ET-4STEP	AE_ET-4STEP	EA_ET-4STEP	EW_ET-4STEP	AW_ET-4STEP
Nutzendefinition	71					
Nutzenfunktion	<ul style="list-style-type: none">• Logit (c = 1)• gekoppelt bzgl. QA• für WA: zweiseitig gekoppelt (RSA bzgl. der Summe der QA)<ul style="list-style-type: none">• max. Iterationen = 99999 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)• Gütefaktor = 99999 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)• Optimierungsverfahren: MULTI• für WE & AE: einseitig gekoppelt			<ul style="list-style-type: none">• Logit (c = 1)• gekoppelt bzgl. ZA• für AW: zweiseitig gekoppelt (RSA bzgl. der Summe der ZA)<ul style="list-style-type: none">• max. Iterationen = 99999 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)• Gütefaktor = 99999 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)• Optimierungsverfahren: MULTI• für EA & EW: einseitig gekoppelt		

Tabelle 22: Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (Vier-Stufen-Algorithmus).

Modelltheorie					
EVA					
Personengruppen					
Code	ET-EVA				
Name	Erwerbstätig EVA				
Strukturgrößen					
Code	A-EVA	E-EVA		S-EVA	
Name	Arbeit EVA	Einkaufen EVA		Sonstiges EVA	
Aktivitäten					
Code	A-EVA	W-EVA	E-EVA	S-EVA	
Name	Arbeit EVA	Wohnen EVA	Einkaufen EVA	Sonstiges EVA	
Heimat	Nein	Ja	Nein	Nein	
Strukturgrößen	A-EVA	nicht relevant	E-EVA	S-EVA	
Aktivitätenpaare					
Code	AW-EVA	WA-EVA	SS-EVA	EW-EVA	WE-EVA
Name	Arbeit-Wohnen EVA	Wohnen-Arbeit EVA	Sonstiges-Sonstiges EVA	Einkaufen-Wohnen EVA	Wohnen-Einkaufen EVA
Quellaktivität	A-EVA	W-EVA	S-EVA	E-EVA	W-EVA
Zielaktivität	W-EVA	A-EVA	S-EVA	W-EVA	E-EVA
Quelle-Ziel-Typ	2	1	3	2	1
Nachfrageschichten gemeinsam koppeln	quellseitig gemeinsam gekoppelt	zielseitig gemeinsam gekoppelt	beidseitig gemeinsam gekoppelt	quellseitig gemeinsam gekoppelt	zielseitig gemeinsam gekoppelt
Nachfrageschichten					
Code, Name	AW_ET-EVA	WA_ET-EVA	SS_ET-EVA	EW_ET-EVA	WE_ET-EVA
Personengruppen	ET-EVA	ET-EVA	ET-EVA	ET-EVA	ET-EVA
Aktivitätenpaar	AW-EVA	WA-EVA	SS-EVA	EW-EVA	WE-EVA
Quelle-Ziel-Typ	2	1	3	2	1
Strukturgrößen Quelle	A-EVA	nicht relevant	S-EVA	E-EVA	nicht relevant
Strukturgrößen Ziel	nicht relevant	A-EVA	S-EVA	nicht relevant	E-EVA
Gewicht	-	-	-	-	-
Randsummenbedingungen					
NSchicht Code	AW_ET-EVA	WA_ET-EVA	SS_ET-EVA	EW_ET-EVA	WE_ET-EVA
Quelle-Ziel-Typ	2	1	3	2	1
RSA	-	-	Ja	-	-
RSB Quelle	hart	hart	offen	weich	hart
RSF QMin konst.	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
RSF QMin	1	1	0	0	1
RSF QMax konst.	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
RSF QMax	1	1	99999999	3	1
RSB Ziel	hart	hart	offen	hart	weich
RSF ZMin konst.	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
RSF ZMin	1	1	0	1	0

RSF ZMax konst.	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
RSF ZMax	1	1	99999999	1	3
Aufk. als Potential	-	-	Ja	Ja	Ja
Verkehrserzeugung					
Rate konstant	Ja ⁷²				
Untersuchungs- raumanteil kon- stant	Ja (= 1)				
Skripte	Ausführung des RSA 1				
Zielwahl					
Nutzendefinition	71				
Nutzenfunktion	<ul style="list-style-type: none">• Logit (c = 1)• Heimatbezirk für Nachfrageschichten vom Typ 3 berücksichtigen• Berechnung von RSA 2• max. Iterationen = 65000• Toleranz harte RSB = 1000• Toleranz nicht-harte RSB = 1000• Optimierungsverfahren: FURNESS				

Tabelle 23: Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (EVA).

Modelltheorie						
VISEM						
Personengruppen						
Code	ET-VISEM					
Name	Erwerbstätig VISEM					
Strukturgrößen						
Code	A-VISEM			E-VISEM		
Name	Arbeit VISEM			Einkaufen VISEM		
Aktivitäten						
Code	A-VISEM		W-VISEM		E-VISEM	
Name	Arbeit VISEM		Wohnen VISEM		Einkaufen VISEM	
Heimat	Nein		Ja		Nein	
Rang	1		-		2	
Strukturgröße	A-VISEM		nicht relevant		E-VISEM	
Zielseitige Kopplung	Ja		Ja		Ja	
Nachfrageschichten gemeinsam koppeln	Ja		-		Ja	
RSF ZMin	1		1		0	
RSF ZMax	1		1		3	
Aktivitätenpaare						
Code	AW-VISEM	WA-VISEM	AE-VISEM	EA-VISEM	EW-VISEM	WE-VISEM
Name	Arbeit-Wohnen VISEM	Wohnen-Arbeit VISEM	Arbeit-Einkaufen VISEM	Einkauf-fen-Arbeit VISEM	Einkauf-fen-Wohnen VISEM	Wohnen-Einkaufen VISEM
Quellaktivität	A-VISEM	W-VISEM	A-VISEM	E-VISEM	E-VISEM	W-VISEM
Zielaktivität	W-VISEM	A-VISEM	E-VISEM	A-VISEM	W-VISEM	E-VISEM
Ganglinie(n)	konst.	konst.	konst.	konst.	konst.	konst.
Aktivitätenketten						
Code, Name	WAW-VISEM		WAEW-VISEM		WEAW-VISEM	
Aktivitäten-Sequenz	W-VISEM, A-VISEM, W-VISEM		W-VISEM, A-VISEM, E-VISEM, W-VISEM		W-VISEM, E-VISEM, A-VISEM, W-VISEM	
Nachfrageschichten						
Code, Name	WAW_ET-VISEM		WAEW_ET-VISEM		WEAW_ET-VISEM	
Personengruppen	ET-VISEM		ET-VISEM		ET-VISEM	
Aktivitätenkette	W-VISEM, A-VISEM, W-VISEM		W-VISEM, A-VISEM, E-VISEM, W-VISEM		W-VISEM, E-VISEM, A-VISEM, W-VISEM	
Verkehrserzeugung						
Mobilitätsrate konstant	Ja ⁷³					
Untersuchungsraumanteil Heimat konstant	Ja (= 1)					

Zielwahl	
Nutzendefinition	71
Nutzenfunktion	<ul style="list-style-type: none">• Logit ($c = 1$)• Rubberbanding für Pflichtaktivität mit Gewicht 1• max. Iterationen = 65000 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)• Genauigkeitsfaktor = 99999 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)

Tabelle 24: Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (VISEM).

Experiment 3

Modelltheorie				
Vier-Stufen-Algorithmus				
Personengruppen				
Code	TET-4STEP		VET-4STEP	
Name	Erwerbstätig Teilzeit 4STEP		Erwerbstätig Vollzeit 4STEP	
Aktivitätenpaare				
Code	WA-4STEP		AW-4STEP	
Name	Wohnen-Arbeit 4STEP		Arbeit-Wohnen 4STEP	
Nachfrageschichten				
Code, Name	WA_VET-4STEP	WA_TET-4STEP	AW_VET-4STEP	AW_TET-4STEP
Personengruppen	VET-4STEP	TET-4STEP	VET-4STEP	TET-4STEP
Aktivitätenpaar	WA-4STEP		AW-4STEP	
Verkehrserzeugung				
Nachfrageschicht	WA_VET-4STEP	WA_TET-4STEP	AW_VET-4STEP	AW_TET-4STEP
Normierung der Summen	Summe der QA		Summe der ZA	
QAdefinition	[Anz. Erwerbstätige Vollzeit] * [sV Datenbasis]	[Anz. Erwerbstätige Teilzeit] * [sV Datenbasis]	[Anz. Arbeitsplätze] * [ER Datenbasis]	
ZAdefinition	[Anz. Arbeitsplätze] * [ER Datenbasis]		[Anz. Erwerbstätige Vollzeit] * [sV Datenbasis]	[Anz. Erwerbstätige Teilzeit] * [sV Datenbasis]
Zielwahl				
Nachfrageschicht	WA_VET-4STEP	WA_TET-4STEP	AW_VET-4STEP	AW_TET-4STEP
Nutzendefinition	71			
Nutzenfunktion	<ul style="list-style-type: none">• Logit (c = 1)• gekoppelt bzgl. QA• zweiseitig gekoppelt (RSA bzgl. der Summe der QA)• max. Iterationen = 99999 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)• Gütefaktor = 99999 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)• Optimierungsverfahren: MULTI		<ul style="list-style-type: none">• Logit (c = 1)• gekoppelt bzgl. ZA• zweiseitig gekoppelt (RSA bzgl. der Summe der ZA)• max. Iterationen = 99999 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)• Gütefaktor = 99999 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)• Optimierungsverfahren: MULTI	

Tabelle 25: Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (Vier-Stufen-Algorithmus).

Modelltheorie				
EVA				
Personengruppen				
Code	TET-EVA		VET-EVA	
Name	Erwerbstätig Teilzeit EVA		Erwerbstätig Vollzeit EVA	
Strukturgrößen				
Code	A-EVA			
Name	Arbeit EVA			
Aktivitäten				
Code	A-EVA		W-EVA	
Name	Arbeit EVA		Wohnen EVA	
Heimat	Nein		Ja	
Strukturgrößen	A-EVA		nicht relevant	
Aktivitätenpaare				
Code	AW-EVA		WA-EVA	
Name	Arbeit-Wohnen EVA		Wohnen-Arbeit EVA	
Quellaktivität	A-EVA		W-EVA	
Zielaktivität	W-EVA		A-EVA	
Quelle-Ziel-Typ	2		1	
Nachfrageschichten gemeinsam koppeln	quellseitig gemeinsam gekoppelt		zielseitig gemeinsam gekoppelt	
Nachfrageschichten				
Code, Name	AW_TET-EVA	WA_TET-EVA	AW_VET-EVA	WA_VET-EVA
Personengruppen	TET-EVA	TET-EVA	VET-EVA	VET-EVA
Aktivitätenpaar	AW-EVA	WA-EVA	AW-EVA	WA-EVA
Quelle-Ziel-Typ	2	1	2	1
Strukturgrößen Quelle	A-EVA	nicht relevant	A-EVA	nicht relevant
Strukturgrößen Ziel	nicht relevant	A-EVA	nicht relevant	A-EVA
Gewicht	-	-	-	-
Randsummenbedingungen				
NSchicht Code	AW_TET-EVA	WA_TET-EVA	AW_VET-EVA	WA_VET-EVA
Quelle-Ziel-Typ	2	1	2	1
RSA	-	-	-	-
RSB Quelle, RSB Ziel	hart	hart	hart	hart
RSF QMin konst., RSF ZMin konst.	Ja	Ja	Ja	Ja
RSF QMin, RSF ZMin	1	1	1	1
RSF QMax konst., RSF ZMax konst.	Ja	Ja	Ja	Ja
RSF QMax, RSF ZMax	1	1	1	1
Aufk. als Potential	-	-	-	-
Verkehrserzeugung				
Rate konstant	Ja ⁷²			
Untersuchungsraumanteil konstant	Ja (= 1)			
Skripte	Ausführung des RSA 1			

Zielwahl	
Nutzendefinition	71
Nutzenfunktion	<ul style="list-style-type: none">• Logit ($c = 1$)• Heimatbezirk für Nachfrageschichten vom Typ 3 berücksichtigen• max. Iterationen = 65000• Toleranz harte RSB = 1000• Toleranz nicht-harte RSB = 1000• Optimierungsverfahren: FURNESS

Tabelle 26: Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (EVA).

Modelltheorie		
VISEM		
Personengruppen		
Code	TET-VISEM	VET-VISEM
Name	Erwerbstätig Teilzeit VISEM	Erwerbstätig Vollzeit VISEM
Strukturgrößen		
Code	A-VISEM	
Name	Arbeit VISEM	
Aktivitäten		
Code	A-VISEM	W-VISEM
Name	Arbeit VISEM	Wohnen VISEM
Heimat	Nein	Ja
Rang	1	-
Strukturgröße	A-VISEM	nicht relevant
Zielseitige Kopplung	Ja	Ja
Nachfrageschichten gemeinsam koppeln	Ja	-
RSF ZMin, RSF ZMax	1	1
Aktivitätenpaare		
Code	AW-VISEM	WA-VISEM
Name	Arbeit-Wohnen VISEM	Wohnen-Arbeit VISEM
Quellaktivität	A-VISEM	W-VISEM
Zielaktivität	W-VISEM	A-VISEM
Ganglinie(n)	konst.	konst.
Aktivitätenketten		
Code, Name	WAW-VISEM	
Aktivitäten-Sequenz	W-VISEM, A-VISEM, W-VISEM	
Nachfrageschichten		
Code, Name	WAW_TET-VISEM	WAW_VET-VISEM
Personengruppen	TET-VISEM	VET-VISEM
Aktivitätenkette	W-VISEM, A-VISEM, W-VISEM	W-VISEM, A-VISEM, W-VISEM
Verkehrserzeugung		
Mobilitätsrate konstant	Ja ⁷³	
Untersuchungsraumanteil Heimat konstant	Ja (= 1)	
Zielwahl		
Nutzendefinition	71	
Nutzenfunktion	<ul style="list-style-type: none">• Logit (c = 1)• Rubberbanding für Pflichtaktivität mit Gewicht 1• max. Iterationen = 65000 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)• Genauigkeitsfaktor = 99999 (bzw. 999 beim 1.175-Zellen-Modell)	

Tabelle 27: Spezifikationen für das Nachfragemodell „Wohnen und Arbeit mit einer Personengruppe“ (WISEM).

Experiment 4

Modelle für eine Personengruppe

Modelltheorie		
EVA		
Personengruppen		
Code	ET_ges	
Name	Erwerbstätig ges	
Strukturgrößen		
Code	A_ges	
Name	Arbeit ges	
Aktivitäten		
Code	A_ges	W_ges
Name	Arbeit ges	Wohnen ges
Heimat	Nein	Ja
Strukturgrößen	A_ges	nicht relevant
Aktivitätenpaare		
Code	AW_ges	WA_ges
Name	Arbeit-Wohnen ges	Wohnen-Arbeit ges
Quellaktivität	A_ges	W_ges
Zielaktivität	W_ges	A_ges
Quelle-Ziel-Typ	2	1
Nachfrageschichten gemeinsam koppeln	quellseitig gemeinsam koppeln	zielseitig gemeinsam koppeln
Nachfrageschichten		
Code, Name	AW_ET_ges	WA_ET_ges
Personengruppen	ET_ges	ET_ges
Aktivitätenpaar	AW_ges	WA_ges
Quelle-Ziel-Typ	2	1
Strukturgrößen Quelle	A_ges	Nicht relevant
Strukturgrößen Ziel	Nicht relevant	A_ges
Gewicht	-	
Randsummenbedingungen		
NSchicht Code	AW_ET_ges	WA_ET_ges
Quelle-Ziel-Typ	2	1
RSA	-	
RSB Quelle, RSB Ziel	hart	
RSF QMin konst., RSF ZMin konst.	Ja	
RSF QMin, RSF ZMin	1	
RSF QMax konst., RSF ZMax konst.	Ja	
RSF QMax, RSF ZMax	1	
Aufk. als Potential	-	

Verkehrserzeugung	
Rate konstant	Ja ⁷²
Untersuchungsraumanteil konstant	Ja (= 1)
Skripte	Ausführung des RSA 1
Zielwahl	
Nutzendefinition	71
Nutzenfunktion	<ul style="list-style-type: none"> • Logit (c = 1) • Heimatbezirk für Nachfrageschichten vom Typ 3 berücksichtigen • max. Iterationen = 65000 • Toleranz harte RSB = 1000 • Toleranz nicht-harte RSB = 1000 • Optimierungsverfahren: FURNESS

Tabelle 28: Spezifikationen für das Nachfragemodell „Eine Personengruppe, ohne personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich“ (EVA).

Modelltheorie		
VISEM		
Personengruppen		
Code	ET_ges	
Name	Erwerbstätig ges	
Strukturgrößen		
Code	A_ges	
Name	Arbeit ges	
Aktivitäten		
Code	A_ges	W_ges
Name	Arbeit ges	Wohnen ges
Heimat	Nein	Ja
Rang	1	-
Strukturgröße	A_ges	nicht relevant
Zielseitige Kopplung	Ja	Ja
Nachfrageschichten gemeinsam koppeln	Nein	-
RSF ZMin, RSF ZMax	1	1
Aktivitätenpaare		
Code	AW_ges	WA_ges
Name	Arbeit-Wohnen ges	Wohnen-Arbeit ges
Quellaktivität	A_ges	W_ges
Zielaktivität	W_ges	A_ges
Ganglinie(n)	konst.	konst.
Aktivitätenketten		
Code, Name	WAW_ges	
Aktivitäten-Sequenz	W_ges, A_ges, W_ges	
Nachfrageschichten		
Code, Name	WAW_ET_ges	
Personengruppen	ET_ges	
Aktivitätenkette	W_ges, A_ges, W_ges	
Verkehrserzeugung		
Mobilitätsrate konstant	Ja ⁷³	
Untersuchungsraumanteil Heimat konstant	Ja (= 1)	
Zielwahl		
Nutzendefinition	71	
Nutzenfunktion	<ul style="list-style-type: none">• Logit (c = 1)• Rubberbanding für Pflichtaktivität mit Gewicht 1• max. Iterationen = 65000• Genauigkeitsfaktor = 99999	

Tabelle 29: Spezifikationen für das Nachfragemodell „Eine Personengruppe, ohne personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich“ (WISEM).

Modelle für zwei Personengruppen ohne personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich

Modelltheorie				
EVA				
Personengruppen				
Code	TET_oRSA		VET_oRSA	
Name	Erwerbstätig Teilzeit oRSA		Erwerbstätig Vollzeit oRSA	
Strukturgrößen				
Code	A_oRSA			
Name	Arbeit oRSA			
Aktivitäten				
Code	A_oRSA		W_oRSA	
Name	Arbeit oRSA		Wohnen oRSA	
Heimat	Nein		Ja	
Strukturgrößen	A_oRSA		nicht relevant	
Aktivitätenpaare				
Code	AW_oRSA		WA_oRSA	
Name	Arbeit-Wohnen oRSA		Wohnen-Arbeit oRSA	
Quellaktivität	A_oRSA		W_oRSA	
Zielaktivität	W_oRSA		A_oRSA	
Quelle-Ziel-Typ	2		1	
Nachfrageschichten gemeinsam koppeln	getrennt rechnen		getrennt rechnen	
Nachfrageschichten				
Code, Name	AW_TET_oRSA	WA_TET_oRSA	AW_VET_oRSA	WA_VET_oRSA
Personengruppen	TET_oRSA	TET_oRSA	VET_oRSA	VET_oRSA
Aktivitätenpaar	AW_oRSA	WA_oRSA	AW_oRSA	WA_oRSA
Quelle-Ziel-Typ	2	1	2	1
Strukturgrößen Quelle	A_oRSA	nicht relevant	A_oRSA	nicht relevant
Strukturgrößen Ziel	nicht relevant	A_oRSA	nicht relevant	A_oRSA
Gewicht	-			
Randsummenbedingungen				
NSchicht Code	AW_TET_oRSA	WA_TET_oRSA	AW_VET_oRSA	WA_VET_oRSA
Quelle-Ziel-Typ	2	1	2	1
RSA	-			
RSB Quelle, RSB Ziel	hart			
RSF QMin konst., RSF ZMin konst.	Ja			
RSF QMin, RSF ZMin	1			
RSF QMax konst., RSF ZMax konst.	Ja			
RSF QMax, RSF ZMax	1			
Aufk. als Potential	-			

Verkehrserzeugung	
Rate konstant	Ja ⁷²
Untersuchungsraumanteil konstant	Ja (= 1)
Skripte	Ausführung des RSA 1
Zielwahl	
Nutzendefinition	⁷¹
Nutzenfunktion	<ul style="list-style-type: none"> • Logit (c = 1) • Heimatbezirk für Nachfrageschichten vom Typ 3 berücksichtigen • max. Iterationen = 65000 • Toleranz harte RSB = 1000 • Toleranz nicht-harte RSB = 1000 • Optimierungsverfahren: FURNESS

Tabelle 30: Spezifikationen für das Nachfragemodell „Zwei Personengruppen, ohne personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich“ (EVA).

Modelltheorie		
VISEM		
Personengruppen		
Code	TET_oRSA	VET_oRSA
Name	Erwerbstätig Teilzeit oRSA	Erwerbstätig Vollzeit oRSA
Strukturgrößen		
Code	A_oRSA	
Name	Arbeit oRSA	
Aktivitäten		
Code	A_oRSA	W_oRSA
Name	Arbeit oRSA	Wohnen oRSA
Heimat	Nein	Ja
Rang	1	-
Strukturgröße	A_oRSA	nicht relevant
Zielseitige Kopplung	Ja	Ja
Nachfrageschichten gemeinsam koppeln	Nein	-
RSF ZMin, RSF ZMax	1	1
Aktivitätenpaare		
Code	AW_oRSA	WA_oRSA
Name	Arbeit-Wohnen oRSA	Wohnen-Arbeit oRSA
Quellaktivität	A_oRSA	W_oRSA
Zielaktivität	W_oRSA	A_oRSA
Ganglinie(n)	konst.	konst.
Aktivitätenketten		
Code, Name	WAW_oRSA	
Aktivitäten-Sequenz	W_oRSA, A_oRSA, W_oRSA	
Nachfrageschichten		
Code, Name	WAW_TET_oRSA	WAW_VET_oRSA
Personengruppen	TET_oRSA	VET_oRSA
Aktivitätenkette	W_oRSA, A_oRSA, W_oRSA	W_oRSA, A_oRSA, W_oRSA
Verkehrserzeugung		
Mobilitätsrate konstant	Ja ⁷³	
Untersuchungsraumanteil Heimat konstant	Ja (= 1)	
Zielwahl		
Nutzendefinition	71	
Nutzenfunktion	<ul style="list-style-type: none">• Logit (c = 1)• Rubberbanding für Pflichtaktivität mit Gewicht 1• max. Iterationen = 65000• Genauigkeitsfaktor = 99999	

Tabelle 31: Spezifikationen für das Nachfragemodell „Zwei Personengruppen, ohne personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich“ (WISEM).

Modelle für zwei Personengruppen mit personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich

Modelltheorie				
EVA				
Personengruppen				
Code	TET_mRSA		VET_mRSA	
Name	Erwerbstätig Teilzeit mRSA		Erwerbstätig Vollzeit mRSA	
Strukturgrößen				
Code	A_mRSA			
Name	Arbeit mRSA			
Aktivitäten				
Code	A_mRSA	W_mRSA		
Name	Arbeit mRSA	Wohnen mRSA		
Heimat	Nein	Ja		
Strukturgrößen	A_mRSA	nicht relevant		
Aktivitätenpaare				
Code	AW_mRSA	WA_mRSA		
Name	Arbeit-Wohnen mRSA	Wohnen-Arbeit mRSA		
Quellaktivität	A_mRSA	W_mRSA		
Zielaktivität	W_mRSA	A_mRSA		
Quelle-Ziel-Typ	2	1		
Nachfrageschichten gemeinsam koppeln	quellseitig gemeinsam gekoppelt	zielseitig gemeinsam gekoppelt		
Nachfrageschichten				
Code, Name	AW_TET_mRSA	WA_TET_mRSA	AW_VET_mRSA	WA_VET_mRSA
Personengruppen	TET_mRSA	TET_mRSA	VET_mRSA	VET_mRSA
Aktivitätenpaar	AW_mRSA	WA_mRSA	AW_mRSA	WA_mRSA
Quelle-Ziel-Typ	2	1	2	1
Strukturgrößen Quelle	A_mRSA	nicht relevant	A_mRSA	nicht relevant
Strukturgrößen Ziel	nicht relevant	A_mRSA	nicht relevant	A_mRSA
Gewicht	-			
Randsummenbedingungen				
NSchicht Code	AW_TET_mRSA	WA_TET_mRSA	AW_VET_mRSA	WA_VET_mRSA
Quelle-Ziel-Typ	2	1	2	1
RSA	-			
RSB Quelle, RSB Ziel	hart			
RSF QMin konst., RSF ZMin konst.	Ja			
RSF QMin, RSF ZMin	1			
RSF QMax konst., RSF ZMax konst.	Ja			
RSF QMax, RSF ZMax	1			
Aufk. als Potential	-			

Verkehrserzeugung	
Rate konstant	Ja ⁷²
Untersuchungsraumanteil konstant	Ja (= 1)
Skripte	Ausführung des RSA 1
Zielwahl	
Nutzendefinition	71
Nutzenfunktion	<ul style="list-style-type: none"> • Logit (c = 1) • Heimatbezirk für Nachfrageschichten vom Typ 3 berücksichtigen • max. Iterationen = 65000 • Toleranz harte RSB = 1000 • Toleranz nicht-harte RSB = 1000 • Optimierungsverfahren: FURNESS

Tabelle 32: Spezifikationen für das Nachfragemodell „Zwei Personengruppen, mit personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich“ (EVA).

Modelltheorie		
VISEM		
Personengruppen		
Code	TET_mRSA	VET_mRSA
Name	Erwerbstätig Teilzeit mRSA	Erwerbstätig Vollzeit mRSA
Strukturgrößen		
Code	A_mRSA	
Name	Arbeit mRSA	
Aktivitäten		
Code	A_mRSA	W_mRSA
Name	Arbeit mRSA	Wohnen mRSA
Heimat	Nein	Ja
Rang	1	-
Strukturgröße	A_mRSA	nicht relevant
Zielseitige Kopplung	Ja	Ja
Nachfrageschichten gemeinsam koppeln	Ja	-
RSF ZMin, RSF ZMax	1	1
Aktivitätenpaare		
Code	AW_mRSA	WA_mRSA
Name	Arbeit-Wohnen mRSA	Wohnen-Arbeit mRSA
Quellaktivität	A_mRSA	W_mRSA
Zielaktivität	W_mRSA	A_mRSA
Ganglinie(n)	konst.	konst.
Aktivitätenketten		
Code, Name	WAW_mRSA	
Aktivitäten-Sequenz	W_mRSA, A_mRSA, W_mRSA	
Nachfrageschichten		
Code, Name	WAW_TET_mRSA	WAW_VET_mRSA
Personengruppen	TET_mRSA	VET_mRSA
Aktivitätenkette	W_mRSA, A_mRSA, W_mRSA	W_mRSA, A_mRSA, W_mRSA
Verkehrserzeugung		
Mobilitätsrate konstant	Ja ⁷³	
Untersuchungsraumanteil Heimat konstant	Ja (= 1)	
Zielwahl		
Nutzendefinition	71	
Nutzenfunktion	<ul style="list-style-type: none">• Logit (c = 1)• Rubberbanding für Pflichtaktivität mit Gewicht 1• max. Iterationen = 65000• Genauigkeitsfaktor = 99999	

Tabelle 33: Spezifikationen für das Nachfragemodell „Zwei Personengruppen, mit personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich“ (WISEM).

Experiment 5

Modelltheorie						
VISEM						
Personengruppen						
Code	ET-VISEM					
Name	Erwerbstätig VISEM					
Strukturgrößen						
Code	A-VISEM			E-VISEM		
Name	Arbeit VISEM			Einkaufen VISEM		
Aktivitäten						
Code	A-VISEM		W-VISEM		E-VISEM	
Name	Arbeit VISEM		Wohnen VISEM		Einkaufen VISEM	
Heimat	Nein		Ja		Nein	
Rang	1		-		2	
Strukturgröße	A-VISEM		nicht relevant		E-VISEM	
Zielseitige Kopplung	Ja		Ja		Ja	
Nachfrageschichten gemeinsam koppeln	Ja		-		Ja	
RSF ZMin	1		1		0	
RSF ZMax	1		1		3	
Aktivitätenpaare						
Code	AW-VISEM	WA-VISEM	AE-VISEM	EA-VISEM	EW-VISEM	WE-VISEM
Name	Arbeit-Wohnen VISEM	Wohnen-Arbeit VISEM	Arbeit-Einkaufen VISEM	Einkauf-fen-Arbeit VISEM	Einkauf-fen-Wohnen VISEM	Wohnen-Einkaufen VISEM
Quellaktivität	A-VISEM	W-VISEM	A-VISEM	E-VISEM	E-VISEM	W-VISEM
Zielaktivität	W-VISEM	A-VISEM	E-VISEM	A-VISEM	W-VISEM	E-VISEM
Ganglinie(n)	konst.	konst.	konst.	konst.	konst.	konst.
Aktivitätenketten						
Code, Name	WAW-VISEM		WAEW-VISEM		WEAW-VISEM	
Aktivitäten-Sequenz	W-VISEM, A-VISEM, W-VISEM		W-VISEM, A-VISEM, E-VISEM, W-VISEM		W-VISEM, E-VISEM, A-VISEM, W-VISEM	
Nachfrageschichten						
Code, Name	WAW_ET-VISEM		WAEW_ET-VISEM		WEAW_ET-VISEM	
Personengruppen	ET-VISEM		ET-VISEM		ET-VISEM	
Aktivitätenkette	W-VISEM, A-VISEM, W-VISEM		W-VISEM, A-VISEM, E-VISEM, W-VISEM		W-VISEM, E-VISEM, A-VISEM, W-VISEM	
Verkehrserzeugung						
Mobilitätsrate konstant	Ja ⁷³					
Untersuchungsraumanteil Heimat konstant	Ja (= 1)					

Zielwahl	
Nutzendefinition	71
Nutzenfunktion	<ul style="list-style-type: none">• Logit ($c = 1$)• Rubberbanding für Pflichtaktivität mit Gewicht 1• max. Iterationen = 65000• Genauigkeitsfaktor = 99999

Tabelle 34: Spezifikationen für die Nachfragemodelle der Einflussgröße „Stichprobengröße“.

Anhang 8 Spezifikation des Zielwahlschätzalgorithmus für die Untersuchungen in Kapitel 5

Folgende Nachfragemodelle sollen geschätzt werden:

- Vier-Stufen-Algorithmus (nur für die Experimente 1, 2 und 3)
- EVA (nur für die Experimente 1, 2, 3 und 4)
- VISEM (für alle Experimente)

Die Nutzenfunktion der Zielwahl hat folgende Grundform (es findet keine Moduswahl statt):

$$u = \beta_t \cdot M_t + \beta_d \cdot M_d \quad (71)$$

mit

u	Nutzen
M_t	Matrix der Reisezeit
β_t	Parameter der Reisezeit
M_d	Matrix der Reiseweite
β_d	Parameter der Reiseweite

Die Parameter β_t und β_d können folgende Werte in der Vorabauswertung annehmen. Es werden fünf initiale Auswertungen definiert, d.h. die unten stehenden Ausprägungslisten werden in fünf Intervalle geteilt und die Grenzen der Intervalle werden für die Vorabauswertung genutzt. Zusätzlich werden fünf zufällige Parameterausprägungen aus den unten stehenden Ausprägungslisten gezogen und in der Vorabauswertung bewertet. Der erste und der letzte Wert bestimmen die Bandbreite der möglichen Ausprägungen der finalen Parameter:

- $\beta_t = [-0,5; -0,49989998; \dots; -0,000100020004; -0,0]^{74,75}$
- $\beta_d = [-0,1; -0,0997998; \dots; 0,0997998; 0;1]^{76,77}$

Als Bewertungsgütemaß wird der *SQV*-Wert der Verkehrsleistungsmatrixsummen definiert. Zudem wird der Zellbinnenverkehr mit einer Filtermatrix herausgefiltert.

⁷⁴ Mit insgesamt 5.000 Zwischenschritten.

⁷⁵ Für die Ausprägung „eine Personengruppe und zwei Aktivitäten“ im 5-Zellen-Netzmodell wurde mit dieser Spezifikation kein gutes Ergebnis erreicht. Es werden daher folgende Spezifikation verwendet: $\beta_t = [-0,5; -0,49990018; \dots; -0,00109982; -0,001]^{74}$.

⁷⁶ Mit insgesamt 1.000 Zwischenschritten.

⁷⁷ Für die Ausprägung „eine Personengruppe und zwei Aktivitäten“ im 5-Zellen-Netzmodell wurde mit dieser Spezifikation kein gutes Ergebnis erreicht. Es werden daher folgende Spezifikation verwendet: $\beta_d = [-0,1; -0,0998999; \dots; -0,0001001; -0,0]^{76}$.

Für die Darstellung werden Reiseweitenverteilungen mit zehn äquiquantilen Klassen erzeugt.

Als Abbruchkriterium für die Schätzung werden definiert:

- Die Parameter sind in zwei aufeinanderfolgenden Iterationen konstant (Grenze = 0,0001).
- Es werden maximal 10.000 Iterationen durchgeführt.

Anhang 9 Zusätzliche Abbildungen zu den Experimentauswertungen von Kapitel 5.3.2

Experiment 4: Personengruppensegmentierung

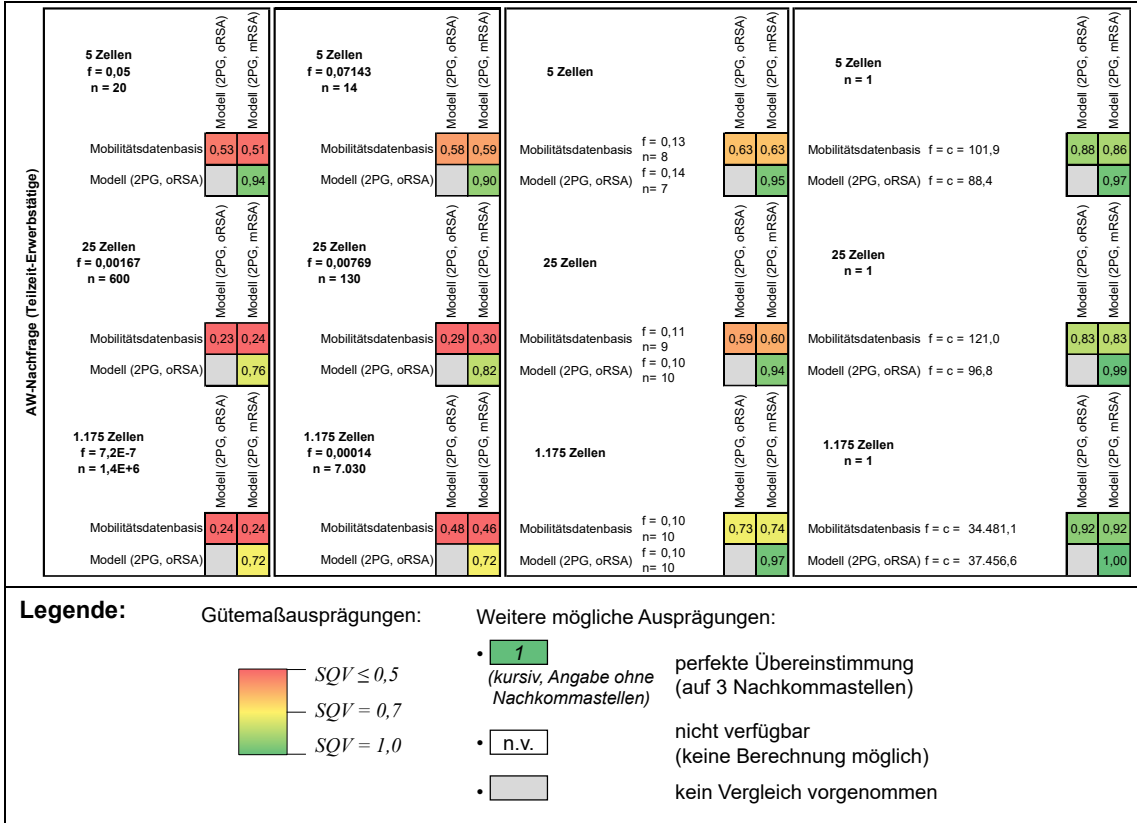
Auch die EVA-Modelltheorie ermöglicht es, einen personengruppenübergreifenden Randsummenausgleich vorzunehmen. Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Verkehrserzeugungs- und Zielwahlvergleiche mit EVA-Modellen dargestellt. Die Interpretation der Ergebnisse ist identisch mit der in Kapitel 5.4.2.

		mittl. $SQV(f=1)$ (Wege pro Person & Verkehrszelle)	$SQV(f=1)$ (Wege pro Person & Untersuchungsraum)	mittl. $SQV(f=1)$ (Wege pro Person & Verkehrszelle)	$SQV(f=1)$ (Wege pro Person & Untersuchungsraum)
WA-Nachfrage	5 Zellen	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)
		1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1
		Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)
	25 Zellen	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)
		1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1
		Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)
	1.175 Zellen	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)
		0,99 0,99 0,99 1,00 1,00 1,00 1 1 1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1	0,99 0,99 0,99 1,00 1,00 1,00 1 1 1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1
		Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)
WA-Nachfrage (Vollzeit-Erwerbstätige)	5 Zellen	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)
		1,00 1,00 1 1	1,00 1,00 1 1	1,00 1,00 1 1	1,00 1,00 1 1
		Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)
	25 Zellen	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)
		1,00 1,00 1 1	1,00 1,00 1 1	1,00 1,00 1 1	1,00 1,00 1 1
		Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)
	1.175 Zellen	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)
		0,99 0,99 1 1	1,00 1,00 1 1	0,99 0,99 1 1	1,00 1,00 1 1
		Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)
AW-Nachfrage	5 Zellen	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)
		1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1
		Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)
	25 Zellen	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)
		1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1
		Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)
	1.175 Zellen	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)
		0,99 0,99 0,99 1,00 1,00 1,00 1 1 1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1	0,99 0,99 0,99 1,00 1,00 1,00 1 1 1	1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1,00 1 1 1
		Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)
AW-Nachfrage (Vollzeit-Erwerbstätige)	5 Zellen	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)
		1,00 1,00 1 1	1,00 1,00 1 1	1,00 1,00 1 1	1,00 1,00 1 1
		Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)
	25 Zellen	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)
		1,00 1,00 1 1	1,00 1,00 1 1	1,00 1,00 1 1	1,00 1,00 1 1
		Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)
	1.175 Zellen	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (2PG, oRSA)
		0,99 0,99 1 1	1,00 1,00 1 1	0,99 0,99 1 1	1,00 1,00 1 1
		Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)	Modell (2PG, mRSA)

WA-Nachfrage (Teilzeit-Erwerbstätige)				AW-Nachfrage (Teilzeit-Erwerbstätige)			
5 Zellen		Modell (2PG, oRSA)		5 Zellen		Modell (2PG, oRSA)	
Mobilitätsdatenbasis	Modell (2PG, oRSA)	1,00	1,00	Mobilitätsdatenbasis	Modell (2PG, oRSA)	1,00	1,00
			1				1
25 Zellen		Modell (2PG, oRSA)		25 Zellen		Modell (2PG, oRSA)	
Mobilitätsdatenbasis	Modell (2PG, oRSA)	1,00	1,00	Mobilitätsdatenbasis	Modell (2PG, oRSA)	1,00	1,00
			1				1
1.175 Zellen		Modell (2PG, oRSA)		1.175 Zellen		Modell (2PG, oRSA)	
Mobilitätsdatenbasis	Modell (2PG, oRSA)	0,98	0,97	Mobilitätsdatenbasis	Modell (2PG, oRSA)	1,00	1,00
			1				1
Legende:				Gütemaßausprägungen:			
				Weitere mögliche Ausprägungen:			
				perfekte Übereinstimmung (auf 3 Nachkommastellen)			
				nicht verfügbar (keine Berechnung möglich)			
				kein Vergleich vorgenommen			

Abbildung 48: Vergleich der Verkehrserzeugungsergebnisse auf verschiedenen Aggregationsebenen für Experiment 4 (mit EVA-Modellen) (Bildquelle: eigene Darstellung).

	<i>mwSQV</i> (Matrix)	<i>mwSQV</i> (Dreiecksnetz)	<i>mwSQV</i> (Reiseweitenverteilung)	<i>SQV</i> (Nachfragematrixsumme)
WA-Nachfrage	5 Zellen $f = 0,05$ $n = 20$	5 Zellen $f = 0,07143$ $n = 14$	5 Zellen	5 Zellen $n = 1$
	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis $f = 0,20$ $n = 5$ Modell (1PG) $f = 0,17$ $n = 6$ Modell (2PG, oRSA) $f = 0,17$ $n = 6$	Mobilitätsdatenbasis $f = c = 449,3$ Modell (1PG) $f = c = 390,0$ Modell (2PG, oRSA) $f = c = 394,9$
	0,65 0,65 0,65	0,65 0,65 0,65	0,71 0,70 0,71	0,88 0,89 0,88
	0,97 1,00	0,98 1,00	0,98 1,00	0,99 1
	0,97	0,98	0,98	0,99
	25 Zellen $f = 0,00167$ $n = 600$	25 Zellen $f = 0,00769$ $n = 130$	25 Zellen	25 Zellen $n = 1$
	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis $f = 0,10$ $n = 10$ Modell (1PG) $f = 0,10$ $n = 10$ Modell (2PG, oRSA) $f = 0,10$ $n = 10$	Mobilitätsdatenbasis $f = c = 376,3$ Modell (1PG) $f = c = 386,8$ Modell (2PG, oRSA) $f = c = 389,2$
	0,44 0,44 0,44	0,53 0,53 0,53	0,75 0,74 0,75	0,97 0,97 0,97
	0,94 1,00	0,97 1,00	0,99 1	0,99 1
	0,94	0,97	0,99	0,99
	1.175 Zellen $f = 7,2E-7$ $n = 1,4E+6$	1.175 Zellen $f = 0,00014$ $n = 7,030$	1.175 Zellen	1.175 Zellen $n = 1$
	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis $f = 0,10$ $n = 10$ Modell (1PG) $f = 0,10$ $n = 10$ Modell (2PG, oRSA) $f = 0,10$ $n = 10$	Mobilitätsdatenbasis $f = c = 223.406,7$ Modell (1PG) $f = c = 229.125,6$ Modell (2PG, oRSA) $f = c = 229.250,6$
	0,41 0,40 0,41	0,62 0,63 0,61	0,85 0,85 0,85	0,98 0,98 0,98
	0,77 0,96	0,76 0,97	0,98 1,00	1,00 1
	0,74	0,75	0,98	1,00
AW-Nachfrage	5 Zellen $f = 0,05$ $n = 20$	5 Zellen $f = 0,07143$ $n = 14$	5 Zellen	5 Zellen $n = 1$
	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis $f = 0,20$ $n = 5$ Modell (1PG) $f = 0,14$ $n = 7$ Modell (2PG, oRSA) $f = 0,14$ $n = 7$	Mobilitätsdatenbasis $f = c = 449,3$ Modell (1PG) $f = c = 390,0$ Modell (2PG, oRSA) $f = c = 394,9$
	0,65 0,65 0,65	0,65 0,65 0,65	0,71 0,70 0,71	0,88 0,89 0,88
	0,97 1,00	0,98 1,00	0,98 1,00	0,99 1
	0,97	0,98	0,98	0,99
	25 Zellen $f = 0,00167$ $n = 600$	25 Zellen $f = 0,00769$ $n = 130$	25 Zellen	25 Zellen $n = 1$
	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis $f = 0,10$ $n = 10$ Modell (1PG) $f = 0,10$ $n = 10$ Modell (2PG, oRSA) $f = 0,10$ $n = 10$	Mobilitätsdatenbasis $f = c = 376,3$ Modell (1PG) $f = c = 386,8$ Modell (2PG, oRSA) $f = c = 389,2$
	0,44 0,44 0,44	0,53 0,53 0,53	0,74 0,74 0,74	0,97 0,97 0,97
	0,94 1,00	0,97 1,00	0,99 1	0,99 1
	0,94	0,97	0,99	0,99
	1.175 Zellen $f = 7,2E-7$ $n = 1,4E+6$	1.175 Zellen $f = 0,00014$ $n = 7,030$	1.175 Zellen	1.175 Zellen $n = 1$
	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis Modell (1PG) Modell (2PG, oRSA)	Mobilitätsdatenbasis $f = 0,10$ $n = 10$ Modell (1PG) $f = 0,10$ $n = 10$ Modell (2PG, oRSA) $f = 0,10$ $n = 10$	Mobilitätsdatenbasis $f = c = 223.406,7$ Modell (1PG) $f = c = 229.125,6$ Modell (2PG, oRSA) $f = c = 229.250,6$
	0,41 0,40 0,41	0,62 0,63 0,61	0,85 0,85 0,85	0,98 0,98 0,98
	0,77 0,96	0,76 0,97	0,98 1,00	1,00 1
	0,74	0,75	0,98	1,00



Schriftenreihe des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen

Heft 1	1. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1986	9/1987
Heft 2	2. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1988	4/1989
Heft 3	Arbeiten aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen	7/1989
Heft 4	Beiträge zum Ruhenden Verkehr	8/1989
Heft 5	Festkolloquium anlässlich der Vollendung des 60.Lebensjahres von Prof. Dr.-Ing. Gerd Steierwald	5/1990
Heft 6	3. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1990	4/1991
Heft 7	Wolfgang Hertkorn Veränderungen des Kraftstoffverbrauchs und der Abgasbelastungen durch Geschwindigkeitsreduktion in untergeordneten städtischen Straßennetzen	2/1992
Heft 8	City Stuttgart - attraktive Innenstadt im Zentrum einer Agglomeration (Autofreie Innenstadt = Attraktive City?)	3/1992
Heft 9	Arbeiten aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen	4/1992
Heft 10	Reinhard Unkhoff Der Einfluß des Schwerverkehrs auf Geschwindigkeitsverhalten und Pulkbildung auf Autobahnen	6/1992
Heft 11	Stefanos Bazis Interaktiver Straßenentwurf mit Hilfe der EDV	7/1992
Heft 12	Jiann-Sheng Wu Stochastische Simulation des Überholverhaltens auf zweistreifigen Landstraßen	7/1992

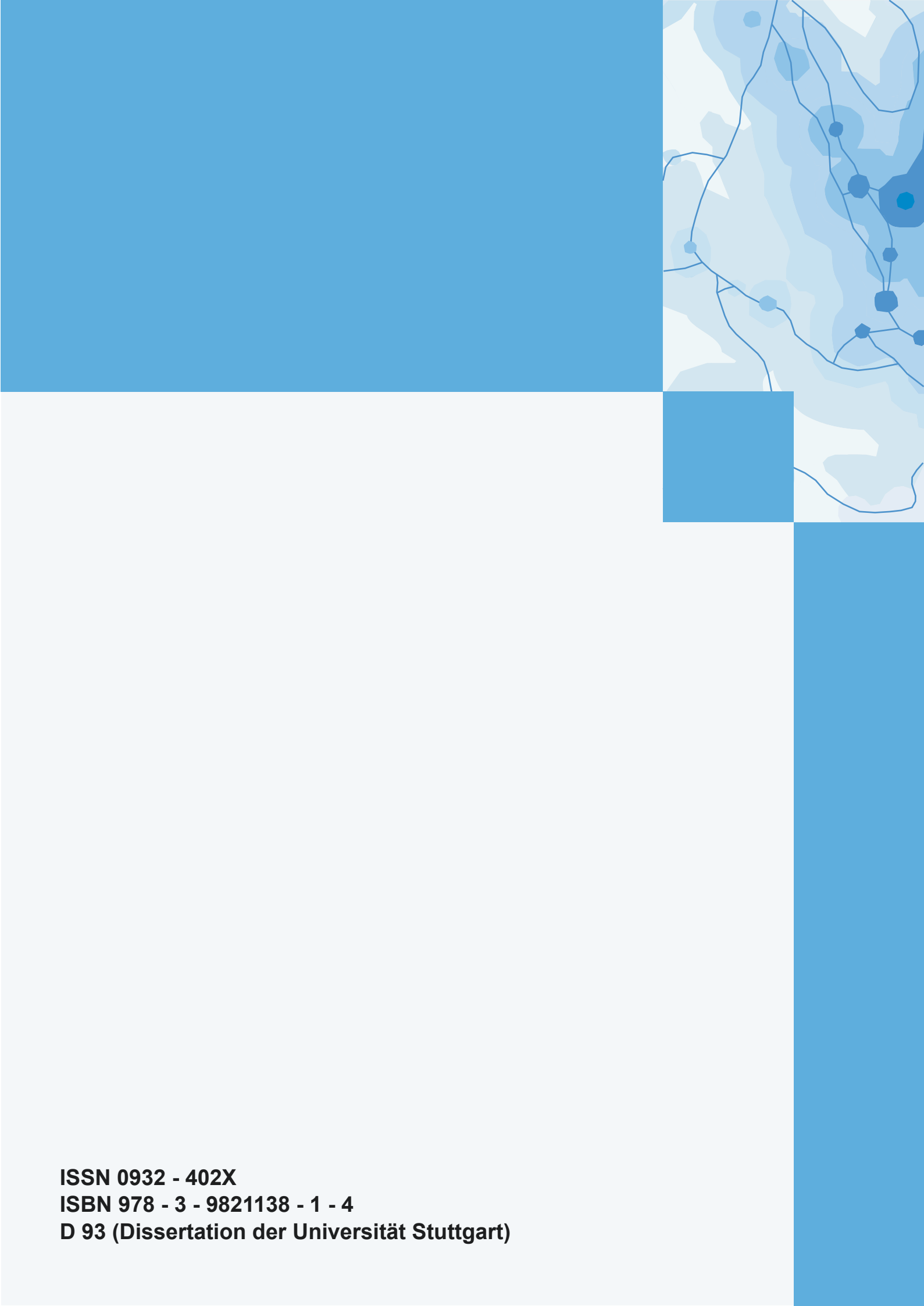
Heft 13	4. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1992	5/1993
Heft 14	Stephan Herkt Abstimmung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage und knotenpunktfreien Strecken an innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen	4/1994
Heft 15	Von den Anfängen bis zur Gegenwart -Straßen- und Verkehrswesen an der Universität Stuttgart	9/1994
Heft 16	Ashraf Hamed Abwicklung des Lieferverkehrs innerörtlichen Hauptstraßen	10/1994
Heft 17	5. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1994	3/1995
Heft 18	Chronik und Retrospektive - Gerd Steierwald und das Institut für Straßen- und Verkehrswesen	10/1995
Heft 19	Heiko Tempel Zusammenhänge zwischen Verkehrsablauf, Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen im städtischen Busverkehr	11/1995
Heft 20	Volker Mörgenthaler Strategien zur Verminderung der Emissionen von Ozonvorläufersubstanzen des Nutzfahrzeugverkehrs in Ballungsgebieten	2/1996
Heft 21	Martin Schmid Auswirkungen der Kraftstoffbesteuerung auf die Pkw-Fahrleistungen im Freizeitverkehr	11/1996
Heft 22	Burkhard Flasche Fahrtraumbewirtschaftung mit Sonderfahrstreifen für ausgewählte Stadtverkehre	2/1998
Heft 23	Szabolcs Törgyekes Ableitung spezifischer Abgas-Emissionsfaktoren für Kraftfahrzeugkollektive anhand von Konzentrationsmessungen in einem städtischen Straßentunnel	3/1998

Heft 24	Konrad von Kirchbach Zur Entwicklung der Straßen in Württemberg zwischen 1700 bis 1918	3/2000
Heft 25	6. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1999	3/2009
Heft 26	Symposium Stadt und Verkehr – Mobile Konferenz	11/1999
Heft 27	„Institut 21“ Aufbruch in Forschung und Lehre (nicht erschienen)	
Heft 28	Arbeiten aus dem Institut für Straßen- und Verkehrswesen	7/2001
Heft 29	Stefan Denzinger Auswirkungen alternierender Telearbeit auf das Verkehrsverhalten	4/2001
Heft 30	7. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 2001	3/2009
Heft 31	Prof. Elisabeth Deakin Changing Importance of Central Cities	8/2002
Heft 32	Walter Vogt, Matthias Lenz, Henrik Schwarz, Wilhelm Glaser, Margrit Glaser, Thomas Kuder Verkehrliche Auswirkungen von Teleshopping und Telecommerce auf die Mobilität privater Haushalte	6/2002
Heft 33	Christoph Hecht Modellierung des Zeitwahlverhaltens im Personenverkehr	2/2005
Heft 34	Henrik Schwarz Vergleich von Schallimmissionsmessungen bei Straßenverkehrslärm mit Standardisierten und Binauralen Geräten	11/2002
Heft 35	Peter Schick Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses	6/2003

Heft 36	Volker Schmid Reaktivierte Nebenbahnen und alternative Buskonzepte Vergleich von ökologischen Wirkungen	7/2003
Heft 37	8. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 2003	3/2009
Heft 38	Matthias Lenz Auswirkungen des Ausbaus der verkehrlichen Infrastruktur auf das regionale Fernpendleraufkommen	2/2005
Heft 39	Steffen R. Herrmann Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaningverhalten auf Fahrbahnoberflächen	2/2008
Heft 40	Manuel Galster Modellierung von Anbindungen in Verkehrsplanungsmodellen	8/2009
Heft 41	10. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 2008	8/2009
Heft 42	Johannes Schlaich Nutzung von Mobilfunkdaten für die Analyse der Routenwahl	6/2010
Heft 43	Florian Bitzer Mikroskopische Modellierung und Simulation des Fußgängerverkehrs	9/2010
Heft 44	Eileen Mandir Potential of Traffic Information to optimize Route and Departure Time Choice	7/2012
Heft 45	Anne Wolff Simulation of Pavement Surface Runoff using the Depth-Averaged Shallow Water Equations	3/2013
Heft 46	Stefan Alber Veränderung des Schallabsorptionsverhaltens von offenporigen Asphalten durch Verschmutzung	3/2013

Heft 47	Thomas Otterstätter Methoden zur Erfassung von Verkehrsströmen und Fahrzeiten mit stationären fahrzeugwiedererkennenden Detektoren	8/2013
Heft 48	Bruno Arbter Numerische Bestimmung der akustischen Eigenschaften offenerporiger Fahrbahnbeläge auf Basis ihrer rekonstruierten Geometrie	5/2014
Heft 49	Juliane Pillat Methoden zur Analyse und Prognose des Verkehrsaufkommens unter Berücksichtigung des Wetters auf Autobahnen	7/2014
Heft 50	Jochen Lohmiller Qualität des Verkehrsablaufs auf Netzabschnitten von Autobahnen - Bewertung unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeit und Analyse von Einflussfaktoren	7/2014
Heft 51	Katrin Keller Modellierung und Optimierung des Verkehrsablaufs in Evakuierungssituationen	9/2014
Heft 52	Yaohua Xiong A Framework for Traffic Assignment with Explicit Route Generation	9/2014
Heft 53	Markus Weise Einflüsse der mikroskaligen Oberflächen- geometrie von Asphaltdeckschichten auf das Tribosystem Reifen-Fahrbahn	11/2015
Heft 54	Benjamin Rabenstein Öffentliche Fahrradverleihsysteme - Wirkungen und Potenziale	12/2015
Heft 55	Lu Liu Development of a Virtual City Model for Urban Land Use and Transport Planning	8/2016

Heft 56	Marcos Manuel Sánchez Von Straßenlängsprofilen zum Reifen- Fahrbahn-Geräusch: Ein Modell zur Analyse des Textureinflusses	7/2019
Heft 57	Charlotte Ritz Modellierung und Wirkung von Maßnahmen der städtischen Verkehrsplanung	5/2019
Heft 58	Matthias Schmaus Quantifizierung der Treibhausgasemissionen des Personenverkehrs in langfristigen Energieszenarien auf kommunaler Ebene	8/2019
Heft 59	Maximilian Hartl Integrierte ÖV-Planung – Entwurf, Vergleich und Bewertung von planerischen und algorithmischen Lösungsverfahren	1/2020
Heft 60	Eric Pestel Qualität von Verkehrsnachfragemodellen	4/2021



ISSN 0932 - 402X
ISBN 978 - 3 - 9821138 - 1 - 4
D 93 (Dissertation der Universität Stuttgart)