

# Analyse der Relevanz von weg- und tourenbasierten Verkehrsmittelwahlansätzen am Beispiel eines aggregierten und eines aktivitätenbasierten Verkehrsmodells der Stadt Halle

Master-Thesis im Fachbereich Verkehr und Mobilität

MSE Civil Engineering



Eingereicht bei: Prof. Dr. Alexander Erath  
Dr. Michael van Eggermond

Externer Experte: Michael Arendt (Dipl. Bauing. ETH, Arendt Consulting)

Vorgelegt von: Fabio Martins Cachaco  
fabio.cachaco@students.fhnw.ch

Muttenz und Zürich, 3. März 2023

## Dank

Zum Abschluss meiner Master-Thesis haben zahlreiche Fachkollegen und Freunde direkt oder indirekt beigetragen. Ich möchte allen danken, die mich in diversen Gesprächen bei der thematischen Auseinandersetzung unterstützt und begleitet haben.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Alexander Erath, der es mir ermöglicht hat, diese Arbeit zu schreiben. Seine Anregungen und seine Unterstützung haben zur Lösung aller möglichen Probleme beigetragen, die sich während der Arbeit an dieser Master-Thesis stellten. Die Diskussionen mit ihm waren sehr hilfreich und führten meist zu kreativen Lösungsansätzen.

Ebenso möchte ich mich herzlich bei Dr. Michael von Eggermond bedanken. Er hat mir immer wieder neue Perspektiven aufgezeigt und neue Lösungswege ermöglicht.

Für die aufschlussreichen Gespräche aus der Praxis der Verkehrsplanung habe ich schliesslich Michael Arendt zu danken.

Während der Erarbeitung meiner Master-Thesis hat mich ein Aphorismus von George Box begleitet. Er sagte einmal:

*«All models are wrong, but some are useful.» (Box 1979)*

Dadurch hat sich im Laufe der Zeit auch ein gewisses Mass an Pragmatismus entwickelt.

## Zusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit untersucht die Relevanz und Auswirkung von weg- und tourenbasierten Verkehrsmittelwahlansätzen. Hierzu erfolgt zunächst eine qualitative Beschreibung der Wirkungsweise verschiedener Ansätze zur Modellierung der Verkehrsmittelwahl. Der Schwerpunkt wird insbesondere auf den Aggregation Bias und die Nutzenfunktion gelegt. Im Rahmen von Fallstudien mit synthetischen Daten erfolgt eine quantitative Abschätzung der Relevanz des Aggregation Bias.

Herzstück der Arbeit ist die Abschätzung der Wirkung des Aggregation Bias auf Basis von zwei Verkehrsmodellen, welche auf der gleichen Datenbasis beruhen. Das erste, disaggregierte Modell basiert auf dem Grundmodell ABM Halle und wird als aktivitätenbasiertes Nachfragemodell für die Verwendung im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelt. Die skriptbasierte Weiterentwicklung umfasst bspw. eine Erweiterung der verfügbaren Mobilitätswerkzeuge. Das zweite, aggregierte Modell verwendet die gleiche Verkehrsnachfrage, wie sie im disaggregierten Modell vorliegt. Ein Python-Skript aggregiert die bestehende Nachfrage hierzu nach Verkehrszwecken. Als Resultat liegen zwei Verkehrsmodelle mit identischen Netzdaten und Modellparametern vor – ein disaggregiertes und tourenbasiertes Verkehrsmodell sowie ein aggregiertes und wegbasiertes Verkehrsmodell.

Die Abschätzung der Wirkung des Aggregation Bias und der Vergleich des wegbasierten zum tourenbasierten Ansatz zur Verkehrsmittelwahl wird anhand von drei verkehrsplanerischen Massnahmen untersucht. Die Modellberechnungen legen nahe, dass ein aggregierter und wegbasierter Ansatz gegenüber einem disaggregierten und tourenbasierten Ansatz bei der Berechnung der Wirkung der verkehrsplanerischen Massnahmen eine Überschätzung der Veränderungen bezüglich der Verkehrsmittelanteile (Aggregation Bias) um 0.5 bis 2 Prozentpunkte hervorruft. Je nach Massnahme reagierte das aggregierte Modell bezüglich der veränderten Verkehrsmittelanteile zwischen 14% bis 74% stärker als das disaggregierte Modell. Aufgrund dieser Erkenntnis ist bei der Verwendung von aggregierten Verkehrsmodellen zur Berechnung des Nutzes im Infrastrukturbereich besondere Achtsamkeit gefragt. Dies gilt insbesondere bei der Modellierung von Massnahmen, bei denen wir wissen, dass personenbezogene Entscheidungen oder Merkmale (z. B. ÖV-Abonnementsbesitz) eine entscheidende Rolle spielen.

Die tourenbasierte und disaggregierte Verkehrsmittelwahl offenbart im Vergleich zur wegbasierten Verkehrsmittelwahl eine weitere Wirkung auf verkehrsplanerische Massnahmen, die überwiegend bei ÖV-Massnahmen zum Vorschein kommt. Aufgrund der Modellierung von Wegabfolgen ist eine starke (und realitätsnahe) Beziehung zwischen dem ÖV und Fusswegen (z. B. bei Zwischentouren) vorhanden. Diese Beziehung führt dazu, dass bei steigenden Verkehrsmittelanteilen im ÖV folglich auch die verketteten Fussverkehrsanteile zunehmen. Aggregierten Modelle vermögen diese nachweislich vorhandenen Zusammenhänge zwischen dem Fussverkehr und dem ÖV nicht genügend abzubilden. Verkehrsmodelle die als Anwendungsfall auch multimodale Wegabfolgen untersuchen und vorhersagen sollen, liegt die Empfehlung nahe, ein ABM zu verwenden.

## Abstract

This master thesis examines the relevance and impact of trip- and tour-based transport mode choice approaches. For this purpose, a qualitative description of the effects of different approaches for modelling the mode choice is given. The focus lies especially on the aggregation bias and the utility function. In the context of case studies with synthetic data, a quantitative assessment of the relevance of the aggregation bias is made.

The core of the work is the estimation of the effect of the aggregation bias based on two developed traffic models, which are based on the same database. The first, disaggregated model is based on the basic ABM Halle model and is further developed as an activity-based demand model. The script-based further development includes, for example, an extension of the available mobility tools. The second, aggregated model uses the same travel demand as in the disaggregated model. A Python script aggregates the existing demand for this purpose according to trip purposes. As a result, two traffic models with identical network data and model parameters are available - a disaggregated and tour-based traffic model and an aggregated and trip-based traffic model.

The estimation of the effect of aggregation bias and the comparison of the trip-based to the tour-based approach to mode choice is examined using three transportation planning measures. The model calculations suggest that an aggregated and trip-based approach, compared to a disaggregated and tour-based approach, produces an overestimation of changes with respect to mode shares (aggregation bias) by 0.5 to 2 percentage points when calculating the effect of transportation planning measures. Depending on the measure, the aggregated model responded between 14% to 74% more strongly than the disaggregated model in terms of changed mode shares. Based on this insight, special care is required when using aggregated demand models to calculate the benefits for infrastructures. This is especially true when modelling measures where we know that personal decisions or characteristics (e.g., public transport subscription) play a decisive role.

The tour-based and disaggregated mode choice reveals another effect on transport planning measures compared to the trip-based mode choice, which is predominantly revealed by public transport measures. Due to the modelling of trip sequences, there is a strong (and realistic) relationship between public transport and walking (e.g., for intermediate trips). This relationship leads to the fact that with increasing modal shares in public transport, the pedestrian shares consequently increase as well. Aggregated models are not able to sufficiently represent these existing relationships between pedestrian traffic and public transport. For traffic models that are to investigate and predict multimodal trip sequences, it is recommended to use an ABM.

# Inhaltsverzeichnis

<b>DANK</b> .....	<b>1</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>3</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>6</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>7</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>8</b>
<b>GLOSSAR</b> .....	<b>9</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>10</b>
1.1 HINTERGRUND .....	10
1.2 ZIELSETZUNG.....	11
1.3 VORGEHEN .....	12
<b>2 LITERATUR</b> .....	<b>13</b>
2.1 ANSÄTZE DER VERKEHRSMODELLIERUNG.....	13
2.2 AKTIVITÄTENBASIERTE MODELLE .....	15
2.3 AGGREGATION BIAS .....	18
2.4 NUTZENFUNKTION .....	20
2.5 ZWISCHENFAZIT ZUR LITERATUR .....	23
<b>3 FALLSTUDIEN ZUR RELEVANZ DES AGGREGATION BIAS</b> .....	<b>25</b>
3.1 EINLEITUNG .....	25
3.2 GENERIERUNG DER SYNTHETISCHEN DATEN.....	26
3.3 AUSWERTUNG.....	36
3.4 ZWISCHENFAZIT DER FALLSTUDIEN ZUR RELEVANZ DES AGGREGATION BIAS .....	40
<b>4 UMSETZUNG ZWEIER VERKEHRSMITTELWAHLMODELLE</b> .....	<b>42</b>
4.1 EINFÜHRUNG .....	42
4.2 WEITERENTWICKLUNG ZUM DISAGGREGIERTEN VERKEHRSMODELL HALLE ABM TOUR.....	44
4.3 IMPLEMENTIERUNG DES AGGREGIERTEN VERKEHRSMODELLS HALLE AGGR WEG .....	50
4.4 KALIBRIERUNG, VALIDIERUNG UND VERGLEICH DER BEIDEN VERKEHRSMODELLE.....	53
4.5 ZWISCHENFAZIT ZUR UMSETZUNG DER ZWEI VERKEHRSMITTELWAHLMODELLE .....	56
<b>5 ABSCHÄTZUNG DER WIRKUNG DES AGGREGATION BIAS</b> .....	<b>57</b>
5.1 EINLEITUNG UND DEFINITION DER VERKEHRSPLANERISCHEN MASSNAHMEN .....	57
5.2 MASSNAHME 1: ERHÖHUNG FAHRGESCHWINDIGKEIT VELO.....	58
5.3 MASSNAHME 2: EINFÜHRUNG PARKIERUNGSGEBÜHR INNENSTADT .....	59

5.4	MASSNAHME 3: EINFÜHRUNG 9-EURO-TICKET.....	61
5.5	ANALYSE DER MASSNAHMENWIRKUNGEN.....	63
5.6	ZWISCHENFAZIT ZUR ABSCHÄTZUNG DER WIRKUNG DES AGGREGATION BIAS.....	72
<b>6</b>	<b>DISKUSSION.....</b>	<b>73</b>
6.1	SYNTHESE DER ERGEBNISSE.....	73
6.2	BEURTEILUNG DES VORGEHENS.....	74
6.3	GRENZEN DES VORGEHENS.....	74
<b>7</b>	<b>GESAMTFAZIT.....</b>	<b>76</b>
7.1	SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	76
7.2	WEITERER FORSCHUNGSBEDARF.....	77
	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>78</b>
	<b>ANHANGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>81</b>

## Abbildungsverzeichnis

ABB. 1: BEISPIEL EINER WEGBASIERTEN ABFOLGE.....	14
ABB. 2: BEISPIEL EINER TOURENBASIERTEN ABFOLGE .....	15
ABB. 3: BEISPIEL EINER AKTIVITÄTENBASIERTEN ABFOLGE .....	18
ABB. 4: ILLUSTRATION DES AGGREGATION BIAS .....	19
ABB. 5: ANZAHL PERSONEN NACH RAUMTYP.....	27
ABB. 6: MOBILITÄTSWERKZEUGBESITZ NACH RAUMTYP (ABSOLUTE WERTE) .....	27
ABB. 7: MOBILITÄTSWERKZEUGBESITZ NACH RAUMTYP (RELATIVE WERTE) .....	28
ABB. 8: DURCHSCHNITTLICHE AUTOVERFÜGBARKEIT NACH EINKOMMENSKLASSEN UND RAUMTYP.....	28
ABB. 9: DURCHSCHNITTLICHER ÖV-ABONNEMENTSBESITZ NACH EINKOMMEN UND RAUMTYP.....	29
ABB. 10: AUSGANGSLAGE DER SZENARIEN FÜR DIE FALLBEISPIELE.....	31
ABB. 11: ELASTIZITÄT DER VERKEHRSMITTELWAHLANTEILE BEI DER REISEZEITREDUKTION DES ÖV-ANGEBOTS UM 10 % .	40
ABB. 12: AUFBAU DER BEIDEN ZU VERGLEICHENDEN VERKEHRSMITTELWAHLMODELLE .....	42
ABB. 13: ABLAUF ZUR IMPLEMENTATION DES VERBUNDABONNEMENTS .....	45
ABB. 14: MODELLPERIMETER UNTERTEILT IN BEZIRKE.....	47
ABB. 15: MODELLPARAMETER FÜR DIE VERKEHRSMITTELWAHL DER VHG MODESTU .....	49
ABB. 16: ABLAUF ZUR AGGREGATION DER NACHFRAGE .....	50
ABB. 17: VERGLEICH DER VERKEHRSMITTELANTEILE NACH VERKEHRSZWECK .....	54
ABB. 18: VERGLEICH DER MITTLEREN REISEWEITE NACH VERKEHRSMITTEL .....	55
ABB. 19: VERGLEICH DER SUMMENHÄUFIGKEIT DER WEGLÄNGEN NACH VERKEHRSMITTEL.....	55
ABB. 20: ERGÄNZUNG DER NUTZENFUNKTION FÜR DIE MASSNAHME 2 AM BEISPIEL DER VHG MODESTU.....	61
ABB. 21: ERGÄNZUNG DER NUTZENFUNKTION FÜR DIE MASSNAHME 3 AM BEISPIEL DER VHG MODESTU.....	63
ABB. 22: DICHTEDIAGRAMM DER VELO-WEGLÄNGEN MIT UND OHNE MASSNAHME 1 IM AGGREGIERTEN MODELL.....	64
ABB. 23: DICHTEDIAGRAMM DER VELO-WEGLÄNGEN MIT UND OHNE MASSNAHME 1 IM DISAGGREGIERTEN MODELL....	65
ABB. 24: BALKENDIAGRAMM DER VELO-WEGLÄNGEN NACH DISTANZKLASSEN IM DISAGGREGIERTEN MODELL .....	65
ABB. 25: MIV-ENTLASTUNG DER BEZIRKE AUFGRUND VON MASSNAHME 2 IM AGGREGIERTEN MODELL .....	66
ABB. 26: MIV-ENTLASTUNG DER BEZIRKE AUFGRUND VON MASSNAHME 2 IM DISAGGREGIERTEN MODELL.....	67
ABB. 27: DICHTEDIAGRAMM DER ÖV-WEGLÄNGEN MIT UND OHNE MASSNAHME 3 IM AGGREGIERTEN MODELL.....	69
ABB. 28: DICHTEDIAGRAMM DER ÖV-WEGLÄNGEN MIT UND OHNE MASSNAHME 3 IM DISAGGREGIERTEN MODELL .....	69
ABB. 29: BALKENDIAGRAMM DER ÖV-WEGLÄNGEN NACH DISTANZKLASSEN IM AGGREGIERTEN MODELL.....	70
ABB. 30: BALKENDIAGRAMM DER ÖV-WEGLÄNGEN NACH DISTANZKLASSEN IM DISAGGREGIERTEN MODELL.....	70
ABB. 31: VERGLEICH DER ABWEICHUNGEN DER VERKEHRSMITTELANTEILE ÖV AUFGRUND DER MASSNAHME 3 .....	72

## Tabellenverzeichnis

TAB. 1: DURCHSCHNITTLICHE MOBILITÄTSWERKZEUGBESITZQUOTEN NACH RAUMTYPEN .....	29
TAB. 2: KENNWERTE DER SZENARIEN .....	32
TAB. 3: VERWENDETE PARAMETER AUS DEM GVMB.....	32
TAB. 4: VERWENDETE KONSTANTEN FÜR DEN BEISPIELFALL 1.....	33
TAB. 5: VERWENDETE KONSTANTEN FÜR DEN BEISPIELFALL 2.....	34
TAB. 6: VERWENDETE KONSTANTEN FÜR DEN BEISPIELFALL 3.....	34
TAB. 7: RESULTATE FÜR DAS SZENARIO STADT .....	37
TAB. 8: RESULTATE FÜR DAS SZENARIO AGGLO .....	38
TAB. 9: RESULTATE FÜR DAS SZENARIO LAND .....	39
TAB. 10: ÜBERSICHT DES BESITZES EINES VERBUNDABONNEMENTS NACH EIGENSCHAFTEN .....	46
TAB. 11: VERWENDETE PARAMETER FÜR DIE VERKEHRSMITTELWAHL IM MODELL HALLE ABM TOUR .....	48
TAB. 12: AGGREGIERTE NACHFRAGE IN SECHS NACHFRAGESCHICHTEN .....	51
TAB. 13: VERWENDETE PARAMETER FÜR DIE VERKEHRSMITTELWAHL IM MODELL «HALLE AGGR WEG» .....	52
TAB. 14: VERGLEICH DER VERKEHRSMITTELANTEILE NACH TRIPS AUS DEN BEIDEN VERKEHRSMODELLEN .....	54
TAB. 15: VERKEHRSPLANERISCHE MASSNAHMEN .....	58
TAB. 16: HYPOTHESEN ZUR WIRKUNG VON MASSNAHME 1 .....	59
TAB. 17: HYPOTHESEN ZUR WIRKUNG VON MASSNAHME 2 .....	60
TAB. 18: HYPOTHESEN ZUR WIRKUNG VON MASSNAHME 3 .....	62
TAB. 19: VERKEHRSMITTELWAHLANTEILE BEI MASSNAHME 1 (WERTE GERUNDET).....	63
TAB. 20: VERKEHRSMITTELWAHLANTEILE BEI MASSNAHME 2 (WERTE GERUNDET).....	66
TAB. 21: VERKEHRSMITTELWAHLANTEILE DER MASSNAHME 3 (WERTE GERUNDET) .....	68
TAB. 22: VERÄNDERUNG DER AUFTRETENSWAHRSCHEINLICHKEIT VON WEGABFOLGEN IM ÖV UND FUSSVERKEHR.....	71
TAB. 23: ARBEITSJOURNAL DER MASTERARBEIT .....	83
TAB. 24: ÜBERSICHT ELEKTRONISCHE DOKUMENTATION .....	86

## Abkürzungsverzeichnis

<b>ABM</b>	Aktivitätenbasiertes Modell
<b>ABVMB</b>	Aktivitätenbasiertes Verkehrsmodell Basel
<b>ARE</b>	Bundesamt für Raumentwicklung
<b>COM</b>	Component Object Model
<b>CSV</b>	Comma-separated values
<b>DWV</b>	Durchschnittlicher Werktagsverkehr
<b>ETH</b>	Eidgenössische Technische Hochschule
<b>FHNW</b>	Fachhochschule Nordwestschweiz
<b>GVMB</b>	Gesamtverkehrsmodell Region Basel
<b>IV</b>	Individualverkehr
<b>IVT</b>	Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme
<b>MATSim</b>	Multi-Agent Transport Simulation
<b>MIV</b>	Motorisierter Individualverkehr
<b>MZMV</b>	Mikrozensus Mobilität und Verkehr
<b>NPVM</b>	Nationales Personenverkehrsmodell
<b>ÖV</b>	Öffentlicher Verkehr
<b>PTV Visum</b>	Planung Transport Verkehr Visum (Modellierungssoftware)
<b>SBB</b>	Schweizerische Bundesbahnen
<b>SIMBA MOBi</b>	Agentenbasiertes Verkehrsmodell der SBB
<b>SVI</b>	Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten
<b>VHG</b>	Verhaltenshomogene Gruppen

## Glossar

<b>Bezirk/Verkehrszelle/Zone:</b>	Ein (aggregiertes) Verkehrsmodell berechnet den Verkehr zwischen Einheiten, die als Bezirke, Verkehrszellen oder Zonen bezeichnet werden. Diese Einheiten werden als Start- und Zielpunkte von Ortsveränderungen angesehen.
<b>Grundmodell ABM Halle:</b>	Das aktivitätenbasierte Modell (ABM) der Stadt Halle, das mit der Modellierungssoftware PTV Visum mitgeliefert wird. Das ABM erzeugt für jede Person der simulierten Bevölkerung einen kompletten Tagesplan mit allen Aktivitäten und den zugehörigen Wegen.
<b>GVM Basel:</b>	Aggregiertes und wegbasiertes Gesamtverkehrsmodell für die Region Basel.
<b>Halle ABM Tour:</b>	Weiterentwicklung des disaggregierten und tourenbasierten Grundmodells ABM Halle für die Verwendung im Rahmen dieser Masterarbeit.
<b>Halle AGGR Weg:</b>	Auf Basis der Nachfrage des Modells Halle ABM Tour implementiertes, aggregiertes und wegbasiertes Verkehrsmittelwahlmodell. Es enthält das identische Netz und Infrastrukturangebot wie Halle ABM Tour.
<b>Kenngrösse:</b>	Beschreibt einen verkehrsspezifischen Wert für eine bestimmte Beziehung, z. B. die Reisezeit zwischen zwei Bezirken oder den Fussverkehrsanteil am Gesamtverkehr.
<b>Nachfrage/-Schicht:</b>	Beschreibt einen Weg zwischen Quell- und Zielbezirken von Personen oder Fahrzeugen. Die Verkehrsnachfrage ist der Überbegriff für die Summe aller Wege zwischen den verschiedenen Bezirken. Liegt die Nachfrage nur für einen Verkehrszweck vor (z. B. Wohnort-Arbeiten), so entspricht das einer Nachfrage-schicht.
<b>Verfahrensablauf:</b>	Ein Verfahrensablauf in PTV Visum dient dazu, mehrere Arbeitsschritte nacheinander auszuführen. Beispiele für Verfahren eines Verfahrensablaufs: Öffnen von Dateien, Berechnen von Ergebnissen, Speichern von Ergebnissen etc.
<b>Verkehrsmittelanteile:</b>	Verkehrsmittelanteile (auch Modal Splits) beschreiben die Anteile der verschiedenen Verkehrsmittel am Gesamtverkehr in einem bestimmten Gebiet, in einem definierten Zeitraum und in einer festgelegten Einheit wie etwa Wege.

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Das Gesamtverkehrsaufkommen hat im letzten Jahrhundert enorm zugenommen. Bis heute leiden wir unter diesem anhaltenden Wachstum und den damit einhergehenden Verkehrsproblemen – Stau, Unfälle, Emissionen, um nur einige zu nennen. Mit einer abgestimmten Gesamtverkehrsplanung wird seither versucht, diesen Problemen entgegenzuwirken. Entsprechend hoch war die Nachfrage nach Analysewerkzeugen zur Verkehrsmodellierung. Die technische Entwicklung Mitte der 1970er-Jahre (Ortúzar S. und Willumsen 2011) hat dazu beigetragen, Verkehrsmodelle als wichtiges Werkzeug für Verkehrsplanerinnen und Verkehrsplaner zu etablieren.

Das 4-Stufen-Modell stellt dabei den am häufigsten verwendeten Modelltyp zur Berechnung der Verkehrsprognose dar. Der traditionelle 4-Stufen-Ansatz zur *aggregierten und wegbasierten Modellierung* der Verkehrsnachfrage wird weltweit seit über 50 Jahren erfolgreich und intensiv von Unternehmen, Institutionen, Behörden und Forschungseinrichtungen verwendet. Mit der zunehmenden Anwendung sind neuen Fragestellungen hinzugekommen. Nicht alle Fragestellungen konnten mit den Modellen beantwortet werden, und die Grenzen des 4-Stufen-Ansatzes wurden mit zunehmendem Einsatz offenkundig. Die Kritikpunkte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Methodik des 4-Stufen-Ansatzes ist in politischen Entscheidungen schwierig zu kommunizieren (Vitins u. a. 2021).
- Der 4-Stufen-Ansatz bildet reale Verhaltensmuster bei zunehmender Komplexität des Mobilitätsverhaltens aufgrund der geringen Flexibilität des Ansatzes nur mangelhaft ab (Rasouli und Timmermans 2014).
- Die vier Stufen werden innerhalb des Ansatzes als konzeptionell unabhängig und isoliert betrachtet. In der Realität sind die vier Stufen jedoch stark miteinander verflochten.
- Aufgrund der Verwendung von Zonenmittelwerten in den jeweiligen Verhaltensmodellen kommt es bei den zugehörigen Auswahlwahrscheinlichkeiten zu einer Unter- oder Überschätzung des personenspezifischen Nutzens. Diese Eigenschaft wird in der Literatur als *Aggregation Bias* bezeichnet.

Daraus ergibt sich ein beträchtliches Entwicklungspotenzial für Verkehrsmodelle (Rasouli und Timmermans 2014). In den vergangenen Jahrzehnten hat man darum einen zunehmenden Bedarf für die Weiterentwicklung von Verkehrsmodellen erkannt, die die Abhängigkeiten verschiedener Wege über den Tagesverlauf und deren zeitliche Dynamik besser abbilden können. Diese Erkenntnis hat zur Entwicklung neuer, *disaggregierter und tourenbasierter Modelle* geführt, den sogenannten aktivitätenbasierten Modellen (ABM) (Castiglione u. a. 2015). Die Ansätze, wie die beiden Modellarten die Verkehrsmittelwahl berechnen, unterscheiden sich deutlich. In dieser Masterarbeit soll am Beispiel eines solchen ABM die Relevanz der Unterschiede zwischen aggregierten und wegbasierten sowie disaggregierten und tourenbasierten Verkehrsmittelwahlansätzen eruiert und abgeschätzt werden. Dabei steht der soeben genannte *Aggregation Bias* im Vordergrund.

Der Verwendung eines ABM in Rahmen dieser Masterarbeit gingen verschiedene Arbeiten voraus. So baut die vorliegende Masterarbeit auf den vorhergehenden Vertiefungsprojekten 1 und 2 sowie einer Seminararbeit auf. Im Rahmen der Seminararbeit (Cachaco 2021) wurde eine aus dem aktivitätenbasierten Verkehrsmodell Basel (ABVMB) existierende synthetische Bevölkerung und eine aktivitätenbasierte Verkehrsnachfrage mittels Python-Skripten in das von der Verkehrsmodellierungssoftware PTV Visum vorgegebene Datenmodell überführt. Das Vertiefungsprojekt 1 (Cachaco 2022a) fokussierte sich darauf, die Netzdaten (Strecken, Knoten, ÖV-Angebot etc.) für ein aktivitätenbasiertes Verkehrsmodell aufzubereiten und diese ebenfalls in PTV Visum zu integrieren. Im Vertiefungsprojekt 2 (Cachaco 2022b) wurden Python-Skripte aus Grundmodell ABM Halle (vereinfachtes Verkehrsmodell der deutschen Stadt Halle) von PTV Visum für den Anwendungsfall Basel weiterentwickelt. Dabei war es nötig, die Implementierung von Touren und Trips zu ergänzen sowie eine systematische Überprüfung der Kenngrößen für die Reisezeiten mit ÖV, MIV und Velo vorzunehmen. In beiden Fällen wurden Python-Skripte für die spezifische Verwendung im ABM Basel weiterentwickelt. Aufgrund der Komplexität der Modellentwicklung und der bei Verwendung der verfügbaren Fahrplandaten sehr hohen Rechenzeiten für die ÖV-Routensuche wird auf die Weiterführung des ABM Basel verzichtet und für die Masterarbeit stattdessen das ABM Halle verwendet.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel der Masterarbeit ist es, die Relevanz von weg- und tourenbasierten Verkehrsmittelwahlansätzen am Beispiel eines aggregierten und eines aktivitätenbasierten Verkehrsmodells zu analysieren. Dazu werden die folgenden Punkte verfolgt:

1. Qualitative Beschreibung der Wirkungsweise verschiedener Ansätze zur Modellierung der Verkehrsmittelwahl:
  - a. Aggregierter (Verkehrsmengen zwischen Zonen) und disaggregierter (einzelne Personen zwischen Zonen) Ansatz
  - b. Wegbasierter und tourenbasierter Ansatz
2. Quantitative Abschätzung der Relevanz des Aggregation Bias im Rahmen von Fallstudien
3. Weiterentwicklung des disaggregierten und Implementierung eines aggregierten Verkehrsmittelwahlmodells auf Basis des ABM Halle.
4. Einfache Kalibrierung des Verkehrsmittelwahlmodells.

Im Zentrum der Masterarbeit steht die Beantwortung der folgenden Forschungsfrage anhand der zwei implementierten Pilotmodelle:

*Wie wirkt sich ein touren- und personenbasierter, disaggregierter Ansatz zur Verkehrsmittelwahl im Vergleich zu einem wegbasierten, aggregierten Ansatz auf die Abschätzung der Wirkung bestimmter verkehrsplanerischer Massnahmen aus?*

### 1.3 Vorgehen

Die Masterarbeit ist in fünf Arbeitspakete gegliedert. Jedes trägt zur Beantwortung der Forschungsfrage bei. Im ersten Arbeitspaket (Kapitel 2) erfolgt die Literaturanalyse zum Aggregation Bias und zur Nutzenfunktionen für die Verkehrsmittelwahl. Das Arbeitspaket schliesst mit einem Zwischenfazit, das einerseits zusammenfasst, wie beide Aspekte aus theoretischer Sicht in den verschiedenen Modellarten betrachtet und umgesetzt werden, und andererseits zeigt, wie beide Aspekte in der aktuellen Praxis berücksichtigt werden.

Im zweiten Arbeitspaket (Kapitel 3) wird anhand von Fallstudien das Ausmass des Aggregation Bias aufgezeigt. Dazu wird zunächst ein synthetischer Datensatz generiert, der mittels skriptbasierter Szenarien analysiert wird. Ziel ist es, ein erstes Verständnis zum Ausmass des Aggregation Bias zu erhalten. Im Zwischenfazit wird abgeleitet, welche Erkenntnisse für die Umsetzung auf Ebene von Verkehrsmittelwahlmodellen zu berücksichtigen sind.

Als drittes und zentrales Arbeitspaket (Kapitel 4 und 5) erfolgt die eigentliche Abschätzung der Wirkung des Aggregation Bias auf Basis von zwei entwickelten Verkehrsmodellen. Dazu wird in einem ersten Schritt das Verkehrsmittelwahlmodell aus dem ABM Halle dahingehend weiterentwickelt, dass die Verkehrsmittelwahl aufgrund der Verfügbarkeit von Mobilitätswerkzeugen und aufgrund der jeweiligen abgeleiteten generalisierten Kosten erfolgt. Dazu werden die personengruppenspezifischen Nutzenfunktionen überarbeitet. Die disaggregierte Nachfrage im Modell Halle ABM Tour (welche in Form von Trips vorliegt) wird in einem weiteren Schritt nach Verkehrszwecken aggregiert und in ein neues Modell mit identischen Netzdaten überführt. Auf Basis der vorhergehend überarbeiteten Nutzenfunktionen wird als nächster Schritt ein aggregiertes Verkehrsmittelwahlmodell abgeleitet. Als Resultat liegen zwei Verkehrsmodelle vor. Ein disaggregiertes und tourenbasiertes Verkehrsmittelwahlmodell, das fortan Halle ABM Tour genannt wird, und ein aggregiertes und wegbasiertes Verkehrsmodell, das Halle AGGR Weg genannt wird. Als letzter Schritt des Arbeitspakets erfolgt die Abschätzung der Wirkung des Aggregation Bias. Dazu werden ein Analysekonzept und drei verkehrsplanerische Massnahmen definiert. Darauf aufbauend erfolgt die Berechnung und Analyse der Massnahmenwirkung.

Im letzten Arbeitspaket werden die gesammelten Erkenntnisse in einem Gesamtfazit diskutiert und bewertet sowie weiterer Forschungsbedarf abgeleitet.

## 2 Literatur

### 2.1 Ansätze der Verkehrsmodellierung

Ein Modell ist eine vereinfachte Darstellung eines Teils der realen Welt. Ein Verkehrsmodell beschränkt sich auf bestimmte Elemente wie Personen, Güter oder Fahrzeuge. Diese Elemente werden unter bestimmten Gesichtspunkten als wichtig angesehen und bilden daher den Gegenstand der Modellierung. Der überwiegende Teil aller Modelle ist problemspezifisch. Allen Modellen liegt zugrunde, dass sie basierend auf zuvor erhobenen oder geschätzten Daten versuchen, die komplexen realen Gegebenheiten in Bezug auf das Problem zu replizieren. Es ist daher von zentralem Interesse, wie und mit welchem Mass an Aggregation die Daten erhoben oder geschätzt werden. Wenn das Modell darauf abzielt, wie im Fall der aggregierten Modelle das Verhalten von mehr als einer Person darzustellen (z. B. von einem Bevölkerungssegment wie Autobesitzerinnen und Autobesitzer, die in einer Zone leben), ist ein gewisses Mass an Aggregation der Daten unvermeidlich. Wenn das Modell jedoch versucht, das Verhalten von Einzelpersonen darzustellen, wie dies bei den disaggregierten Modellen der Fall ist, ist es möglich, dass Informationen für jeden Reisenden separat erhoben und verwendet werden.

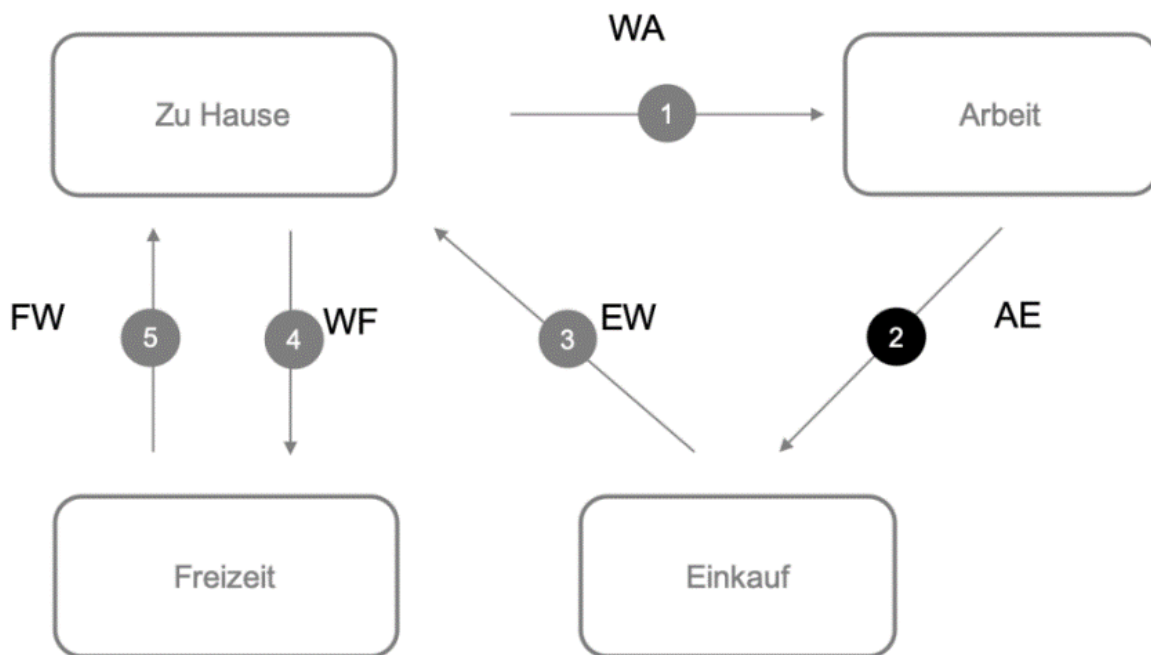
Bis in die späten 1970er-Jahre wurden für Verkehrsstudien aggregierte Modelle verwendet. Sie haben die Eigenschaft, ein erprobtes Rezept für den gesamten Modellierungsprozess zu bieten – von der Datenerfassung bis zur Erstellung von Prognosen auf der Ebene der Verbindungen in einem Netz (Ortúzar S. und Willumsen 2011). Disaggregierte Modelle, also Modelle, die nicht mehr Verkehrsmengen, sondern Einzelpersonen zwischen Zonen betrachten, erfreuen sich seit den 1980er-Jahren immer grösserer Beliebtheit, bieten sie doch erhebliche Vorteile (vgl. Kapitel 1.1) gegenüber den aggregierten Modellen und sind in vielen Anwendungsfällen praktikabel. Eine grosse Herausforderung in der Praxis besteht jedoch darin, dass sie der Modelliererin und dem Modellierer ein recht hohes Mass an statistischen und ökonomischen Kenntnissen abverlangen. Dies gilt insbesondere für die Interpretation der Ergebnisse. Das im Rahmen dieser Masterarbeit verwendete ABM Halle stellt ein solches disaggregiertes Modell dar.

Neben den verschiedenen Modellarten sind innerhalb der Modelle eines Typs bei der Verkehrsmittelwahl mehrere Ansätze zu finden. In Vitins u. a. (2021) werden weg-, touren- und aktivitätenbasierte Modelle verglichen. Dabei erfolgt bei wegbasierten Modellen die Verkehrsmittelwahl, wie es schon der Name vermuten lässt, auf Basis einzelner Wege. Wegbasierte Modelle bestimmen die Ortsveränderungen zwischen zwei Verkehrszellen, ohne dabei die Information der einzelnen Ortsveränderung bei Wegketten der betreffenden Personen zu berücksichtigen (vgl. Abb. 1). Allgemein werden die Wege in zwei Typen eingeteilt:

- Typ 1 (wohnbasiert): Der Wohnort ist entweder Start- oder Zielort.
- Typ 2 (nicht wohnbasiert): Der Wohnort ist weder Start- noch Zielort.

Die wegbasierten Modelle können für wohnortbasierte Wege (Typ 1) recht gute Resultate und Prognosen abgeben. Nicht berücksichtigt werden die Abhängigkeiten der einzelnen Wege untereinander. In der Realität weisen die Wege jedoch Abhängigkeiten zueinander auf. Die wegbasierten Modelle verwenden zudem bei nicht wohnortbasierten Wegen (Typ 2) nur Mittelwerte der betroffenen Quell- und Zielzonen für die Verkehrsmittelwahl. Weg 2 im Abb. 1 stellt einen nicht wohnortbasierten Weg (Typ 2) dar.

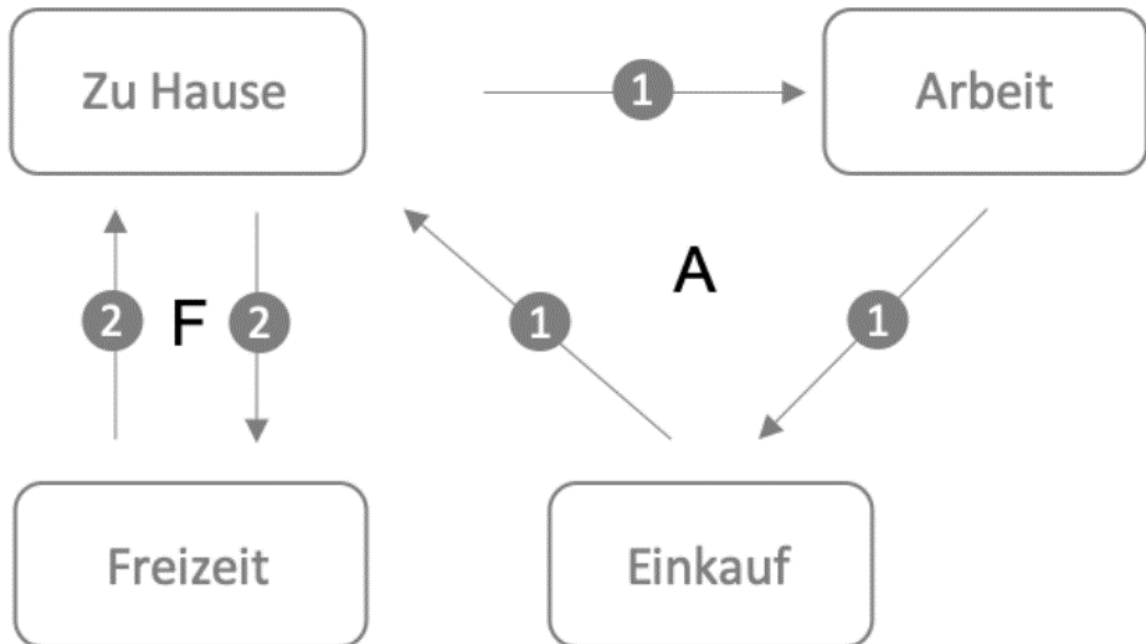
Abb. 1: Beispiel einer wegbasierten Abfolge



Quelle: Vitins u. a. 2021

Demgegenüber stehen die tourenbasierten Modelle, welche die gesamte Tour – eine Tour besteht aus mindestens zwei Wegen – einer Person vom Verlassen der Wohnung bis zur Rückkehr mit allen zugehörigen Wegen betrachten. In tourenbasierten Modellen erfolgt die Modellierung auf Ebene solcher Touren, was konkret bedeutet, dass jeder Tour eine Hauptaktivität zugeordnet wird (vgl. Abb. 2). Erfolgen innerhalb der Tour weitere Aktivitäten, so werden zusätzliche Orte auf Basis der Lage der Hauptaktivität zugewiesen. Die tourenbasierten Modelle bilden Ziel- und Verkehrsmittelwahl im Kontext der gesamten Aktivitätenkette nach. Aufgrund der genaueren Beschreibung des Verkehrsverhaltens fällt der Informationsverlust deutlich geringer aus als bei wegbasierten Modellen.

Abb. 2: Beispiel einer tourenbasierten Abfolge



Quelle: Vitins u. a. 2021

Touren- wie wegbasierte Modelle zählen beide zur Klasse der statischen Modelle. Diese Modelle berücksichtigen keine zeitliche Veränderung (Friedrich u. a. 2019). Die im nachfolgenden Kapitel 2.2 beschriebenen aktivitätenbasierten Modelle erweitern den tourenbasierten Ansatz um die zeitliche Komponente. Sie werden daher auch dynamische Modelle genannt.

## 2.2 Aktivitätenbasierte Modelle

### 2.2.1 Ursprung

Die Geschichte der aktivitätenbasierten Verkehrsmodelle beginnt bereits in den 1970er-Jahren. Entgegen den Erwartungen entspringt die Idee dazu nicht aus der Verkehrsplanung, sondern aus räumlichen Analysen zum Einkaufsverhalten (Rasouli und Timmermans 2013). Seit Jahrzehnten beschäftigen sich Wissenschaftler aus den Bereichen Marketing, Stadtplanung und Verkehrsplanung mit der Formulierung, Entwicklung und Anwendung mathematischer Modelle des räumlichen Einkaufsverhaltens. Diese Modelle dienen vordergründig der Prognostizierung der Anzahl der Besucher von Geschäften oder Einkaufszentren. Die räumliche Analyse der Einkaufszentren erfolgte in Abhängigkeit verschiedener Kriterien und Kennwerte wie Marketingaufwand, Zeit, Entfernung von zu Hause oder Kosten, die mit dem Erreichen alternativer Einkaufsziele verbunden sind. Die Modelle schätzten darüber hinaus auch die Gesamtzahl der Einkaufsfahrten zwischen Ausgangs- und Zielort und zeigten damit die Gesamtmobilität auf.

Die damaligen Studien verfolgten drei Ziele: Erstens fassten die mathematischen Gleichungen die funktionalen Beziehungen zwischen dem räumlichen Einkaufsverhalten und den Merkmalen konkurrierender Einkaufsziele zusammen und trugen so dazu bei, dass wir immer besser verstehen, wie Einzelpersonen und Haushalte ihre Einkäufe in Zeit und Raum organisieren. Zweitens wurden diese Modelle in Durchführbarkeits- und Folgenabschätzungsstudien eingesetzt, um die Auswirkungen von Stadtplanungs- und Marketingmassnahmen auf die Wahrscheinlichkeit der Kaufentscheidung und die Marktanteile vorherzusagen. Diese Schätzungen wiederum wurden verwendet, um die wirtschaftliche Tragfähigkeit neuer grossflächiger Einkaufszentren zu bewerten und um die Auswirkungen solcher neuen Entwicklungen auf die bestehenden Einkaufszentren vorherzusagen. Drittens wurden diese Modelle zur Prognose der Verkehrsströme und der Auswirkungen neuer Einzelhandelsentwicklungen auf die Verkehrsnachfrage im Ganzen eingesetzt.

Die dabei beschriebenen Anziehungs- bzw. Gravitationsmodelle als auch die grundlegenden *Discrete-Choice-Modelle* gehen davon aus, dass Einkaufsfahrten nur einen einzigen Zweck verfolgen und nur eine einzige Station umfassen. Es wird angenommen, dass die Kundinnen und Kunden ein Einkaufszentrum von zu Hause aus für einen bestimmten Zweck auswählen und nach dem Einkauf wieder nach Hause zurückkehren. Darüber hinaus werden Sachzwänge (z. B. das Verkehrsangebot) und zeitliche Aspekte überhaupt nicht berücksichtigt. Seit Mitte der 1990er-Jahre hat man erkannt, dass das Einkaufsverhalten in Wirklichkeit viel komplexer ist. Die Wahl des Einkaufszentrums kann vom Wochentag, der Tageszeit oder den verfügbaren Verkehrsmitteln abhängen. Wie jede andere Tätigkeit ist auch das Einkaufen auf der Ebene des Haushalts zeitlich und räumlich organisiert. So sind die Entscheidungen für den Einkauf kontextabhängig und werden als Teil eines täglichen oder sogar wöchentlichen Terminkalenders geplant. Einkaufsfahrten können von anderen Orten als dem Wohnort ausgehen, mehrere Stationen umfassen und mit anderen Aktivitäten kombiniert werden.

Beim Versuch, diese Komplexität zu beschreiben, formulierten Arentze und Timmermans (2001) ein Mehrzweck- und Mehrfach-Stationen-Modell. Zunächst wurden die Wahlwahrscheinlichkeiten für einen bestimmten Zweck als Funktion individueller und angebotsabhängiger Komponenten mithilfe eines verschachtelten Logit-Modells vorhergesagt. Wie auch bei anderen Modellen wurde der Nutzenwert der Entfernung vom Zweck der Reise abhängig gemacht. Dieser tätigkeits- bzw. aktivitätenbasierte Ansatz hat in letzter Zeit vor allem in der Verkehrs- und Zeitnutzungsforschung viel Aufmerksamkeit erhalten und findet sich in der Entwicklung der aktivitätenbasierten Modellen wieder.

Immer mehr Wissenschaftler aus den Nachbardisziplinen Geografie, Stadtplanung etc. sprachen sich ab den 1990er-Jahren für die Entwicklung von aktivitätenbasierten Verhaltensmodellen aus. Sie sollten die aggregierten räumlichen Interaktionsmodelle ersetzen, die seit den 1950er-Jahren bis heute in der akademischen und angewandten Forschung dominieren (Vitins u. a. 2021). Jones, Dix, Clarke und Heggie entwickelten 1983 Aktivitätsketten und Tagespläne (Jones u. a. 1985). Zusammen mit verschiedenen demografischen und sozioökonomischen Attributen wie Alter, Geschlecht, Bildungsstand, Nationalität, Einkommen und Verfügbarkeit von Mobilitätswerkzeugen (Auto, Velo und ÖV-Abonnemente) bilden sie die Hauptbausteine eines ABM.

## 2.2.2 Anwendung in der Schweiz

In der Schweiz fanden aktivitätenbasierten Modelle zunächst in der Forschung Anwendung. Für die Verwendung in Forschungsprojekten und für die Weiterentwicklung der MATSim-Software wurden am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich aktivitätenbasierte Nachfragemodelle entwickelt und nach Bedarf aktualisiert. Der Code zur Erstellung des aktivitätenbasierten Verkehrsmodells MATSim Schweiz ist öffentlich verfügbar<sup>1</sup>. Im Rahmen eines Pilotprojekts zwischen den SBB, der ETH Zürich und den Beratungsunternehmen ASE und Erveco wurde für die trinationale Region Basel ein prognosefähiges, aktivitätenbasierten Verkehrsmodell (ABVM Basel) entwickelt<sup>2</sup>. Daneben haben die SBB ein eigenes aktivitätenbasiertes Verkehrsmodell unter dem Namen SIMBA MOBi aufgebaut, das die gesamte Schweiz abdeckt. Das Modell wird von den SBB in Ergänzung zum dort bestehenden, monomodalen Verkehrsmodell für die Simulation von multimodalen und intermodalen Verkehrskonzepten eingesetzt (Scherr, Manser und Bützberger 2020). Eine weitergehende Beschreibung der Verwendung von aktivitätenbasierten Modellen in der Praxis wird im Rahmen dieser Masterarbeit nicht angestrebt. Weiterführende Informationen dazu finden sich im SVI-Forschungsbericht von Vitins u. a. (2021).

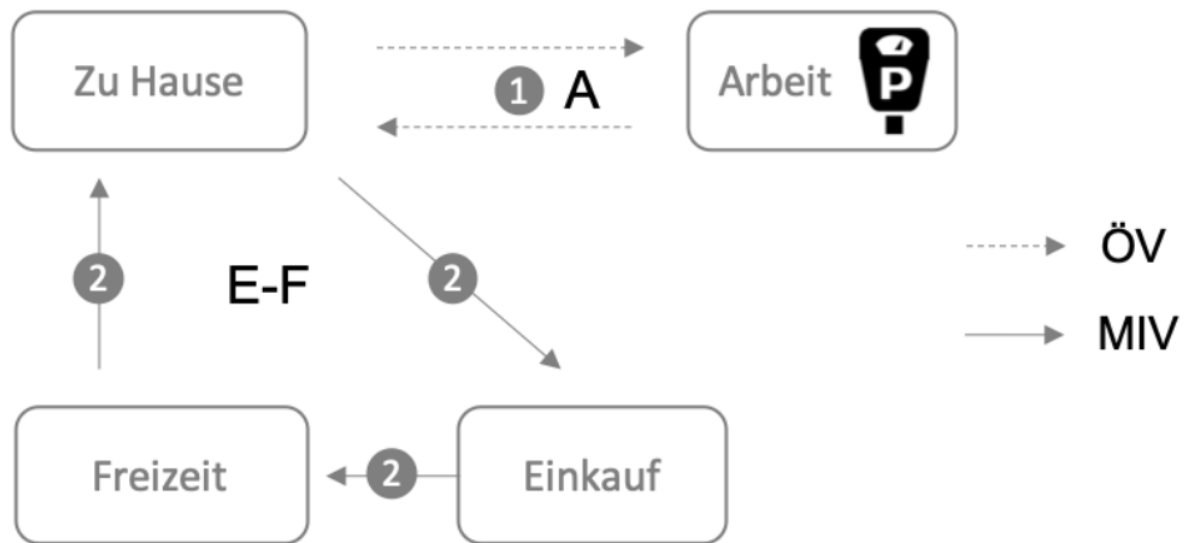
## 2.2.3 Ansatz von aktivitätenbasierten Modellen (ABM)

Die Modellierung des Verkehrs erfolgt bei ABM auf der Ebene einzelner Personen (sogenannter Agenten). Die Agenten verfügen über verschiedene Merkmale (Hauptaktivitäten, Sekundäraktivität, Touren etc.), die sich das Modell zunutze macht. Anzahl, Dauer und Abfolge der Aktivitäten werden durch das Modell bestimmt. Hauptaktivitäten umfassen in der Regel Arbeit und Ausbildung, während Einkaufen, Freizeit und sonstige Aktivitäten zu den Sekundäraktivitäten zählen. Dieser allgemeinere Ansatz basiert auf der Annahme, dass Einkaufsaktivitäten in den Tagesablauf von Einzelpersonen und Haushalten passen sollten und somit mit anderen obligatorischen Aktivitäten konkurrieren.

<sup>1</sup>[https://github.com/matsim-eth/baseline\\_scenario](https://github.com/matsim-eth/baseline_scenario)

<sup>2</sup><https://www.fhnw.ch/de/die-fhnw/hochschulen/architektur-bau-geomatik/institute/institut-bauingenieurwesen/forschung/verkehr-und-mobilitaet/machbarkeitsstudie-matsim-basel>

Abb. 3: Beispiel einer aktivitätenbasierten Abfolge



Quelle: Vitins u. a. 2021

Ziel dieser aktivitätenbasierten Modelle ist es, gleichzeitig vorherzusagen, welche Aktivitäten wo, mit wem, wann und wie lange ausgeübt werden und welche Verkehrsmittel dafür gewählt werden. Damit gehen weitreichende Auswertungsmöglichkeiten einher. Durch das Modellieren der Aktivitäten jeder Einzelperson im Tagesablauf können etwa auch Verhaltensreaktionen auf verkehrliche Massnahmen abgebildet werden, welche sich nicht nur auf die zurückgelegten Wege, sondern auch auf die Abfolge und Anzahl der Aktivitäten beziehen, wie die im Beispiel der Abb. 3 dargestellte Veränderung der Wegabfolge aufgrund der Einführung einer Parkgebühr. Ebenso bieten aktivitätenbasierte Ansätze die Grundlage für agentenbasierte Verkehrssimulationen mit denen dynamische Verkehrsangebote wie Velo- und Autoverleihsysteme besser untersucht werden können.

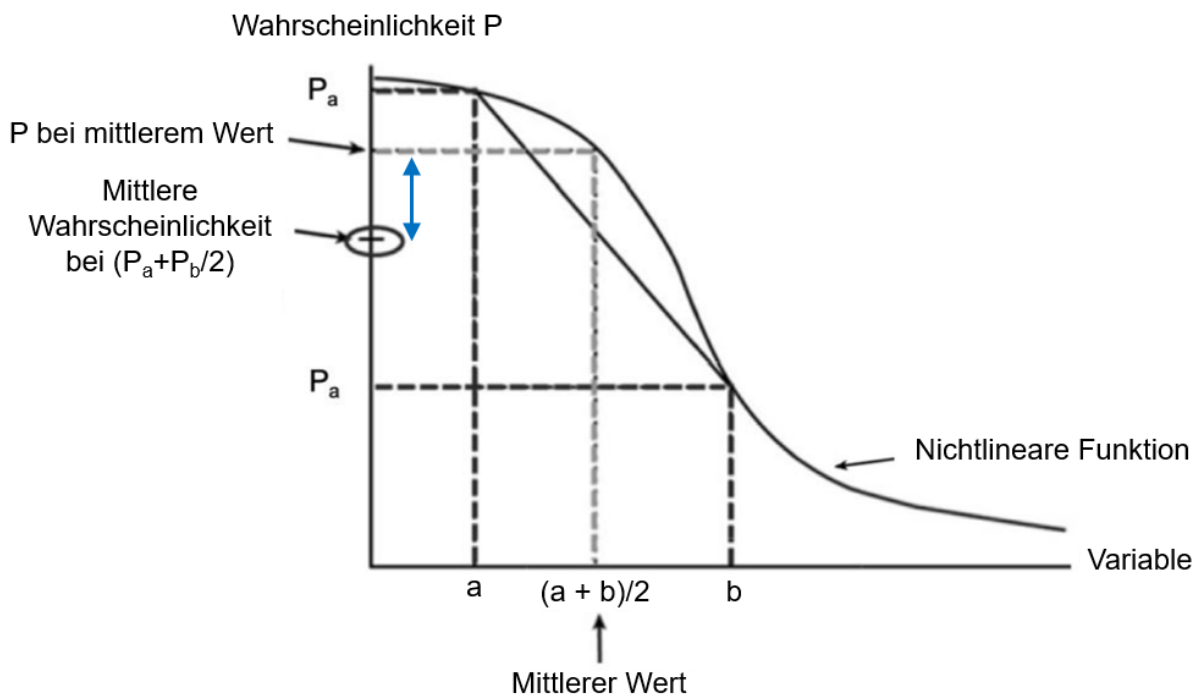
### 2.3 Aggregation Bias

Aus räumlicher Sicht verstehen wir unter Aggregation die *Summierung numerischer Werte zu einem grösseren geografischen Merkmal aus einem kleineren Merkmal*. Bei aggregierten Modellen zählen die Strukturdaten der Verkehrszellen (Bevölkerungsdichte, Arbeitsplätze, Verkehrsmittelwahlanteile etc.) als verkehrsverhaltensbestimmende Einflussgrössen. Werden die Verkehrsmittelanteile mehrerer Personen (kleinere Merkmale) für eine Verkehrszelle (grösseres geografisches Merkmal) gemittelt bzw. aggregiert, so entsteht eine Verzerrung, der sogenannte *Aggregation Bias*. In dieser Masterarbeit wird bei der Untersuchung des Aggregation Bias der Fokus auf die Verkehrsmittelwahl gelegt.

In aggregierten Modellen werden bei Verkehrsmittelwahlmodellen räumliche und soziodemografische Variablen in der Regel nur je Verkehrszelle gemittelt verwendet. Dies hat zur Folge, dass

in den jeweiligen Verhaltensmodellen nur Zonenmittelwerte (lineare Mittelwerte) verwendet werden. Im Gegensatz dazu liegen den Entscheidungsmodellen in der Regel nichtlineare Funktionen (z. B. Logit-Funktion) zugrunde, die auf die Mittelwerte der Verkehrszellen zurückgreifen. Bei der Anwendung dieser Funktionen auf Auswahlwahrscheinlichkeiten für die einzelnen Personen entstehen dabei Unterschiede, wie die folgende Abb. 4 zeigt.

Abb. 4: Illustration des Aggregation Bias



Quelle: In Anlehnung an Vitins u. a. 2021

Die Personen a und b besitzen, wie in Abb. 4 auf der horizontalen Achse dargestellt, jeweils zwei Werte einer entscheidungsrelevanten Variable (Inputvariable). Gemäss der nichtlinearen Logit-Funktion zeigen die dunkelschwarzen, gestrichelten Linien die zugehörigen Auswahlwahrscheinlichkeiten für die einzelnen Personen an ( $P_a$  und  $P_b$ ). In einem aggregierten Modell kann, wie eingangs beschrieben, anstatt des personenspezifischen Entscheids nur der entsprechende Mittelwert berücksichtigt werden. Wie die Abbildung zeigt, ergibt sich aufgrund des Mittelwerts (z. B. eines Zonenmittelwertes) bei der resultierenden Auswahlwahrscheinlichkeit gegenüber dem zunächst personenspezifischen berechneten und dann gemittelten Wert ein Unterschied (blauer Pfeil). Diese Differenz wird in der Literatur als *Aggregation Bias* bezeichnet.

Bei niedrigen Wahlwahrscheinlichkeiten wird die mit dem durchschnittlichen repräsentativen Nutzen bewertete Wahrscheinlichkeit (P bei mittlerem Wert) gegenüber der Durchschnittswahrscheinlichkeit ( $P_a + P_b/2$ ) unterschätzt, bei hohen Wahlwahrscheinlichkeiten wird sie überschätzt. Das Logit-Modell reagiert am empfindlichsten (hohe Elastizität) auf Änderungen der Inputvariablen (a und b) in seinem mittleren Bereich. Am oberen und unteren Ende reagiert es in Relation

dazu weniger empfindlich (tiefe Elastizität) auf Änderungen der Inputvariablen. Dies ist gemäss Castiglione u. a. (2015) einer der Gründe, warum einige aggregierte Modelle grössere Verzerrungen als Reaktion auf Änderungen der Inputvariablen erzeugen als disaggregierte Modelle.

### 2.3.1 Typen der Aggregation

Es gibt verschiedene Methoden, räumliche Daten zu aggregieren. Diese Methoden wurden in einer umfassenden Dissertation von Koppelman (1975) untersucht und durch Ben-Akiva, und Lerman (1985) typisierend zusammengefasst. Die beiden Autoren definieren fünf allgemeine Typen von Aggregationsverfahren, wobei einige als Spezialfälle der anderen betrachtet werden können. Die Methoden zur Aggregation der räumlichen Daten über Einzelpersonen unterscheiden sich aufgrund der benötigten Daten und der Genauigkeit der Vorhersage. Für Modellanwenderinnen und Modellanwender besteht das Ziel darin, eine Methode zu finden, welche die beste Kombination aus einer möglichst hohen Genauigkeit und einer möglichst kleinen benötigten Datenmenge für eine bestimmte Prognosesituation bietet. Die fünf Verfahren und ein kurzer Beschrieb zu ihren jeweiligen Annahmen sind nachfolgend aufgeführt:

1. **Durchschnittsperson:** Dieses Verfahren konstruiert eine Durchschnittsperson für die Grundgesamtheit und verwendet die Wahlwahrscheinlichkeit für dieses Durchschnittsindividuum als Näherungswert.
2. **Klassifizierung:** Dieses Verfahren unterteilt die Bevölkerung in nahezu (verhaltens-)homogene Untergruppen mit unterschiedlichen Grössen und verwendet die Wahlwahrscheinlichkeit von Durchschnittspersonen aus den einzelnen Untergruppen.
3. **Statistische Differenziale:** Dieses Verfahren approximiert die Verteilung von Attributen in der Bevölkerung durch ihre Gewichtung bzw. Hebelwirkung und verwendet diese Hebel als Annäherung.
4. **Explizite Integration:** Dieses Verfahren stellt die Verteilung der Attribute in der Bevölkerung mit einer analytisch geeigneten kontinuierlichen Verteilung dar.
5. **Stichprobenerhebung:** Dieses Verfahren verwendet eine Stichprobe, um die gesamte Bevölkerung zu repräsentieren.

Jedes einzelne oder eine Kombination dieser Verfahren reduziert das Problem des Aggregation Bias, indem es einige vereinfachende Annahmen über das Wahlmodell, die Bevölkerung oder beides trifft und damit die Ausgangsdatenbasis erweitert. Für weiterführende Informationen seien Leser:innen auf Kapitel 6 von Ben-Akiva und Lerman (1985) verwiesen.

## 2.4 Nutzenfunktion

Die Nutzenfunktion beschreibt das Konzept eines rationalen Verhaltens als mathematische Funktion zum Nutzen einer Wahlalternative. Wenn bspw. eine Person die Charakteristika der Alternativen kennt (Funktionsbeschrieb), wählt diese vernünftigerweise die Alternative, die ihr den höchsten Nutzen ermöglicht («rationale Wahl»). Dies ist die bekannte Annahme der Nutzenmaximierung des *homo oeconomicus* (Kirchgässner 2013). Dabei wird vorausgesetzt, dass die gewählte

Alternative in der Menge aller Alternativen liegt. Für Verkehrsmodelle werden Nutzenfunktionen je nach Verkehrsmittel und Verkehrszweck unterschiedlich aufgestellt. Die Nutzenfunktion ermöglicht den Vergleich der Charakteristika der Alternativen und deren gegenseitige Kompensation.

### 2.4.1 Nutzenkomponente

Die Nutzenfunktion besteht aus einer deterministischen Nutzenkomponente, die die Beziehung der beobachtbaren Charakteristika der Alternativen und der sozioökonomischen Charakteristika einer Person oder verhaltenshomogenen Gruppe beschreibt. Die stochastische Nutzenkomponente, auch Störgrösse oder Störterm genannt, repräsentiert hingegen einen vom Modellierenden nicht erfassbaren Einfluss, der als Differenz zwischen dem wahren Nutzen  $U$  und dem erfassten Nutzen  $\bar{U}$  verstanden werden kann (Train 2003). Der Nutzen wird über folgende Gleichung beschrieben:

$$U_{ij} = \alpha_{ij} + \beta_{ij} \times X_{ij} + \dots + \beta_{nij} \times X_{nij} + \varepsilon_{ijn}$$

$U_{ij}$  = Nutzen der Alternative  $i$  für die Person/VHG  $j$

$\alpha_{ij}$  = Konstante

$\beta_{ij}$  = Parameter

$X_{ij}$  = Variable der Verkehrsmittelalternativen (z. B. Reisezeit, Reisekosten etc.)

$\varepsilon_{ij}$  = Störgrösse

#### Deterministische Nutzenkomponente

Die deterministische Nutzenkomponente stellt den eindeutig quantifizierbaren Anteil der Nutzenfunktion dar und ist massgebend für die Bewertung der Alternativen. In der Literatur wird zumeist die deterministische Nutzenkomponente durch eine Nutzenfunktion beschrieben, die linear in den Parametern ist. Die Parameter  $\beta_i$  stellen zu schätzende Grössen dar, die bspw. aus Stated-Response-Befragungen gewonnen werden können, bei denen die erklärten Präferenzen der Befragten ausgewertet werden (z. B. Biedermann u. a. 2017). Die Variablen lassen sich folgendermassen klassifizieren (Winkler 2012):

- **Variablen  $X_i$**  sind erklärende Variablen, die über alle Alternativen variieren und sich im Allgemeinen aus den Charakteristika der Alternativen ergeben. Sie können darüber hinaus auch über die Personen variieren. Beispiele: Reisezeit und Reisekosten.
- **Alternativspezifische Konstanten  $\alpha_i$**  repräsentieren i. d. R. qualitative Ausprägungen. Beispiele: Verkehrsmittelkonstante, Quell- und Zielpotentiale.
- **Alternativspezifische Parameter  $\beta_i$**  weisen ähnliche Merkmale wie die alternativspezifischen Konstanten auf, variieren allerdings über die Individuen. Beispiel: einkommensabhängige Parameter nur für das Verkehrsmittel MIV.

## Stochastische Nutzenkomponente

Im Gegensatz zur deterministischen Nutzenkomponente kann die stochastische Nutzenkomponente nicht durch beobachtbare und messbare Grössen quantifiziert werden. Für sie muss eine Annahme über die Verteilungsfunktion der Störterme  $\varepsilon$  getroffen werden, die über grundlegende Eigenschaften des Modells entscheidet. Aufgrund dieser Bedeutung wird die Spezifizierung der Verteilung der Störterme zur Klassifizierung der Zufallsnutzenmodelle herangezogen. Die bedeutendsten Verteilungen der Störterme und die Hauptvertreter der daraus ableitbaren Modelle sind (nach Winkler 2012):

- Gumbelverteilung (Logit-Modell)
- Normalverteilung (Probit-Modell)
- Gleichverteilung (lineares Modell)

Nehmen wir nun als Rechenbeispiel an, dass unter Verwendung von  $\alpha$  und  $\beta$  sowie der dafür eingesetzten Reisezeit und Kosten der Nutzen zur Wahl des Verkehrsmittels MIV dem Wert 2 ( $U_{MIV} = 2$ ) und zur Wahl des Verkehrsmittels ÖV dem Wert 1 ( $U_{ÖV} = 1$ ) entspricht. Das bedeutet, dass bei den beobachteten Faktoren der MIV für diese Person um 1 Einheit besser ist als der ÖV. Es bedeutet jedoch nicht, dass die Person zwangsläufig den MIV wählt. Es gibt noch andere, durch die ModelliererIn oder den Modellierer nicht beobachtete Faktoren  $\varepsilon$ , die die Wahl der Person beeinflussen. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Person für den ÖV statt für den MIV entscheidet, ist die Wahrscheinlichkeit, dass die unbeobachteten Faktoren  $\varepsilon$  für den ÖV ausreichend besser sind als die für den MIV. Dann können sie den Vorteil, den der MIV bei den beobachteten Faktoren hat, aufheben. Konkret wird die Person den ÖV wählen, wenn der unbeobachtete Teil des Nutzens um mindestens eine Einheit höher ist als der für den ÖV, wodurch der Vorteil von einer Einheit, den der MIV bei den beobachteten Faktoren hat, überwunden wird.

### 2.4.2 Verkehrszweckspezifische Nutzenfunktionen

Eine verkehrszweckspezifische Nutzenfunktion berechnet den Nutzen der Alternative  $i$  für eine Person und einem Weg mit einem bestimmten Zweck im Falle eines disaggregierten Verkehrsmodells und für die zu einem bestimmten Zweck zwischen zwei Zonen durchgeführter Wege aller Personen im Falle eines aggregierten Verkehrsmodells. Die Einteilung in Wegzwecke verfolgt das Ziel wegzweckspezifische Unterschiede beim Verkehrsmittelwahlverhalten abbilden zu können.

Als Grundlage zur Festlegung der Wegzwecke dienen Aktivitäten, die jeweils am Quell- oder Zielort von den Personen durchgeführt werden. Diese stehen mit der erfassten Ortsveränderung im Zusammenhang (Zweck). Die Kombination dieser Wegzwecke (Arbeiten, Ausbildung etc.) und der verfügbaren Struktur- und Verkehrsverhaltensdaten (ÖV-Abonnementbesitz, Autoverfügbarkeit etc.) bilden in den aggregierten Modellen die Basis für die Anwendung der Verkehrsmittelwahlmodelle.

Die aus Stated-Response-Befragungen geschätzten Parameter werden aufgrund der Attribute einzelner Wege und personenspezifischen Attributen geschätzt (Weis u. a. 2017). In aggregierten

Verkehrsmodellen erfolgt die Anwendung der aufgrund von Einzeldaten geschätzten Verkehrsmittelwahlmodellen aber aufgrund der für die jeweiligen Zonen vorliegenden Mittelwerten der personenspezifischen Attribute.

Auf diese Weise versteht es sich von selbst, dass die festzulegenden Eigenschaften je Wegzweck nur als Mittelwerte aller berücksichtigten Struktur- und Verkehrsverhaltensdaten abgebildet werden können.

Die Daten zur Personenstruktur (z.B. Motorisierungsrate, Anteil ÖV-Abonnementsbesitz) werden pro Zone aufgrund der dort wohnhaften Personen ermittelt und im Verkehrsmittelwahlmodell je nach Wegtyp für die vom Wohnort startenden oder beim Wohnort endenden Fahrten angewendet. Einer Auswertung des Mikrozensus zeigt aber, dass in der Schweiz 27 % aller Wege nicht heimbasiert sind und somit in einem aggregierten Modell aufgrund der Start- oder Zielzone keine soziodemografischen Information abgeleitet werden können. Für diese Wege muss daher bei einem wegbasierten Ansatz entweder auf die Verwendung soziodemographischer Werte verzichtet werden, oder diese aufgrund von Informationen zur Häufigkeit verschiedener Wegeketten und der Anteile in einer Zonen ankommenden respektive wegführenden Wegen mit Bezug zur Wohnzone imputiert werden.

## 2.5 Zwischenfazit zur Literatur

In der Schweiz werden ABM primär in der Forschung und nur vereinzelt in der Planung verwendet. Demgegenüber stehen die USA, wo sich ABM als Best Practice etabliert haben. In der Literatur wird als Hauptgrund für diese Entwicklung die Veränderung der Fragestellungen gesehen, die mit Verkehrsmodellen beantwortet werden sollen (Vitins u. a. 2021). Denn mit ABM gehen weitreichende Auswertungsmöglichkeiten einher, die den aktuellen verkehrsplanerischen Fragestellungen entsprechen – etwa der Modellierung von Velo- und Autoverleihsystemen oder von tageszeitabhängigen Fragestellungen wie dem Mobility Pricing.

Die Beantwortung solcher personenspezifischen Fragestellungen mit einem ABM ist möglich, jedoch rechenintensiv. Gleichzeitig kann aufgrund der grösser werdenden Rechen- und Speicherkapazitäten auch bei aggregierten Modellen eine höhere räumliche Auflösung angestrebt werden. Daher enthalten auch aggregierte Personenverkehrsmodelle immer mehr Verkehrszonen und verhaltenshomogene Gruppen. In diesem Zusammenhang erfordern die Modelle ein entsprechend hohes Bewusstsein für den Aggregation Bias.

Dem Aggregation Bias über Einzelpersonen kann entgegengewirkt werden, wenn die Aggregation mit einer gewissen Sorgfalt angegangen wird. Dabei gilt es insbesondere sicherzustellen, dass Gruppen innerhalb der Bevölkerung, die unterschiedliche Wahlmöglichkeiten haben, angemessen berücksichtigt werden. Die Fehleranfälligkeit im Prognoseprozess kann damit auf ein Minimum reduziert werden.

In der deutschsprachigen Literatur finden sich nur wenige Forschungsarbeiten, die im Zusammenhang mit dem Aggregation Bias stehen. Die Tendenz scheint dahinzugehen, die Anzahl der verhaltenshomogenen Gruppen (VHG) bei aggregierten Verkehrsmodellen zu erhöhen, statt

disaggregierte Verkehrsmodelle aufzubauen. Infolgedessen erhöht sich zwar auch bei aggregierten Verkehrsmodellen der Rechen- und Speicherbedarf, die Auswertungsmöglichkeiten bleiben dessen ungeachtet die gleichen. Gleichzeitig differenzieren Modelle der Verkehrsmittel das Verkehrsverhalten in der Regel nach Verkehrszweck, nicht aber auch nach verhaltenshomogenen Gruppen. Soziodemographische Informationen werden dabei aufgrund von Mittelwerten der für den jeweiligen Weg relevanten Wohnzone verwendet. Bei nicht wohnortbasierten Wegen kann auch mit höherer Auflösung bezüglich der Zonengrösse und VHG bezüglich der Verkehrserzeugung hinsichtlich der Berücksichtigung soziodemographische Attribute nicht Rechnung getragen werden.

## 3 Fallstudien zur Relevanz des Aggregation Bias

### 3.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird erläutert, wie die Relevanz des Aggregation Bias anhand von Fallstudien untersucht wurde. Der Aggregation Bias tritt bei aggregierten Verkehrsmodellen immer dann auf, wenn das Verkehrsverhalten auf Basis von zusammengefassten Personengruppen, in denen die Personen ein zwar ähnliches, aber trotzdem unterschiedliches Verkehrsverhalten aufweisen, im Modell durch Mittelwerte beschrieben wird. In der Schweiz wird in Verkehrsmodellen zum Beispiel die Verkehrsmittelwahl aufgrund der in der Quellzone vorhandenen Besitzanteile verschiedener Mobilitätswerkzeuge (ÖV-Abonnementsbesitz, Autoverfügbarkeit) nach Raumtypen beschrieben. Ebenso wird der Einfluss des Alters oder des Einkommens aufgrund der jeweiligen Zonenmittelwerte bestimmt.

Wie sich die Beschreibung der räumlich differenzierten Personengruppen durch Mittelwerte (aggregierter Fall) im Vergleich zu einem personenbasierten Verkehrsmittelwahlmodell (disaggregierter Fall) auf die resultierenden Verkehrsmittelanteile auswirkt, soll daher anhand von Fallstudien mit synthetischen Daten untersucht werden. Als Grundlage für die räumliche Einteilung bildet dabei die Typologisierung nach «Raum mit städtischem Charakter 2012» durch Goebel und Kohler (2014) an. Konkret wurden die drei übergeordneten Raumtypen *Städtischer Kernraum (Kerngemeinden)*, *Einflussgebiet städtischer Kerne (Gürtel- und mehrfach orientierte Gemeinden)* und *Gebiete ausserhalb des Einflusses städtischer Kerne (ohne städtischen Charakter)* verwendet. Im Rahmen dieser Masterarbeit werden die drei Hauptkategorien vereinfachend *Stadt*, *Agglo* und *Land* genannt. Diese Einteilung wird nachfolgend als *Szenario* bezeichnet und in Kapitel 3.2.3 detaillierter erläutert.

Zur Berechnung der Verkehrsmittelanteile in den drei Szenarien werden drei Nutzenfunktionen aufgestellt. Jede Nutzenfunktion stellt einen anderen Beispielfall dar. Es gibt einen aggregierten Beispielfall und zwei disaggregierte Beispielfälle, die sich jeweils in einer strikten und einer weniger strikten Ausprägung der Autoverfügbarkeit unterscheiden. Die Entscheidung zwei disaggregierte Beispielfälle zu wählen, hängt damit zusammen, dass damit der Effekt personenbezogener Merkmale breiter untersucht werden kann. Die ausführliche Beschreibung der drei Beispielfälle mit deren Nutzenfunktionen und verwendeten Parametern erfolgt in Kapitel 3.2.4.

Um die Auswirkung des Aggregation Bias zwischen den verschiedenen Szenarien und Beispielfällen aufzuzeigen, wird als *verkehrsplanerische Massnahme* eine Reisezeitreduktion des ÖV-Angebots um jeweils 10 %, 20 % und 30 % eingeführt. Aus der Kombination von drei Szenarien, drei Beispielfällen und drei Massnahmen ergeben sich so insgesamt 27 Betrachtungsfälle.

In einem weiteren Schritt wird die Elastizität der Verkehrsmittelwahl anhand der relativen Veränderung der Reisezeit des ÖV-Angebots berechnet. Dies lässt eine Aussage zur Auswirkung der Veränderung des Attributes auf die betrachtete Alternative zu. Vervollständigt wird dieses Kapitel mit einem Zwischenfazit zur Relevanz des Aggregation Bias in den untersuchten Szenarien.

## 3.2 Generierung der synthetischen Daten

Für die Generierung der synthetischen Daten wurde ein Skript in der freien Programmiersprache R entwickelt<sup>3</sup>. Als Grundlage der synthetischen Daten dienen die anonymisierten Daten des schweizerischen Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV) von 2015 (Biedermann u. a. 2017)<sup>4</sup>. Die Erhebung wird alle 5 Jahre durch das Bundesamt für Statistik durchgeführt und dient dazu, die Mobilität der Schweizer Bevölkerung statistisch zu erfassen. Insgesamt werden jeweils rund 56'000 zufällig ausgewählte Personen telefonisch zu ihrem Verkehrsverhalten befragt. Die geplante Datenerhebung für das Jahr 2020 wurde aufgrund der Covid-19-Pandemie auf 2021 verschoben, mit zu erwartenden Resultaten im Jahr 2023. Die verwendeten Daten aus dem Jahr 2015 reichen zur Generierung der synthetischen Daten mit einer Stichprobengrösse von rund 57'090 Personen aber vollkommen aus. Für die vorliegende Masterarbeit sind vor allem folgende Kenngrössen relevant:

- Autoverfügbarkeit
- ÖV-Abonnementsbesitz
- Mobilitätswerkzeugbesitz
- Reisezeiten mit ÖV und MIV in verschiedenen Raumtypen

Im ersten Schritt erfolgt eine deskriptive Analyse zu diesen und weiteren Kenngrössen. Im Zentrum stehen dabei Mobilitätswerkzeugbesitz, Zugehörigkeit zu den Raumtypen und Einkommen, wobei letzteres für die spätere Auswertung keine Rolle spielt.

### 3.2.1 Deskriptive Analyse

Die deskriptive Datenanalyse wird verwendet, um die Verteilungen der relevanten Kenngrössen zu untersuchen und zu visualisieren. Im Rahmen dieser Arbeit geht es nicht darum, alle sozial-ökonomischen Aspekte des Mikrozensus aufzuzeigen und daraus Annahmen abzuleiten. Das Ziel ist vielmehr, Erkenntnisse zu sammeln, Muster zu identifizieren und im Allgemeinen ein besseres Verständnis für die spätere Interpretierbarkeit der Resultate zu ermöglichen.

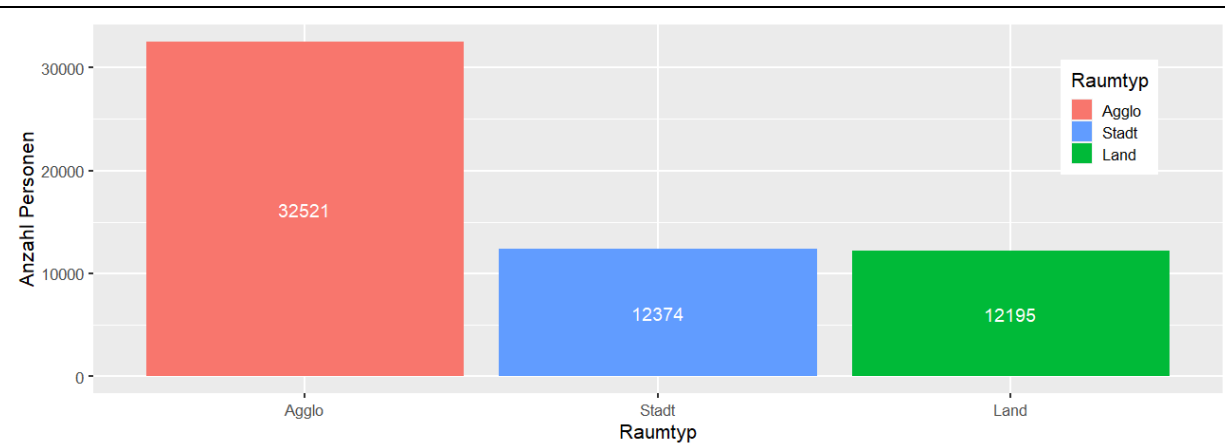
#### 3.2.1.1 Fokus Stichprobengrösse und Raumtyp

Als Erstes wird die Stichprobengrösse untersucht. Dazu illustriert die Abb. 5 die Anzahl der Personen nach Raumtypen. Die Mehrheit der Personen – rund 57 % – ist dem Raumtyp Agglo zugeordnet. Zählt man die in den Städten lebenden Personen dazu, steigt der Wert auf rund 78 %. Dieser Wert erscheint hoch, er liegt jedoch nur knapp über dem schweizerischen Durchschnitt von 73 %, der gemäss dem Bundesamt für Statistik (Goebel und Kohler 2014) für in Städten und Agglomerationen lebende Personen erhoben wurde. Die ländlichen Gebiete sind in den verwendeten Daten im Umkehrschluss daher knapp unterrepräsentiert.

<sup>3</sup> <https://www.r-project.org/>

<sup>4</sup> [https://gitlab.fhnw.ch/fhnw\\_vm/doku\\_master\\_thesis\\_fabio\\_cachaco/-/tree/main/01\\_mzmv\\_sample](https://gitlab.fhnw.ch/fhnw_vm/doku_master_thesis_fabio_cachaco/-/tree/main/01_mzmv_sample)

Abb. 5: Anzahl Personen nach Raumtyp

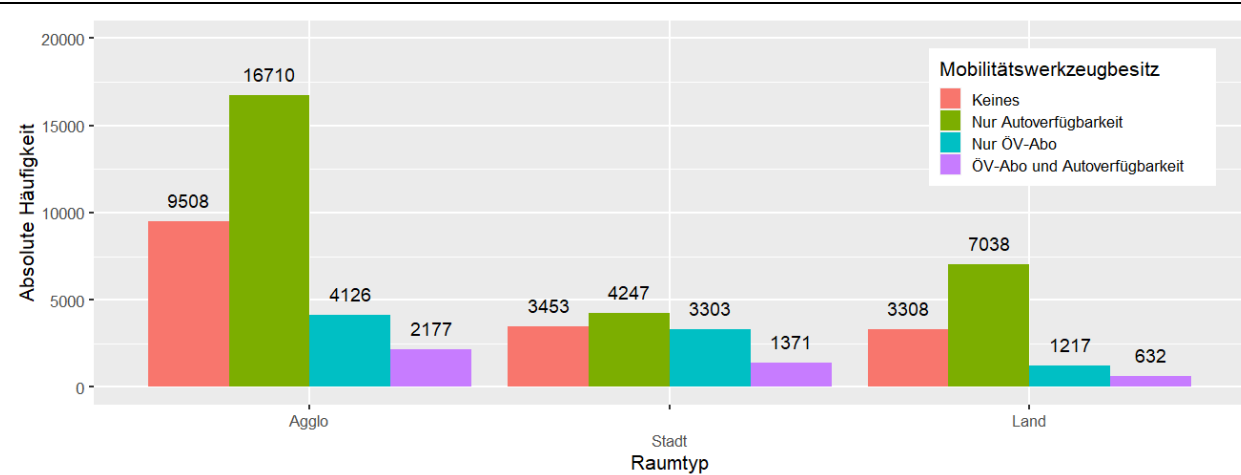


Quelle: Eigene Darstellung

### 3.2.1.2 Fokus Mobilitätswerkzeugbesitz

Für spätere Auswertungen ist der Mobilitätswerkzeugbesitz nach Raumtyp wichtig. Dieser gibt Aufschluss, wie gross die Personengruppe ist, die bei Verschiebungen von Verkehrsmittelanteilen in Frage kommt.

Abb. 6: Mobilitätswerkzeugbesitz nach Raumtyp (absolute Werte)

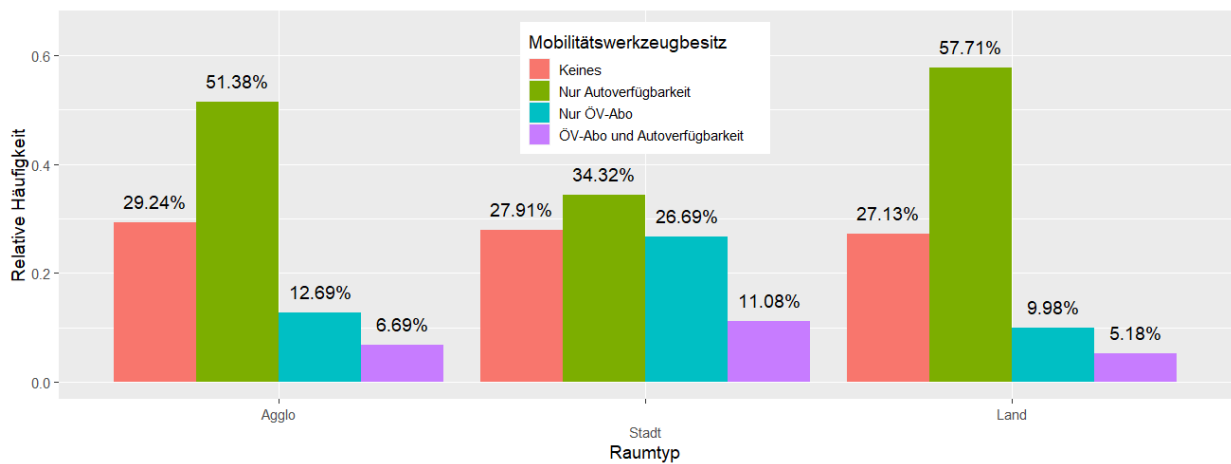


Quelle: Eigene Darstellung

Wie aus der vorhergehenden Abb. 6 zu entnehmen ist, stellt die Personengruppe «Nur Autoverfügbarkeit» im Raumtyp Agglo nach absoluten Werten die grösste Gruppe dar. Betrachten wir die

relative Häufigkeit, so zeigt sich gemäss Abb. 7 ein anderes Bild. Hier besitzt die Personengruppe «Nur Autoverfügbarkeit» im Raumtyp Land die höchste Besitzquote mit rund 57.71 %.

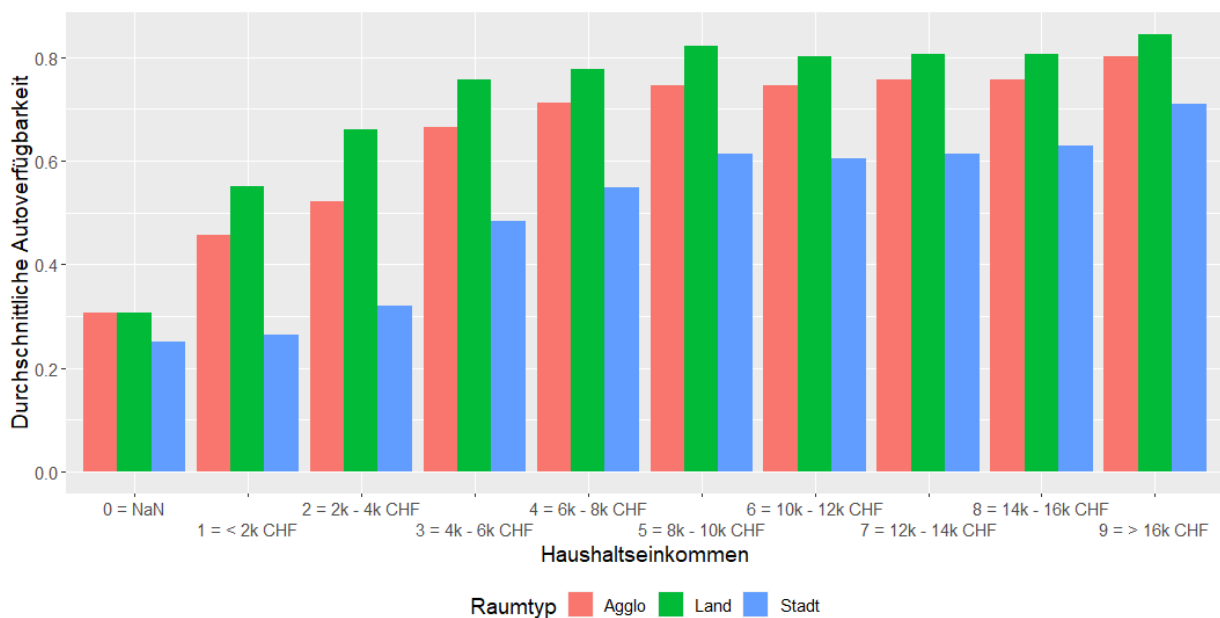
Abb. 7: Mobilitätswerkzeugbesitz nach Raumtyp (relative Werte)



Quelle: Eigene Darstellung

In allen Raumtypen liegt die Quote von Personen ohne Mobilitätswerkzeug bei 27 bis 29 %.

Abb. 8: Durchschnittliche Autoverfügbarkeit nach Einkommensklassen und Raumtyp

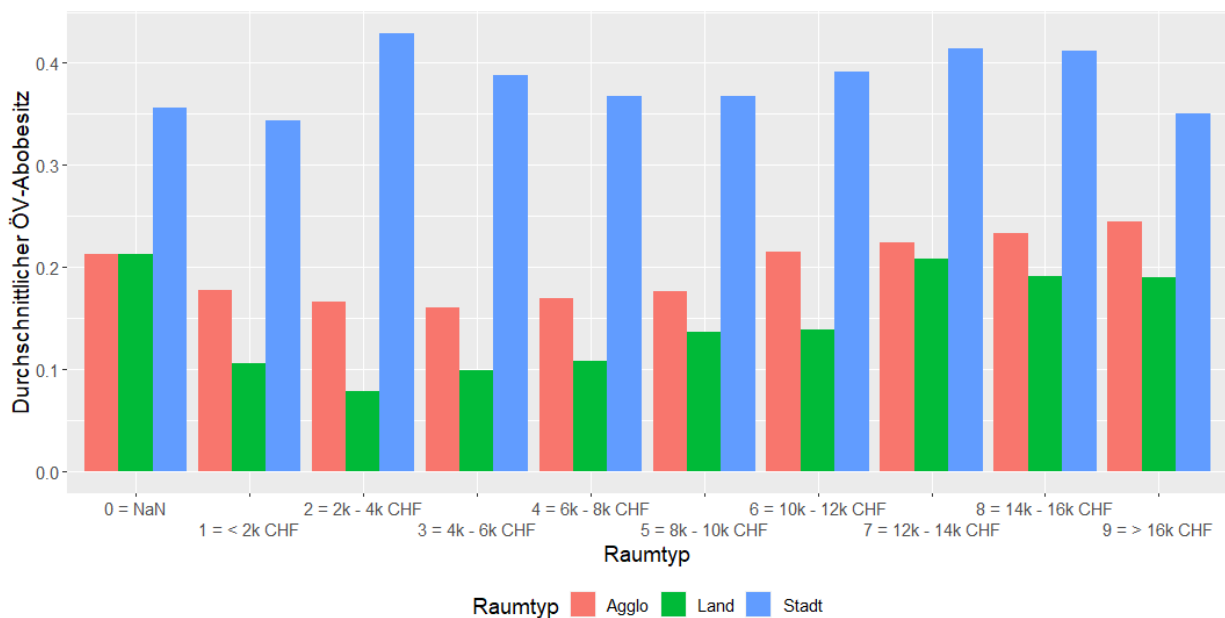


Quelle: Eigene Darstellung

Die vorhergehende Abb. 8 zeigt die durchschnittliche Autoverfügbarkeit nach Einkommensklassen und Raumtypen. Auffällig, aber nicht überraschend ist dabei, dass die Verfügbarkeit eines Autos mit höherem Einkommen steigt, und zwar unabhängig davon, aus welchem Raumtyp die Person stammt. Bei allen Raumtypen ist eine gewisse Stagnation der Autoverfügbarkeitsquote in den Einkommensklassen 5 bis 9 zu beobachten. Bei der höchsten Einkommensgruppe ist in allen Raumtypen noch ein kleiner Boost zu beobachten.

Die Abb. 9 zeigt beim durchschnittlichen ÖV-Abonnementsbesitz geringere Unterschiede nach Einkommensklassen als bei der Autoverfügbarkeit. Umso deutlicher ist beim ÖV-Abonnementsbesitz dafür ein Stadt-Land-Gefälle erkennbar. Gegenüber dem ländlichen Raumtyp besitzen in der Stadt etwa doppelt so viele Personen ein ÖV-Abonnement. Auch dieser Umstand kommt nicht überraschend: Städte weisen ein viel grösseres und dichteres ÖV-Angebot aus.

Abb. 9: Durchschnittlicher ÖV-Abonnementsbesitz nach Einkommen und Raumtyp



Quelle: Eigene Darstellung

Die durchschnittlichen Mobilitätswerkzeugbesitzquoten pro Raumtyp sind Tab. 1 zu entnehmen.

Tab. 1: Durchschnittliche Mobilitätswerkzeugbesitzquoten nach Raumtypen

Mobilitätswerkzeug	Stadt	Agglo	Land
Autoverfügbarkeit	45.5%	58.1%	62.9%
ÖV-Abonnementsbesitz	37.8%	19.4%	15.2%

Diese durchschnittlichen Werte werden im folgenden Kapitel 3.2.2 als Anhaltspunkte verwendet, um verschiedene Szenarien innerhalb der synthetischen Daten zu generieren, die es zulassen, auf Personenebene verschiedene Mobilitätswerkzeugbesitzquoten abzubilden. Als kurzes Zwischenfazit lässt sich festhalten, dass die festgestellten Mobilitätswerkzeugbesitzverhältnisse dem erwarteten Rahmen entsprechen. So sind in ländlichen Gebieten höhere Autoverfügbarkeiten zu erkennen als in städtischen Gebieten, dafür liegen in der Stadt die ÖV- Abonnementsbesitzquoten höher.

### 3.2.2 Aufbau des Skripts

Das Skript `1_synpop_aggregation_bias` ist grob in sieben inhaltliche Abschnitte gegliedert<sup>5</sup>. Vorweg werden zwei Abschnitte als Impressum geführt, die kurz in den Inhalt einführen. Die sieben Abschnitte gliedern sich wie folgt:

- Installation von Programmbibliotheken
- Laden und Vorbereiten der Daten
- Ausführen des Beispielfalls 1: Aggregierte Daten
- Ausführen des Beispielfalls 2: Disaggregierte Daten mit lockerer MIV-Verfügbarkeit
- Ausführen des Beispielfalls 3: Disaggregierte Daten mit strenger MIV-Verfügbarkeit
- Auswerten der Elastizität der Verkehrsmittelwahl
- Erstellen von Grafiken

Kernstück des Skripts bilden die Beispielfälle mit den drei Entscheidungsmodellen zur Verkehrsmittelwahl. Die dort anfallenden Resultate werden für das nachgelagerte Ermitteln der Elastizität und für das Erstellen von Grafiken verwendet. Innerhalb der einzelnen Szenarien werden die dafür spezifischen Parameter geladen, Funktionen definiert, Funktionen ausgeführt und Resultate ausgegeben. An mehreren Stellen wurde zur leichteren Replikation der Resultate die Codebausteine als Funktionen verfasst. Das verwendete Skript ist auf der GitLab-Plattform der FHNW hochgeladen worden. Alle Skripte dieser Masterarbeit sind unter Einhaltung der MIT-Lizenz<sup>6</sup> frei verfügbar. Im Anhang 3 wird eine Übersicht aller verwendeter Skripte geführt.

### 3.2.3 Definition der Szenarien

Die unterschiedlichen Mobilitätswerkzeugbesitzquoten in den drei Raumtypen werden für verschiedene Distanzen und Verhältnisse der Attraktivität zwischen den zwei Verkehrsmitteln MIV und ÖV betrachtet, um zu untersuchen, wie diese den Aggregation Bias beeinflussen und wie

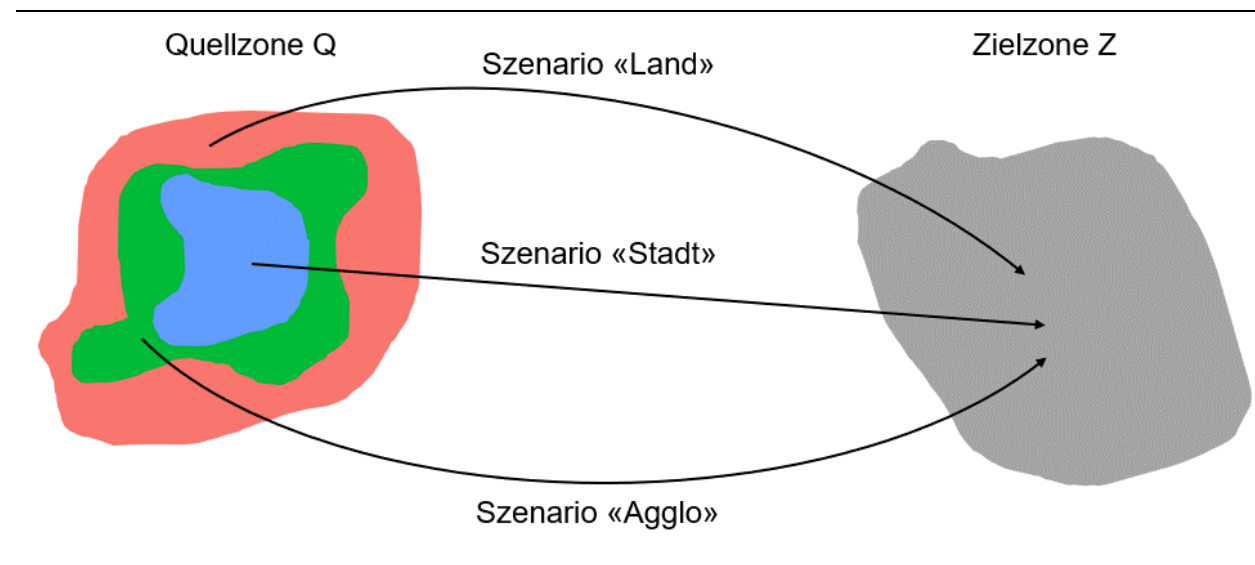
<sup>5</sup> [https://gitlab.fhnw.ch/fhnw\\_vm/doku\\_master\\_thesis\\_fabio\\_cachaco/-/blob/main/02\\_aggregation\\_bias/1\\_synpop\\_aggregation\\_bias.R](https://gitlab.fhnw.ch/fhnw_vm/doku_master_thesis_fabio_cachaco/-/blob/main/02_aggregation_bias/1_synpop_aggregation_bias.R)

<sup>6</sup> <https://opensource.org/licenses/MIT>

relevant dieser Einfluss ist. Die synthetischen Daten lassen eine personenbezogene Beschreibung der Verkehrsmengen zwischen zwei Zonen zu.

Als Ausgangslage der Szenarien kann man sich zwei Verkehrszonen vorstellen – eine Quell- und eine Zielzone. Innerhalb dieser Verkehrszonen gibt es jeweils einen städtischen, einen ländlichen und einen einer Agglomerationsgemeinde ähnlichen Teil. Diese drei Raumtypen unterscheiden sich anhand verschiedener Mobilitätswerkzeugbesitzquoten und Distanzen bzw. Reisezeiten zur Zielzone (Szenarien). Abb. 10 illustriert die beschriebene Ausgangslage.

Abb. 10: Ausgangslage der Szenarien für die Fallbeispiele



Quelle: Eigene Darstellung

Die einzelnen Kennwerte der drei Szenarien sind in Tab. 2 festgehalten. Distanz und Reisezeit zwischen den beiden Zonen sind keine fixen Grössen, sondern werden mit einer Standardabweichung von 2 Minuten generiert. Damit soll die räumliche Disaggregation einzelner Personen innerhalb eines Raumtyps abgebildet werden. Die aufgelisteten Werte sind als (Zonen-)Mittelwerte des jeweiligen Szenarios zu verstehen.

Tab. 2: Kennwerte der Szenarien

Kennwert	Stadt	Agglo	Land
Reisezeit MIV	7.82 Minuten	12.00 Minuten	12.00 Minuten
Reisezeit ÖV	11.25 Minuten	14.40 Minuten	15.00 Minuten
Distanz zur Zielzone Z	3 Kilometer	6 Kilometer	10 Kilometer
Autoverfügbarkeit	40 Prozent	60 Prozent	75 Prozent
ÖV-Abonnementsbesitz	60 Prozent	40 Prozent	25 Prozent

### 3.2.4 Definition der Beispielfälle mit Nutzenfunktion und Parameter

Um die Relevanz des Aggregation Bias erfassen zu können, muss für die verschiedenen Szenarien eine Verkehrsmittelwahl erfolgen. Dazu werden drei Nutzenfunktionen aufgestellt. Jede Nutzenfunktion stellt einen anderen Beispielfall dar. Nachfolgend werden die drei Beispielfälle mit deren Nutzenfunktionen und verwendeten Parametern beschrieben. Die benötigten Parameter für die Nutzenkomponenten wurden nicht eigenständig geschätzt, stattdessen wurde auf die Parameter aus dem aggregierten Gesamtverkehrsmodell Region Basel (GVMB) (Arendt Consulting, Roland Müller und Infras 2019) zurückgegriffen. Die verwendeten Parameter lassen sich Tab. 3 entnehmen und wurden für alle Nutzenfunktionen verwendet. Da im Rahmen dieser Fallbeispiele keine Fahrzwecke berücksichtigt werden, finden die nicht wegweckgebundenen Parameter «alle Zwecke» Verwendung. Als Nutzenkomponenten werden Reisezeiten, Reisekosten und Mobilitätswerkzeugverfügbarkeit verwendet. Die Distanz fließt nicht als eigenständige Nutzenkomponente mit ein, sondern wird indirekt bei den Kosten mitberücksichtigt. Der dazu verwendete Term ( $Distanz_{Raumtyp} * 0.15$ ) stammt ebenfalls aus dem GVMB. Die Variable im Term ( $Reisezeit_{\text{ÖV}} * 0.235$ ) ist dem Nationalen Personenverkehrsmodell (NPVM) (Vrtic u. a. 2020) entnommen.

Tab. 3: Verwendete Parameter aus dem GVMB

Bedeutung	Abkürzung	Wert
Parameter für Reisezeit MIV	b_tt_car	-0.055
Parameter für Kosten MIV	b_cost_car	-0.190
Parameter für Autoverfügbarkeit	b_car_avail	1.145
Parameter für Reisezeit ÖV	b_tt_oev	-0.045
Parameter für Kosten ÖV	b_cost_oev	-0.121
Parameter für ÖV-Abonnementsbesitz	b_oev_avail	1.704

Basierend auf diesen Werten wurden drei Nutzenfunktionen für die Beispielfälle «Aggregierte Daten», «Disaggregierte Daten mit lockerer MIV-Verfügbarkeit» sowie «Disaggregierte Daten mit strenger MIV-Verfügbarkeit» aufgestellt. Nachfolgend werden die Beispielfälle vorgestellt.

### Beispielfall 1: Aggregierte Daten

Für den Beispielfall mit aggregierten Daten verwendet die Nutzenfunktion die Zonenmittelwerte aus Tab. 2. Die alternativenspezifische Verkehrsmittelkonstante  $Konstante_{MIV,agg}$  der Nutzenfunktion («agg» im Index steht hier für «aggregiert») unterscheidet sich für alle drei Szenarien. Um die Verkehrsmittelanteile für das Szenario Stadt einzustellen, wird eine  $Konstante_{MIV,agg}$  mit dem Wert von 0.132 verwendet. In Tab. 4 sind die Konstanten für die anderen beiden Szenarien aufgeführt.

Tab. 4: Verwendete Konstanten für den Beispielfall 1

Szenario	Stadt	Agglo	Land
$Konstante_{MIV}$	0.132	0.438	0.960

Die Werte der Konstanten wurden durch diverse Versuche ermittelt, bis der gewünschte Verkehrsmittelanteil für das Basisszenario erreicht wurde. Dieses Vorgehen wurde für alle Beispielfälle gleichermassen angewendet. Die Nutzenfunktionen lauten demnach wie folgt:

$$\text{Nutzen } U_{MIV} = Konstante_{MIV,agg} + \beta_{Reisezeit,MIV} * Reisezeit_{MIV} + \beta_{Kosten,MIV} * (Reisezeit_{MIV} * 0.29 + Distanz_{Raumtyp} * 0.15) + \beta_{Autoverfuegbarkeit} * Autoverfuegbarkeit_{\emptyset}$$

$$\text{Nutzen } U_{\text{ÖV}} = \beta_{Reisezeit,\text{ÖV}} * Reisezeit_{\text{ÖV}} + \beta_{Kosten,\text{ÖV}} * (Reisezeit_{\text{ÖV}} * 0.235) + \beta_{\text{ÖV-Abonnementsbesitz}} * \text{ÖV-Abonnementsbesitz}_{\emptyset}$$

### Beispielfall 2: Disaggregierte Daten mit lockerer MIV-Verfügbarkeit

Die Nutzenfunktion für diesen disaggregierten Beispielfall basiert nicht mehr auf den Zonenmittelwerten von verhaltenshomogenen Gruppen, sondern berücksichtigt die personenspezifischen Attribute. «Lockere MIV-Verfügbarkeit» bedeutet in diesem Fall, dass Personen, die ein Auto zur Verfügung haben, das Auto mit höherer Wahrscheinlichkeit als Verkehrsmittel wählen als Personen ohne verfügbares Auto. Personen ohne Autoverfügbarkeit können in diesem Beispielfall trotzdem das Auto wählen. Die Verfügbarkeit des Autos kann entsprechend als gelockert betrachtet werden. Dieser Umstand stellt den Hauptunterschied zum Beispielfall 3 dar. Die Nutzenfunktion lautet wie folgt:

$$\text{Nutzen } U_{MIV} = Konstante_{MIV,disagg} + \beta_{Reisezeit,MIV} * Reisezeit_{MIV} + \beta_{Kosten,MIV} * (Reisezeit_{MIV} * 0.29 + Distanz_{Raumtyp} * 0.15) + \beta_{Autoverfuegbarkeit} * Autoverfuegbarkeit$$

$$\text{Nutzen } U_{\text{ÖV}} = \beta_{Reisezeit,\text{ÖV}} * Reisezeit_{\text{ÖV}} + \beta_{Kosten,\text{ÖV}} * (Reisezeit_{\text{ÖV}} * 0.235) + \beta_{\text{ÖV-Abonnementsbesitz}} * \text{ÖV-Abonnementsbesitz}$$

Die Nutzenfunktion weist für die drei Szenarien verschiedene alternativenspezifische Verkehrsmittelkonstanten aus. Um die Verkehrsmittelanteile für das Szenario Stadteinzustellen, wird eine  $Konstante_{MIV,disagg}$  mit dem Wert von 0,302 verwendet. In Tab. 5 sind die weiteren Konstanten dargestellt.

Tab. 5: Verwendete Konstanten für den Beispielfall 2

Szenario	Stadt	Agglo	Land
$Konstante_{MIV}$	0.302	0.402	1.002

### Beispielfall 3: Disaggregierte Daten mit strenger MIV-Verfügbarkeit

Die Nutzenfunktion für den zweiten disaggregierten Beispielfall ist identisch mit der Nutzenfunktion aus Beispielfall 2. Der Unterschied liegt in der strengeren Berücksichtigung der Autoverfügbarkeit. «Strenge MIV-Verfügbarkeit» bedeutet in diesem Fall, dass Personen, die ein Auto zur Verfügung haben, das Auto mit hoher Wahrscheinlichkeit als Verkehrsmittel wählen. Personen ohne Autoverfügbarkeit können in diesem Beispielfall – und nur in diesem Fall – das Auto nicht als Verkehrsmittel wählen. Die Verfügbarkeit des Autos kann also als 0 oder 1 betrachtet werden. In diesem Fall wird also davon ausgegangen, dass die betroffene Person keine Möglichkeit besitzt, im nahen Umfeld ein Auto als Verkehrsmittel zu benutzen. Bei der Ermittlung der Verkehrsmittelanteile mit dem multinominalen Logit-Modell fließt die Autoverfügbarkeit als strenges Kriterium ein. In der folgenden Tab. 6 finden sich die alternativenspezifischen Verkehrsmittelkonstanten für den Beispielfall 3.

Tab. 6: Verwendete Konstanten für den Beispielfall 3

Szenario	Stadt	Agglo	Land
$Konstante_{MIV}$	2.952	1.712	2.952

### 3.2.5 Definition der verkehrsplanerischen Massnahme

Um Veränderungen der Verkehrsmittelwahl zwischen den drei Beispielfällen und Szenarien aufzuzeigen, wurde als verkehrsplanerische Massnahme eine Reisezeitreduktion des ÖV-Angebots um jeweils 10 %, 20 % und 30 % implementiert. Aufgrund der verkürzten Reisezeit werden für alle drei Beispielfälle höhere Verkehrsmittelanteile erwartet. Untersucht wird, durch welchen Beispielfall und welches Szenario die grössten Veränderungen entstehen.

### 3.2.6 Modellansatz

Für die Ermittlung der Auswahlwahrscheinlichkeiten und der relativen Verkehrsmittelanteile wird ein multinominales Logit-Modell benutzt. Dafür wird folgende Formel verwendet:

$$P_n(i) = \frac{e^{U_{ni}}}{\sum_{j \in C_n} e^{U_{nj}}}$$

$P_n(i)$  = Wahrscheinlichkeit, dass eine Person/VHG  $n$  das Verkehrsmittel  $i$  wählt

$U_{ni}$  = Nutzen der Alternative  $i$  für die Person/VHG  $n$

$C_n$  = Set möglicher Verkehrsmittel für die Person/VHG  $n$  (in diesem Fall: MIV, ÖV)

Für den Beispielfall 3 «Disaggregierte Daten mit strenger MIV-Verfügbarkeit» fließt wie zuvor beschrieben bei der Ermittlung der Auswahlwahrscheinlichkeiten mit ein, dass die Verkehrsmittelalternative Auto ohne Autoverfügbarkeit nicht gewählt werden kann. Damit wird die Benutzungswahrscheinlichkeit im Logit-Modell gleich 0. Die Zuweisung eines Verkehrsmittels erfolgt probabilistisch aufgrund einer uniform, zwischen 0 und 1 verteilten Variable (siehe dazu auch Walker und Ben-Akiva (2002)). Nachfolgend wird die Nutzenfunktion mit Wahrscheinlichkeitsberechnung aus dem R-Skript für den Beispielfall 3 dargestellt.

```
ModeCoice_Disagg_0_1 <- function(data,k_rural_type){
  data %>%
  mutate(utility_car=k_rural_type+b_tt_car*tt_car+b_cost_car*cost_car+
          b_car_avail*car_available)%>%
  mutate(utility_oev=b_tt_oev*tt_oev+b_cost_oev*cost_oev+b_oev_avail*oevabo)%>%
  mutate(prob_car=if_else(car_available==1,exp(utility_car)/(exp(utility_car)+
          exp(utility_oev)),0))%>%
  mutate(prob_oev=exp(utility_oev)/(exp(utility_car)*car_available+exp(utility_oev)))%>%
  mutate(Verkehrsmittelwahl=case_when(prob_car>rand~'car',prob_car+prob_oev>rand~'oev',
          TRUE~'other'))
}
```

### 3.2.7 Berechnung der Elastizität

Die Elastizität misst die relative Veränderung in Prozenten der Marktanteile einer bestimmten Alternative in Bezug auf die relative Veränderung eines Attributes derselben Alternative. Als Formel ausgedrückt, wird die Elastizität der Alternative  $i$  bzgl. der Änderung des Attributes  $k$  zwischen dem Zustand 0 und dem Zustand 1 folgendermassen berechnet (Axhausen und Fröhlich 2012):

$$\text{Elastizität } \varepsilon_i^k = \frac{dQ_i/Q_i}{dK_i/K_i} \sim \frac{(Q_i^1 - Q_i^0)/Q_i^0}{(K_i^1 - K_i^0)/K_i^0}$$

$Q_i$  = Veränderung in Prozenten der Marktanteile einer bestimmten Alternative

$K_i$  = Relative Veränderung eines Attributes derselben Alternative

### 3.3 Auswertung

Mit dem R-Skript konnte die Berechnung der Verkehrsmittelanteile für die drei Beispielfälle jeweils mit den drei Szenarien und den drei Massnahmen hintereinander ausgeführt werden. Insgesamt werden dadurch 27 Verkehrsmittelwahl-Vergleiche angestellt. Die Auswertung erfolgt nach Szenarien. Gegenstand des Vergleichs ist die Dimension der Veränderung. Es ist zu untersuchen, bei welchen Verkehrsmittelanteilen oder bei welchem Beispielfall diese Veränderungen maximal sind. Daraus lässt sich ableiten, wo der Aggregation Bias am stärksten in Erscheinung tritt. Die nachfolgenden Tab. 7 bis Tab. 9 sind nach Szenarien getrennt und innerhalb einer Tabelle in 3 Blöcke aufgeteilt. Ein Block stellt jeweils eine der drei verkehrsplanerischen Massnahmen dar. Innerhalb jedes Blocks sind die drei Beispielfälle enthalten. Die relevanten Veränderungen der Verkehrsmittelanteile pro Beispielfall stehen im Vergleich zum Basisszenario.

Als letzter Schritt wurde auch die Elastizität für eine verkehrsplanerische Massnahme (Reduktion der Reisezeit des ÖV-Angebots um 10 %) berechnet. Bei allen Fällen ist zu erwarten, dass der ÖV durch die Reduktion der Reisezeiten an Attraktivität gewinnt und dadurch an Verkehrsmittelanteilen gegenüber dem Basisszenario zulegt.

### 3.3.1 Resultate für das Szenario Stadt

Die Ergebnisse für das Szenario Stadt in Tab. 7 zeigen, dass die Reisezeitreduktionen im Beispielfall 1 «Aggregierte Daten» die grössten Veränderungen zur Folge haben. Im Vergleich zum Beispielfall 2 «Disaggregierte Daten mit lockerer MIV-Verfügbarkeit» ist die Veränderung bei einer Reisezeitreduktion von 10 % etwa doppelt so gross, und im Vergleich zum Beispielfall 3 «Disaggregierte Daten mit strenger MIV-Verfügbarkeit» ist sie sogar zehnmal so gross. Dieses Muster ist auch bei den Reisezeitreduktionen um 20 % und 30 % zu erkennen. Die grösste Verschiebung der Verkehrsmittelanteile zugunsten des ÖV sind erwartungsgemäss bei der Reisezeitreduktion von 30 % zu finden. Bei allen Reisezeitreduktionen sind die Veränderungen im Beispielfall 3 am geringsten.

Tab. 7: Resultate für das Szenario Stadt

Verkehrsmittelanteile	Basis		-10% Reisezeit		Veränderung [Δ]
	[MIV/ÖV]		[MIV/ÖV]		
Fall 1: Aggregiert			35.3%	64.7%	1.1%
Fall 2: Disaggregiert MIV = locker	36.4%	63.6%	35.8%	64.2%	0.6%
Fall 3: Disaggregiert MIV = streng			36.3%	63.7%	0.1%

Verkehrsmittelanteile [MIV/ÖV]	Basis		-20% Reisezeit		Veränderung
	[MIV/ÖV]		[MIV/ÖV]		
Fall 1: Aggregiert			34.1%	65.9%	2.3%
Fall 2: Disaggregiert MIV = locker	36.4%	36.4%	35.2%	64.8%	1.2%
Fall 3: Disaggregiert MIV = streng			36.2%	64.0%	0.2%

Verkehrsmittelanteile [MIV/ÖV]	Basis		-30% Reisezeit		Veränderung
	[MIV/ÖV]		[MIV/ÖV]		
Fall 1: Aggregiert			33.0%	67.0%	3.4%
Fall 2: Disaggregiert MIV = locker	36.4%	36.4%	34.6%	65.4%	1.8%
Fall 3: Disaggregiert MIV = streng			35.9%	64.1%	0.3%

### 3.3.2 Resultate für das Szenario Agglo

Die Ergebnisse in Tab. 8 bestätigen die vorhergehenden Erkenntnisse. Auch im Szenario Agglo hat die Reduktion der Reisezeit einen grösseren Einfluss auf den aggregierten Beispielfall als auf die beiden disaggregierten Beispielfälle. Im Vergleich zum Fall «Disaggregiert mit lockerer MIV-Verfügbarkeit» ist die Veränderung bei einer Reisezeitreduktion von 10 % rund dreimal so gross, im Vergleich zum Fall «Disaggregiert mit strenger MIV-Verfügbarkeit» ist sie etwa sechsmal so gross. Dieses Muster ist bei allen drei Reisezeitreduktionen zu erkennen, wobei die Veränderungen mit kleiner werdender Reisezeitreduktion leicht abnehmend ist.

Tab. 8: Resultate für das Szenario Agglo

Verkehrsmittelanteile	Basis		-10% Reisezeit		Veränderung [Δ]
	[MIV/ÖV]		[MIV/ÖV]		
Fall 1: Aggregiert			48.6%	54.1%	<b>1.8%</b>
Fall 2: Disaggregiert MIV = locker	50.2%	49.8%	49.6%	50.4%	<b>0.6%</b>
Fall 3: Disaggregiert MIV = streng			49.9%	50.1%	<b>0.3%</b>

Verkehrsmittelanteile [MIV/ÖV]	Basis		-20% Reisezeit		Veränderung
	[MIV/ÖV]		[MIV/ÖV]		
Fall 1: Aggregiert			47.0%	53.0%	<b>3.2%</b>
Fall 2: Disaggregiert MIV = locker	50.2%	49.8%	48.9%	51.1%	<b>1.3%</b>
Fall 3: Disaggregiert MIV = streng			49.6%	50.4%	<b>0.6%</b>

Verkehrsmittelanteile [MIV/ÖV]	Basis		-30% Reisezeit		Veränderung
	[MIV/ÖV]		[MIV/ÖV]		
Fall 1: Aggregiert			45.4%	54.6%	<b>4.8%</b>
Fall 2: Disaggregiert MIV = locker	50.2%	49.8%	48.3%	51.7%	<b>1.9%</b>
Fall 3: Disaggregiert MIV = streng			49.3%	50.7%	<b>0.9%</b>

Die Resultate im Szenario Agglo zeigen weiter, dass bei ausgeglichenen Verkehrsmittelanteilen (hier rund 50.2 % MIV und 49.8 % ÖV im Basisszenario) der Aggregation Bias mit 4,8 % Veränderung im Beispielfall 1 bei 30 % Reisezeitreduktion am stärksten ist. Dies bestätigen auch die theoretischen Überlegungen aus Kapitel 2.3, denn das Logit-Modell reagiert am empfindlichsten, also mit hoher Elastizität, auf Änderungen der Inputvariablen in seinem mittleren Bereich.

### 3.3.3 Resultate für das Szenario Land

Auch die Ergebnisse in Tab. 9 bestätigen den festgestellten Trend. Im Szenario Land hat die Reduktion der Reisezeit einen grösseren Einfluss auf den aggregierten Beispielfall als auf die beiden disaggregierten Beispielfälle. Im Vergleich zum Fall «Disaggregiert mit lockerer MIV-Verfügbarkeit» ist die Veränderung bei einer Reisezeitreduktion von 10 % rund 2,5-mal so gross, im Vergleich zum Fall «Disaggregiert mit strenger MIV-Verfügbarkeit» ist sie sogar 14-mal so gross. Gegenüber dem Szenario Agglo ist in diesem Fall nur eine kleinere Veränderung erkennbar – und dies, obwohl der Basisanteil im ÖV nur bei rund 30 % liegt und daher aus relativer Sicht das grösste Veränderungspotenzial bestehen würde. Da in absoluten Zahlen jedoch weniger Personen im ländlichen Gebiet wohnen (vgl. Abb. 6), ist die Veränderung trotzdem geringer.

Tab. 9: Resultate für das Szenario Land

Verkehrsmittelanteile	Basis		-10% Reisezeit		Veränderung [Δ]
	[MIV/ÖV]		[MIV/ÖV]		
Fall 1: Aggregiert			69.4%	30.6%	1.4%
Fall 2: Disaggregiert MIV = locker	70.8%	29.2%	70.2%	29.8%	0.6%
Fall 3: Disaggregiert MIV = streng			70.7%	29.3%	0.1%

Verkehrsmittelanteile [MIV/ÖV]	Basis		-20% Reisezeit		Veränderung
	[MIV/ÖV]		[MIV/ÖV]		
Fall 1: Aggregiert			68.0%	32.0%	2.8%
Fall 2: Disaggregiert MIV = locker	70.8%	29.2%	69.6%	30.4%	1.2%
Fall 3: Disaggregiert MIV = streng			70.6%	29.4%	0.2%

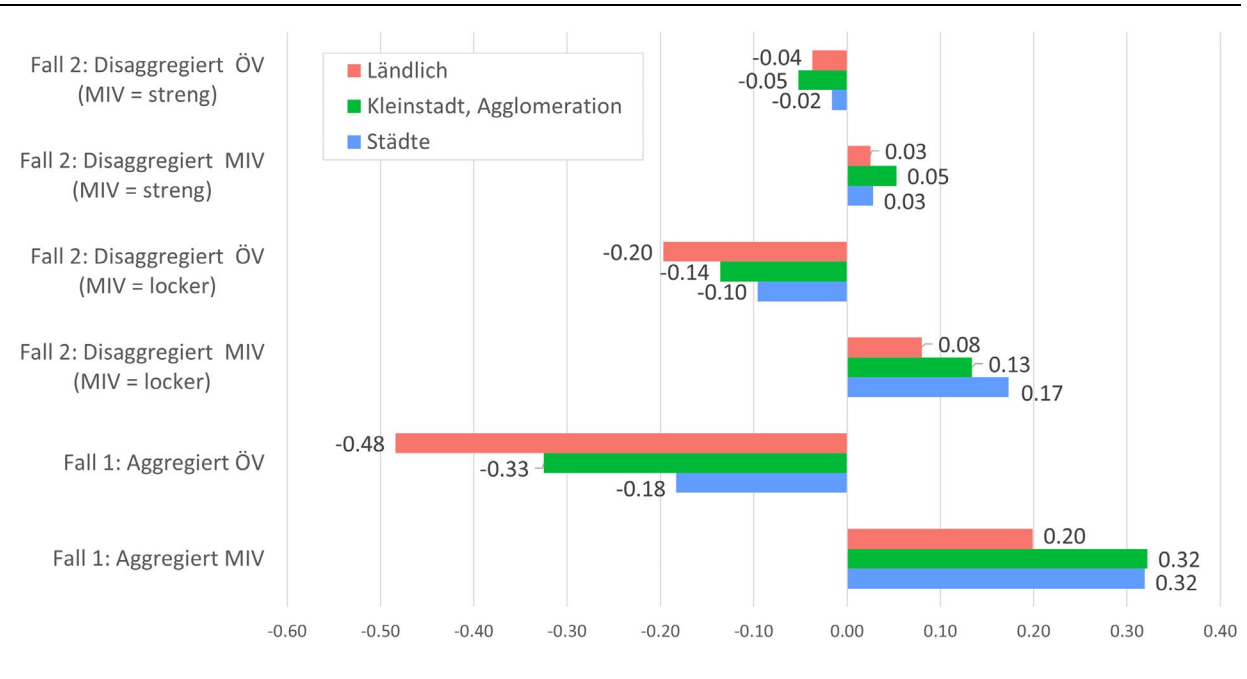
Verkehrsmittelanteile [MIV/ÖV]	Basis		-30% Reisezeit		Veränderung
	[MIV/ÖV]		[MIV/ÖV]		
Fall 1: Aggregiert			66.5%	33.5%	4.3%
Fall 2: Disaggregiert MIV = locker	70.8%	29.2%	69.0%	31.0%	1.8%
Fall 3: Disaggregiert MIV = streng			70.4%	29.6%	0.4%

### 3.3.4 Resultate der Elastizitätsberechnungen

Aus dem Vergleich der Angebotsveränderungen lassen sich die Elastizitäten der Reisezeit berechnen. In diesem Fall wird von Personen ausgegangen, die von einem Verkehrsmittel auf ein anderes umsteigen. Die Elastizität berücksichtigt bei einer konstanten Anzahl von Wegen (die Stichprobe enthält 50'090 Personen resp. Wege zwischen Quellzone Q und Zielzone Z) auf einer Relation die relative Veränderung der Anteile der Alternativen (MIV und ÖV) hervorgerufen durch eine relative Veränderung eines ihrer Attribute (Reisezeitreduktion ÖV).

Die höchste Zeitelastizität zeigt der Beispielfall mit aggregierten Daten im ÖV (vgl. Abb. 11). Bei einer Reduktion der ÖV-Reisezeit um 10 % bedeutet das, dass der ÖV-Verkehrsmittelanteil im *aggregierten Fall und im ländlichen Gebiet* um 4.8 % ansteigt. Andererseits reduziert sich der MIV-Verkehrsmittelanteil ebenfalls im *aggregierten Fall und im ländlichen Gebiet* um 2 %.

Abb. 11: Elastizität der Verkehrsmittelwahlanteile bei der Reisezeitreduktion des ÖV-Angebots um 10 %



Quelle: Eigene Darstellung

### 3.4 Zwischenfazit der Fallstudien zur Relevanz des Aggregation Bias

In Kapitel 3 wurden Fallstudien erstellt, um die Relevanz des Aggregation Bias beispielhaft zu ermitteln. Hierfür wurde mithilfe synthetischer Daten untersucht, wie sehr sich die aggregierte und die disaggregierte Verkehrsmittelwahl unterscheiden. Die synthetischen Daten konnten verschiedene Raumtypen (Stadt, Agglo, Land) mit unterschiedlichen Mobilitätswerkzeugbesitzquoten und Distanzen berücksichtigen. Um Veränderungen der Verkehrsmengen zwischen zwei Zonen hervorzurufen, wurde als verkehrsplanerische Massnahme die Reisezeit des ÖV-Angebots um jeweils 10 %, 20 % und 30 % reduziert.

Zwischen den 3 Beispielfällen «Aggregierte Daten», «Disaggregierte Daten mit lockerer MIV-Verfügbarkeit» und «Disaggregierte Daten mit strenger MIV-Verfügbarkeit» gibt es erkennbare Unterschiede. Die Verkehrsmittelwahl im Beispielfall mit aggregierten Daten weist die höchste Zeitelastizität auf. Dort ist auch die grösste Auswirkung einer Reisezeitreduktion auf die Verkehrsmittelwahl zu erkennen. Im Extremfall zeigt sich eine Veränderung der Verkehrsmittelwahl im aggregierten Beispielfall um 4.8 %, gegenüber 0.9 % im disaggregierten Beispielfall mit strenger MIV-Verfügbarkeit.

Auch zwischen den beiden disaggregierten Beispielfällen sind Unterschiede zu erkennen. Wird der Autoverfügbarkeit gebührend Rechnung getragen, wie dies im Beispielfall mit strenger MIV-Verfügbarkeit abgebildet ist, entsteht erwartungsgemäss die kleinste Verschiebung der Verkehrsmittelanteile. Daraus könnte geschlossen werden, dass eine hohe angebotssensitive Relevanz der Mobilitätswerkzeugbesitzverhältnisse vorliegt. Da im Rahmen dieser Masterarbeit nur die beiden Verkehrsmittel MIV und ÖV verglichen wurden, lässt sich noch keine belastbare Aussage zu den nötigen Mobilitätswerkzeugbesitzmodellen treffen. Als Gegenstand weiterer Fallstudien empfiehlt es sich, weitere Verkehrsmittel und zusätzlich eine Umsetzung inklusive Führerscheinbesitz und Autoverfügbarkeit zu berücksichtigen.

Die Verwendung von Zonenmittelwerten für die Ermittlung der Verkehrsmittelanteile im Beispielfall mit aggregierten Daten hat zu einer deutlichen Verzerrung, dem Aggregation Bias, geführt. Die relative Veränderung der Verkehrsmittelanteile beträgt im Extremfall das 14-Fache wie beim Beispielfall mit disaggregierten Daten und strenger MIV-Verfügbarkeit. Der Extremfall ist erwartungsgemäss bei ausgeglichenen Verkehrsmittelanteilen (im Szenario Agglo) anzutreffen.

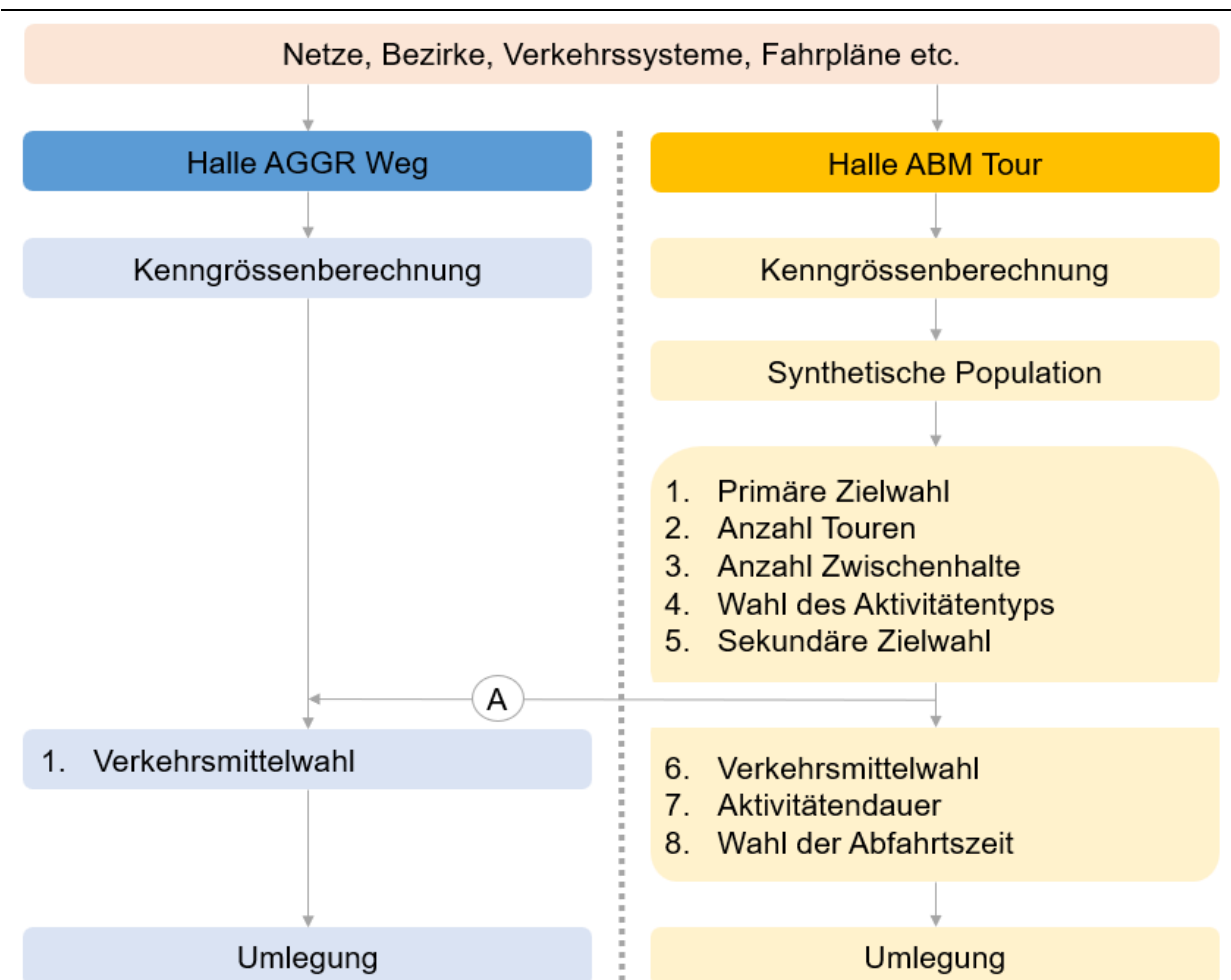
Für die Implementierung des tourenbasierten Verkehrsmittelwahlmodells in Halle lässt sich aus diesen Erkenntnissen zum einen ableiten, dass ein belastbares ÖV-Abonnementsbesitzmodell umgesetzt werden muss, und zum anderen, dass auch weitere Verkehrsmittel wie Fuss- und Veloverkehr mitberücksichtigt werden sollten.

## 4 Umsetzung zweier Verkehrsmittelwahlmodelle

### 4.1 Einführung

In diesem Kapitel wird die Entwicklung, Kalibrierung und Validierung der beiden Verkehrsmittelwahlmodelle beschrieben anhand derer später (Kapitel 5) die Wirkung des Aggregation Bias abgeschätzt werden soll. Um einen aussagekräftigen Vergleich zu ermöglichen, werden zwei Verkehrsmittelwahlmodelle umgesetzt, die aber auf den gleichen Grundlagedaten basieren. Beim ersten Modell handelt es sich um ein disaggregiertes und tourenbasiertes Verkehrsmittelwahlmodell (Halle ABM Tour). Auf der Nachfrage des ersten Modells aufbauend wird das aggregierte und wegbasierte Verkehrsmittelwahlmodell (Halle AGGR Weg) implementiert. Die Abb. 12 gibt einen Überblick über den Aufbau der beiden Verkehrsmittelwahlmodelle.

Abb. 12: Aufbau der beiden zu vergleichenden Verkehrsmittelwahlmodelle



Quelle: Eigene Darstellung

Die Schritte der Verkehrserzeugung und Verkehrsverteilung aus dem klassischen 4-Stufen-Ansatz werden im aggregierten Modell Halle AGGR Weg nicht modelliert. Stattdessen erfolgt nach der sekundären Zielwahl aus dem disaggregierten Modell Halle ABM Tour eine Aggregation der Nachfrage. Die Aggregation in Schritt A (vgl. Abb. 12) wird mittels R-Skript umgesetzt. Zum Zeitpunkt der Aggregation liegt im Modell Halle ABM Tour eine disaggregierte Nachfrage in Form von Wegen vor, die im Modell «Trips» genannt werden. Diese Nachfrage wird nach Verkehrszwecken auf Bezirksebene aggregiert und über den Verfahrensablauf von PTV Visum in das Modell Halle AGGR Weg geladen.

Ziel dieses Vorgehens ist es, zwei Modelle mit identischem Netz und gleicher Verkehrsverteilung zu implementieren. Dadurch kann bei Modellierungen auf Massnahmenebene isoliert die Wirkung des Aggregation Bias auf die Verkehrsmittelwahl analysiert werden. Die vorliegenden Strukturgrößen und Infrastrukturangebote sind in beiden Modellen identisch. Einzelne personenspezifische Attribute wie die Mobilitätswerkzeugbesitzquoten wurden für das Modell Halle AGGR Weg ebenfalls auf Bezirksebene als Durchschnittswerte zusammengefasst. Die umgesetzten Anpassungen an den beiden Modellen werden in den nachfolgenden Kapiteln 4.2 und 4.3 genauer erläutert.

Da in dieser Masterarbeit bei der Betrachtung des Aggregation Bias der Fokus auf die Verkehrsmittelwahl gelegt wird und die Verkehrserzeugung sowie die Verkehrsverteilung für beide Modelle in identischer Weise verwendet werden (vgl. Abb. 12), wird darauf verzichtet, eine vollständige Übersicht über alle Modellschritte und Parameter zu geben. In den nachfolgenden Kapiteln liegt der Fokus demnach auf den für die Verkehrsmittelwahl benötigten Kennzahlen. Beide Modelle, also Halle AGGR Weg und Halle ABM Tour, sind als PTV-Visum-Datei auf der GitLab-Plattform der FHNW verfügbar<sup>7</sup>.

#### 4.1.1 Grundmodell ABM Halle

Um ein besseres Verständnis für die Modellgrösse und -funktion zu erhalten, wird kurz das Grundmodell ABM-Halle, das mit der PTV Visum Software mitgeliefert wird, in seinem Aufbau erklärt. Auf eine tiefergehende Beschreibung des Aufbaus der aktivitätenbasierten Modelle in PTV Visum wird verzichtet. Weiterführende Informationen sind im Handbuch der PTV Group (2020) zu finden.

##### Netz-, Bevölkerungs- und Strukturdaten

Das Grundmodell ABM Halle ist ein aktivitätenbasiertes Modell (ABM) der Stadt Halle, das mit der Software PTV Visum mitgeliefert wird. Das ABM erzeugt für jede Person der Bevölkerung einen kompletten Tagesplan mit allen Aktivitäten und den zugehörigen Wegen. Die synthetische Bevölkerung besteht aus 232'710 Personen, die insgesamt 139'220 Haushalten zugeordnet sind. Jeder Haushalt ist einem der 60 Bezirke zugeteilt. Die Bezirke sind durch Anbindungen mit dem Streckennetz verbunden. Ergänzend dazu ist ein fahrplanfeines ÖV-Angebot im Modell enthalten. Auf Basis dieser Netzdaten werden die notwendigen Kenngrößenmatrizen berechnet.

<sup>7</sup> [https://gitlab.fhnw.ch/fhnw\\_vm/doku\\_master\\_thesis\\_fabio\\_cachaco/-/tree/main/](https://gitlab.fhnw.ch/fhnw_vm/doku_master_thesis_fabio_cachaco/-/tree/main/)

## Modellaufbau

Das ABM Halle ist grob in zwei Teile unterteilt. Im ersten Teil werden alle notwendigen Kenngrößen berechnet, die später in Entscheidungsmodellen verwendet werden. Diese Berechnungen sind im Verfahrensablauf definiert. Sie unterscheiden sich nicht von denen, die in herkömmlichen aggregierten Nachfragemodellen zu finden sind. Im zweiten Teil wird ein Skript ausgeführt, das die Mobilitätsentscheidungen aller einzelnen Personen individuell simuliert. Diese Python-Skripte führen folgende Modellberechnungen durch:

- Langfristige Entscheidungen zum Arbeits- und/oder Ausbildungs-/Schulplatz (Zielwahl)
- Anzahl der Touren, die durchgeführt werden
- Anzahl der Zwischenhalte einer Tour zwischen dem Wohnort und der Hauptaktivität
- Anzahl der Zwischentouren, die bei der Hauptaktivität starten und wieder enden
- Wahl des Aktivitätentyps der Zwischenhalte
- Sekundäre Zielwahl
- Moduswahl (Major and Minor Mode Choice)
- Wahl der Dauer der Aktivitätsausübungen
- Wahl der Abfahrtszeit aller Wege

Nach der Simulation aller einzelnen Entscheidung werden die Ergebnisse in geeignete Attribute des Modells geschrieben.

## 4.2 Weiterentwicklung zum disaggregierten Verkehrsmodell Halle ABM Tour

Als Grundlage für die Weiterentwicklung zum Verkehrsmodell Halle ABM Tour dient das von PTV Visum zur Verfügung gestellte aktivitätenbasierte Modell (ABM) der Stadt Halle. Das Modell modelliert das Mobilitätsverhalten für jede Person der Bevölkerung individuell. Dazu verwendet das Beispiel eine synthetische Bevölkerung. Die notwendigen Netz- und Strukturdaten sind ebenfalls im Modell enthalten. Das ABM Halle erzeugt für jede Person der Bevölkerung einen kompletten Tagesplan mit allen Aktivitäten und den zugehörigen Wegen (Trips).

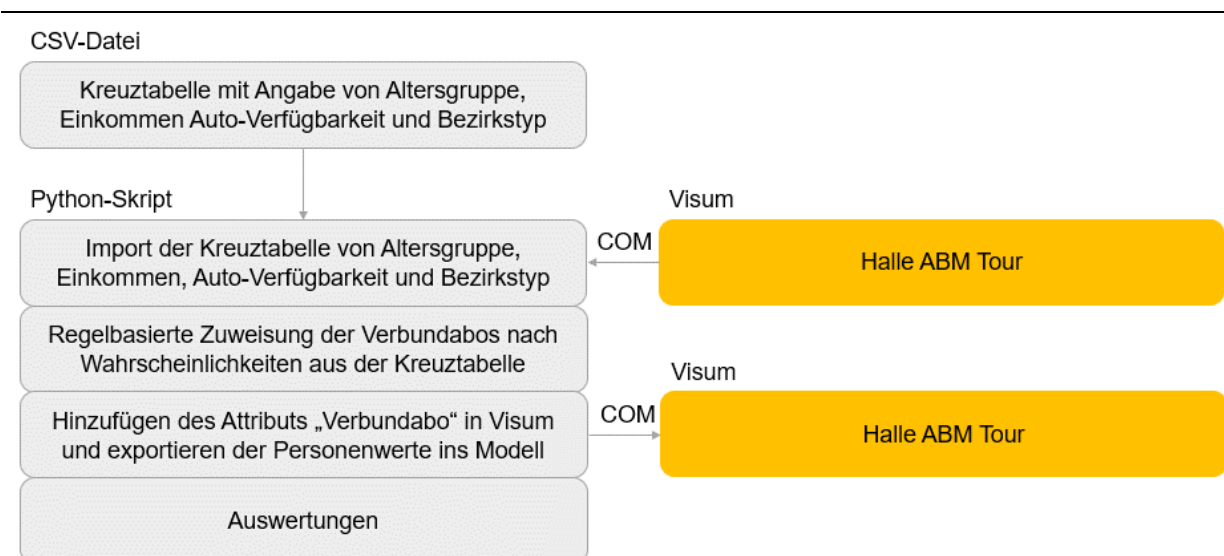
Die im Grundmodell enthaltene synthetische Bevölkerung und ihre Eigenschaften ähneln einer üblichen modellhaften Schweizer Bevölkerungen bereits sehr. Was derzeit in der synthetischen Population noch fehlt, ist die Information des ÖV-Abonnementsbesitzes. Kapitel 4.2.1 beschreibt die notwendigen Schritte zur Implementierung eines zusätzlichen Attributs, das den Besitz eines ÖV-Abonnements für jede im Modell enthaltene Person abbildet. Die Personen erhalten ein fiktives Verbundabonnement für die Region Halle. Nach erfolgter Anpassung als zweiter Schritt die verfügbaren Nutzenfunktionen der Verkehrsmittelwahl so erweitert, dass der Besitz dieses Verbundabonnements bei der Berechnung des Nutzens der ÖV-Alternative adäquat berücksichtigt wird (siehe Kapitel 4.2.2).

#### 4.2.1 Anpassung der synthetischen Population

Die synthetische Population im Grundmodell ABM Halle enthält bereits eine Vielzahl von perso- nenspezifischen Merkmalen, die für die Entscheidungsmodelle herangezogen werden. Vor der Überarbeitung wurden zur Berechnung der Verkehrsmittelwahl auf Personenebene nur die Ver- fügbarkeit eines Autos und die Angabe verwendet, ob es sich um eine in der Ausbildung befin- dende Person handelt. Die Erweiterung um die Information des Besitzes eines Verbundabonne- ments erfolgt regelbasiert. Um bei der Zuweisung die Korrelationen zwischen Altersgruppe, Ein- kommen und Verfügbarkeit eines Autos zu berücksichtigen, wird eine aus dem schweizerischen Mikrozensus für Mobilität und Verkehr (MZMV) abgeleitete Kreuztabelle verwendet.

Die Umsetzung dieses Arbeitsschritts erfolgt mittels eines Python-Skripts. Das Skript verwendet für den Import und Export der Daten aus dem PTV-Visum-Modell die COM-Schnittstelle. Die not- wendigen Informationen können über die verschiedenen Attributnamen in Python importiert wer- den und stehen dort für die weitere Verwendung zur Verfügung. Der Ablauf zur Implementation der Verfügbarkeit eines Verbundabonnements ÖV-Abonnements wird in der nachfolgenden Abb. 13 dargestellt.

Abb. 13: Ablauf zur Implementation des Verbundabonnements



Quelle: Eigene Darstellung

Das verwendete Skript ist auf der GitLab-Plattform der FHNW hochgeladen worden<sup>8</sup>. Als Ergebnis enthält nun jede der knapp über 230'000 Personen im Modell die Information, ob sie ein ÖV-Abonnement besitzt oder nicht. Die einzelnen Mittelwerte nach Altersgruppe, Einkommen, Auto-Verfügbarkeit und Bezirkstyp sind in der nachfolgenden Tab. 10 festgehalten. Wie aus der

<sup>8</sup> [https://gitlab.fhnw.ch/fhnw\\_vm/doku\\_master\\_thesis\\_fabio\\_cachaco/-/blob/main/03\\_mod\\_verbundabo/2\\_halle\\_mod\\_verbundabo.ipynb](https://gitlab.fhnw.ch/fhnw_vm/doku_master_thesis_fabio_cachaco/-/blob/main/03_mod_verbundabo/2_halle_mod_verbundabo.ipynb)

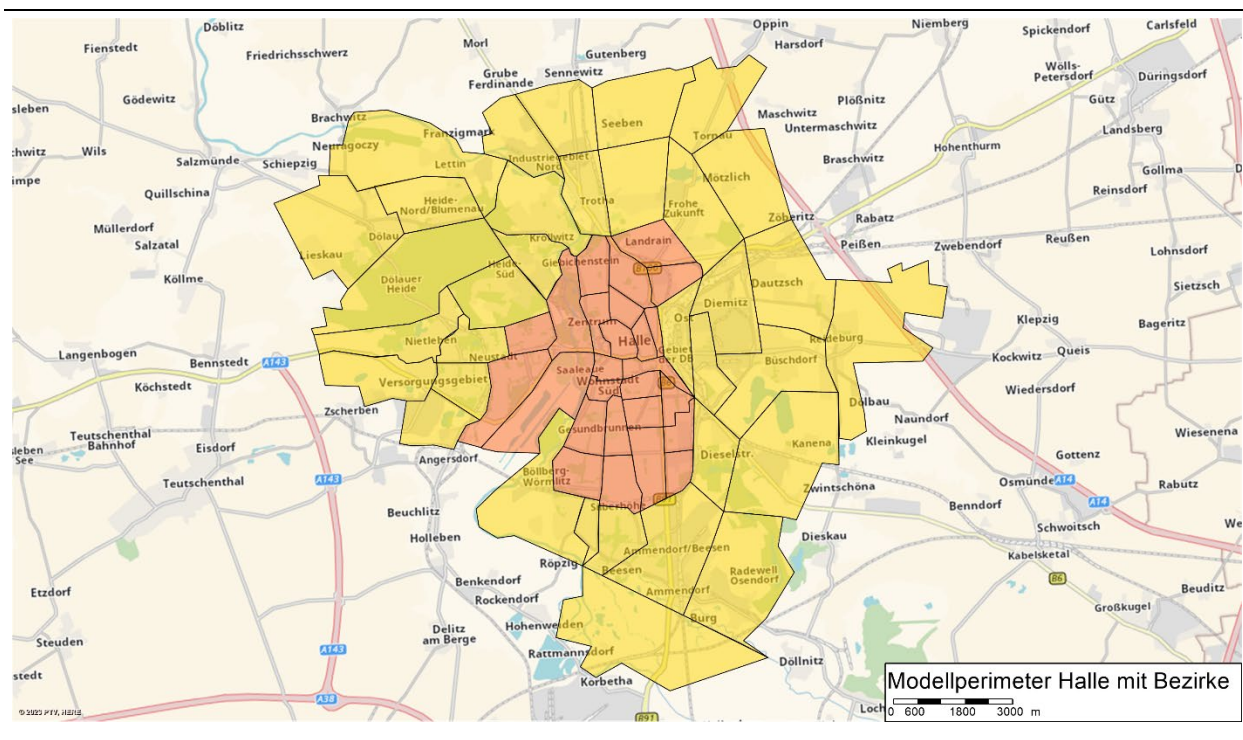
Gegenüberstellung zu erkennen ist, entsprechen die zugewiesenen Werte ungefähr jenen des Mikrozensus 2015 (Biedermann u. a. 2017). Die Mittelwerte des Verbundabonnementsbesitzes pro Bezirk wurden in das aggregierte Modell Halle AGGR Weg übertragen, sodass beide Modelle auf der identischen Ausgangsdatenbasis operieren.

Tab. 10: Übersicht des Besitzes eines Verbundabonnements nach Eigenschaften

<b>Eigenschaft</b>	<b>Wert im MZMV</b>	<b>Wert in Visum</b>
Altersgruppe bis 18 Jahre	51.7%	45.9%
Altersgruppe 18 bis 24 Jahre	49.2%	46.4%
Altersgruppe 25 bis 64 Jahre	32.7%	33.4%
Altersgruppe 65 bis 74 Jahre	27.1%	26.7%
Altersgruppe 75 Jahre und älter	31.7%	30.9%
Einkommen unter 2'000 CHF	32.8%	28.1%
Einkommen zwischen 2'000 und 4'000 CHF	32.5%	30.0%
Einkommen zwischen 4'000 und 6'000 CHF	32.4%	29.5%
Einkommen zwischen 6'000 und 8'000 CHF	36.6%	34.9%
Einkommen zwischen 8'000 und 10'000 CHF	35.7%	34.1%
Einkommen zwischen 10'000 und 12'000 CHF	40.5%	39.3%
Einkommen zwischen 12'000 und 14'000 CHF	38.3%	36.4%
Einkommen zwischen 14'000 und 16'000 CHF	41.1%	39.3%
Einkommen über 16'000 CHF	36.1%	34.2%
Bezirkstyp Kernstadt	38.1%	37.9%
Bezirkstyp Vorort	33.4%	32.1%

Im Grundmodell ABM Halle waren drei unterschiedliche Bezirkstypen vorhanden. Typ 1 entspricht der Altstadt von Halle, Typ 2 entspricht der Kernstadt und Typ 3 entspricht den etwas weniger dicht besiedelten Vororten und äusseren Bezirken von Halle. Da für die Zuteilung gemäss der Kreuztabelle die Mobilitätsbesitzquoten nach der Kategorisierung «Raum mit städtischem Charakter 2012» (Goebel und Kohler 2014) vorliegen, wurden zwei Bezirke aus dem Modell vom Typ 1 in den Typ 2 verschoben. Damit enthält das Modell Halle ABM Tour nur noch Bezirke in den Typen 2 (Kernstadt) und 3 (Vorort). Dieselben Schritte wurden auch für das aggregierte Modell Halle AGGR Weg durchgeführt. Insgesamt sind 26 Bezirke dem Typ 2 und 34 Bezirke dem Typ 3 zugeordnet (vgl. Abb. 14). Für alle 60 Bezirke ist eine Nachfrage vorhanden.

Abb. 14: Modellperimeter unterteilt in Bezirke



Quelle: Eigene Darstellung (orange = Typ 2 Kernstadt und gelb = Typ 3 Vorort)

#### 4.2.2 Definition der Nutzenfunktion für die Verkehrsmittelwahl

Im Modell Halle ABM Tour sind für unterschiedliche Entscheidungsmodelle auch verschiedene Nutzenfunktionen implementiert. So verwendet das Modell bspw. für die Zielwahl (Schritt 1 und 5, vgl. Abb. 12) andere Variablen und Parameterwerte als für die Verkehrsmittelwahl. Im Grundmodell ABM Halle sind drei VHG definiert, für die jeweils leicht andere Parameterwerte festgelegt wurden. Die drei VHG «Schülerinnen und Schüler sowie Studierende» (ModeStu), «Personen mit Auto-Verfügbarkeit» (ModeWithCar) und «Personen ohne Auto-Verfügbarkeit» (ModeWithoutCar) bestehen auch im aktuellen Modell und erfuhren keine Änderung. Um die Nutzenfunktion im Vergleich zum aggregierten Modell Halle AGGR Weg in einer möglichst ähnlichen Struktur aufzubauen, mussten jedoch mehrere Variablen und Parameter hinzugefügt werden. Die verwendeten Parameterwerte stehen im Verhältnis zu den Nutzenparametern der Stated-preference-Studien des ARE (Weis u. a. 2017) und stammen grösstenteils aus dem GVM Basel. Eine Übersicht hierzu findet sich in Tab. 11.

Die Berechnung des Nutzens erfolgt für die vier Verkehrsmittelalternativen Fussverkehr (Fuss), Veloverkehr (Velo), öffentlicher Verkehr (ÖV) und motorisierter Individualverkehr (MIV). Die Parameter der verschiedenen Konstanten werden jeweils mit personenspezifischen Attributen oder mit Matrizenwerten multipliziert. Für die Ermittlung der Auswahlwahrscheinlichkeiten und der

relativen Verkehrsmittelanteile wird dasselbe multinominale Logit-Modell (MNL) benutzt, das bereits bei den Fallbeispielen (vgl. 3.2.6) zur Anwendung gekommen ist.

Tab. 11: Verwendete Parameter für die Verkehrsmittelwahl im Modell Halle ABM Tour

Verkehrsmittel	Variable	Verhaltenshomogene Gruppe (VHG)		
		ModeStu	ModeWithCar	ModeWithoutCar
Fuss	Konstante	12.75	12.75	12.75
	Gehzeit	-0.05	-0.05	-0.05
	Umfwegfaktor Distanz	-0.10	-0.10	-0.10
	Einkaufsbonus Auto	-0.10	-0.50	0.00
Velo	Konstante	-1.63	-1.63	-1.63
	Gehzeit	-0.06	-0.06	-0.06
	Einkaufsbonus Auto	0.00	-1.00	-0.50
ÖV	Konstante	-2.80	-2.80	-2.80
	Reisekosten	-0.10	-0.10	-0.10
	Zugangs-, Geh- und Abgangszeit	-0.02	-0.02	-0.02
	Fahrzeit im Fahrzeug	-0.04	-0.04	-0.04
	Umsteigehäufigkeit	-0.21	-0.21	-0.21
	Start- und Umsteigewartezeit	-0.01	-0.01	-0.01
	Verfügbarkeit Verbundabo	2.00	2.00	2.00
	Einkaufsbonus Auto	-0.30	-1.00	-0.50
MIV	Konstante	-1.51	-1.51	-1.51
	Reisekosten	-0.10	-0.10	-0.10
	Zugangszeit	-0.12	-0.12	-0.12
	Reisezeit	-0.04	-0.04	-0.04
	Verfügbarkeit Verbundabo	-2.00	-2.00	-2.00
	Einkaufsbonus Auto	0.30	1.50	0.00

Die Zugangszeit für die Alternative MIV wurde auf Bezirksebene in Abhängigkeit von der räumlichen Dichte für die Bezirke Kernstadt und Vororte differenziert und findet in der Nutzenfunktion bei den Quell-Bezirken Anwendung. Beginnt ein Weg in einem Quell-Bezirk der Kernstadt, so wird der Parameter mit dem Wert 2 und mit dem Wert 1 bei Vorort multipliziert.

### 4.2.3 Beispiel für die Umsetzung der disaggregierten Nutzenfunktion

Jeder Modellschritt der Verkehrsmittelwahl bezieht sich auf ein bestimmtes PTV-Visum-Objekt. So bezieht sich z. B. die Verkehrsmittelwahl der VHG ModeStu nur auf Personen, die sich in Ausbildung befinden. Die dafür notwendigen Filterdefinitionen sind in einer Liste enthalten. Auch die Nutzendefinitionen mit den benötigten Parametern sind in Listen enthalten. Für das gleiche Beispiel wie eben zeigt die untenstehende Abb. 15 jeweils die verwendeten Variablen (Personenattribute in der Spalte «Attribute expression» und Matrixwerte unter «MatrixExpr») für die vier Verkehrsmittelalternativen Velo, MIT, ÖV und Fuss.

Abb. 15: Modellparameter für die Verkehrsmittelwahl der VHG ModeStu

Anzahl	Nr	Kommentar	Attribute expression	MatrixExpr	Bike	Car	PT	Walk
1	1		Value	Value	1.00	2.00	4.00	5.00
2	2	Verkehrsmittelspezifische Konstante	1	1	-2.05	-1.85	-3.22	23.95
3	3	Kosten Auto	1	0.6166*0.29*Matrix(1002)	0.00	-0.10	0.00	0.00
4	4	Kosten ÖV	1	1.03*0.235*Matrix(1007)	0.00	0.00	-0.10	0.00
5	5	Reisezeit Auto	1	Matrix(1002)	0.00	-0.04	0.00	0.00
6	6	Fahrzeit ÖV	1	Matrix(1008)	0.00	0.00	-0.04	0.00
7	7	Reisezeit Bike	1	Matrix(1001)	-0.06	0.00	0.00	0.00
8	8	Reisezeit Walk	1	0.9*Matrix(1017)*Matrix(1017)	0.00	0.00	0.00	-0.05
9	9	DID [km] mit 5km/h und Umwegfaktor 1.4 nach [min]	1	16.8*Matrix(1004)	0.00	0.00	0.00	-0.10
10	10	Verbundabo	[Schedule\Person\BC100]	1	0.00	-2.00	2.00	0.00
11	11	Autoverfügbarkeit	[Schedule\Person\CarAvail]	1	0.00	0.00	0.00	0.00
12	12	Einkaufsbonus Auto	[Activity\ID]=3	1	0.00	0.30	-0.30	-0.10
13	13	Umsteigehäufigkeit ÖV	1	Matrix(1005)	0.00	0.00	-0.21	0.00
14	14	Gehzeit ÖV	1	Matrix(1011)	0.00	0.00	-0.02	0.00
15	15	Zugangszeit ÖV	1	Matrix(1012)	0.00	0.00	-0.02	0.00
16	16	Abgangszeit ÖV	1	Matrix(1013)	0.00	0.00	-0.02	0.00
17	17	Startwartezeit ÖV	1	Matrix(1009)	0.00	0.00	-0.01	0.00
18	18	Umsteigewartezeit ÖV	1	Matrix(1010)	0.00	0.00	-0.01	0.00
19	19	Zugangszeit Auto	[Schedule\Person\CarAccess]	1	0.00	-0.12	0.00	0.00

Quelle: Eigene Darstellung

Die Besonderheit der Verkehrsmittelwahl im vorliegenden disaggregierten Modell besteht darin, dass sie zur endgültigen Festlegung des Verkehrsmittels in zwei Schritten vorgeht. Im ersten Schritt erfolgt die Verkehrsmittelwahl für eine Hauptaktivität, im zweiten Schritt für alle Nebenaktivitäten und jenen Aktivitäten, denen ein austauschbares Verkehrsmittel zugeteilt wurde. Enthält eine Tour die Aktivität Arbeit oder Ausbildung (primäre Aktivitäten bzw. langfristige Entscheidungen), entspricht diese primäre Aktivität immer auch der Hauptaktivität. Von den 232'710 Personen im Modell besitzen nur 23.6 % keine langfristige Entscheidung. Bei Personen ohne langfristige Entscheidung wird der erste Weg der Tour als verkehrsmittelbestimmende Aktivität festgelegt. Ist das gewählte Verkehrsmittel ein austauschbarer Modus, so wird der Hauptmodus noch nicht konkret festgelegt, sondern als austauschbar definiert. Die konkrete Wahl des Modus erfolgt im zweiten Schritt bei der Verkehrsmittelwahl für die Nebenaktivitäten. Hier wird für jeden Trip ein Verkehrsmittel gewählt. Die zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel entsprechen entweder jenem der Hauptaktivität oder können aus den austauschbaren Verkehrsmitteln gewählt werden.

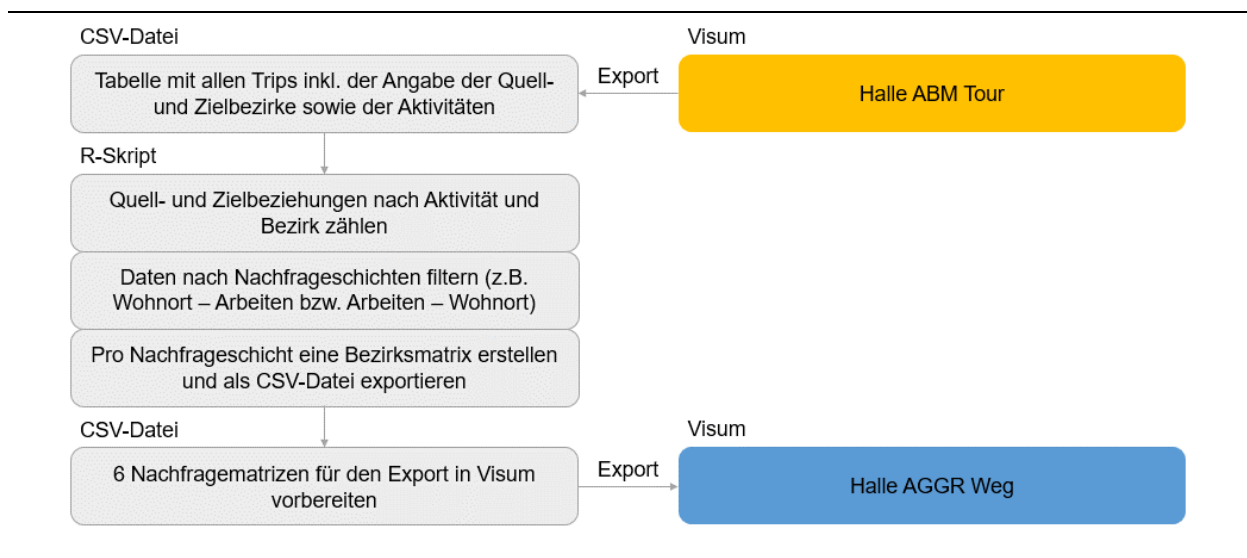
### 4.3 Implementierung des aggregierten Verkehrsmodells Halle AGGR Weg

Als Grundlage zur Implementierung des aggregierten Verkehrsmodells Halle AGGR Weg wurde ebenfalls auf die Netzdaten (Bezirke, Strecken, Knoten, ÖV-Angebot etc.) des Grundmodells ABM Halle zurückgegriffen. Als Nachfragemodell wurde im Unterschied zu Halle ABM Tour nicht ein aktivitätenbasiertes Modell gewählt, sondern der 4-Stufen-Ansatz. Damit kann auf die üblichen Funktionen des 4-Stufen-Ansatzes zugegriffen werden. Um zu verhindern, dass die Verkehrserzeugung und die Verkehrsverteilung (die ersten beiden Schritte des 4-Stufen-Ansatzes) bereits eine unterschiedliche Verkehrsnachfrage abbilden, wird die aus dem disaggregierten Modell Halle ABM Tour vorliegende Verkehrsverteilung aggregiert. Dadurch wird sichergestellt, dass nicht bereits andere Unterschiede der Nachfragemodellierung aus den vorhergehenden Modellschritten übernommen wird.

#### 4.3.1 Aggregation der Nachfrage

Zum Zeitpunkt der Aggregation liegt im Modell Halle ABM Tour eine disaggregierte Nachfrage in Form von Trips vor. Jeder Trip enthält die Information des Quell- und Zielbezirkes. Zusätzlich ist auch bereits die dort durchgeführte Aktivität (z. B. Einkaufen oder Ausbildung) bekannt. Diese Nachfrage wird nach Verkehrszwecken auf Bezirksebene aggregiert. Die Umsetzung dieses Arbeitsschritts erfolgt mittels des R-Skripts<sup>9</sup>. Der Ablauf zur Aggregation der Nachfrage wird in der nachfolgenden Abb. 16 dargestellt.

Abb. 16: Ablauf zur Aggregation der Nachfrage



Quelle: Eigene Darstellung

<sup>9</sup> [https://gitlab.fhnw.ch/fhnw\\_vm/doku\\_master\\_thesis\\_fabio\\_cachaco/-/blob/main/06\\_skripte\\_auswertung/4\\_abm\\_demand\\_to\\_aggr\\_matrices.R](https://gitlab.fhnw.ch/fhnw_vm/doku_master_thesis_fabio_cachaco/-/blob/main/06_skripte_auswertung/4_abm_demand_to_aggr_matrices.R)

Die Verkehrszwecke werden in sechs Nachfrageschichten aggregiert. Die Wahl der Nachfrageschichten hängt mit der Häufigkeit des auftretenden Trips zusammen. Der Trip Wohnort – Arbeiten tritt bspw. wesentlich häufiger auf als der Trip Ausbildung – Arbeiten. Da grundsätzlich die meisten Trips am Wohnort beginnen, wurden die Nachfrageschichten auch dementsprechend definiert. Die Aggregation wurde für die folgenden Nachfrageschichten durchgeführt:

Tab. 12: Aggregierte Nachfrage in sechs Nachfrageschichten

Nachfrageschichten	Anzahl Trips	Anteil
Wohnort – Ausbildung	91'732	7.3%
Wohnort – Freizeit	230'228	18.2%
Wohnort – Einkauf	166'839	13.2%
Wohnort – Arbeit	192'868	15.3%
Freizeit – Freizeit	187'244	14.8%
Andere – Andere	395'422	31.2%
Summe Trips	1'264'333	100%

In PTV Visum wurde die Nachfrage mittels der Funktion «Nachfrage aus Excel laden» in das Modell geladen. Die importierte Nachfrage ersetzt den üblichen Modellschritt der Verkehrsverteilung. Die beiden darauf aufbauenden letzten Schritte des 4-Stufen-Ansatzes, also die Verkehrsmittelwahl (Moduswahl) und die Verkehrsumlegung, werden nach üblichen aggregierten Verfahren durchgeführt. Die 1.26 Mio. Trips aus dem aggregierten Modell sind identisch mit der tatsächlich ausgeführten Anzahl Trips aus dem disaggregierten Modell im Basisszenario ohne Massnahmen. Bei der Berechnung von Massnahmen (vgl. Kapitel 5) ändert sich im disaggregierten Modell auch geringfügig die Verkehrsverteilung. Es wird darauf verzichtet, für jede einzelne Massnahme eine neue Verkehrsnachfrage im aggregierten Modell zu importieren.

#### 4.3.2 Definition der Nutzenfunktion

In aggregierten Modellen werden üblicherweise verkehrszweckspezifische Nutzenfunktion implementiert, welche auch verkehrszweckspezifische Parameter enthalten. Eine Differenzierung nach VHG ist eher unüblich, weshalb keine Umsetzung der drei VHG aus dem Modell Halle ABM Tour angestrebt wurde. Stattdessen wurden bei Halle AGGR Weg dieselben Variablen und Parameter wie beim Modell Halle ABM Tour implementiert, um die beiden Verkehrsmittelwahlmodelle möglichst ähnlich auszugestalten. Bis auf eine Ausnahme wurden für alle sechs Nachfrageschichten die identischen Nutzensegmente und Parameter verwendet. Um wie im disaggregierten Modell einen Einkaufsbonus für das Verkehrsmittel MIV umzusetzen, wurde bei der Nachfrageschicht Wohnort – Einkauf bei allen Verkehrsmittelalternativen eine zusätzliche (gemäss der Auftretenshäufigkeit der VHG im Modell Halle ABM Tour gewichtete) Variable hinzugefügt. Auch im Modell Halle AGGR Weg erfolgt die Berechnung des Nutzens für die vier Verkehrsmittelalternativen

Fussverkehr (Fuss), Veloverkehr (Velo), öffentlicher Verkehr (ÖV) und motorisierter Individualverkehr (MIV). Das Resultat der Moduswahl bilden Nachfragematrizen mit der Dimension von Bezirken, welche nach Nachfrageschicht und Verkehrsmittel differenziert sind. Bei sechs Nachfrageschichten und vier Verkehrsmitteln stehen für die Umlegung demnach 24 Matrizen bereit. Eine Übersicht der verwendeten Parameter findet sich in Tab. 13.

Tab. 13: Verwendete Parameter für die Verkehrsmittelwahl im Modell «Halle AGGR Weg»

Verkehrsmittel	Variable	Verkehrszweck	
		Arbeit, Ausbildung, etc.	Einkauf
Fuss	Konstante	15.25	15.25
	Gehzeit	-0.05	-0.05
	Umfwegfaktor Distanz	-0.10	-0.10
	Einkaufsbonus Auto		-0.52
Velo	Konstante	1.09	1.09
	Gehzeit	-0.07	-0.07
	Einkaufsbonus Auto		-0.30
ÖV	Konstante	1.43	1.43
	Reisekosten	-0.10	-0.10
	Zugangs-, Geh- und Abgangszeit	-0.02	-0.02
	Fahrzeit im Fahrzeug	-0.04	-0.04
	Umsteigehäufigkeit	-0.21	-0.21
	Start- und Umsteigewartezeit	-0.01	-0.01
	Verfügbarkeit Verbundabo	1.25	1.25
	Einkaufsbonus Auto		-0.66
MIV	Konstante	0.19	0.19
	Reisekosten	-0.10	-0.10
	Zugangszeit	-0.12	-0.12
	Reisezeit	-0.04	-0.04
	Verfügbarkeit Auto	2.00	2.00
	Einkaufsbonus Auto		1.01

### 4.3.3 Beispiel der aggregierten Nutzenfunktion

Zur Illustrierung wird im folgenden Beispiel die Nutzenfunktion für die Nachfrageschicht Einkauf und das Verkehrsmittel ÖV dargestellt. Die Variablen auf Bezirksebene holt sich PTV Visum aus den entsprechenden Matrizen (**Matrix**) oder direkt von den Bezirken (**FROM**). Die Parameter sind unter (**CONTEXT**) aufgeführt.

```
Matrix([CODE] = "WKT" & [MATRIXTYP] = 4 & [NSEGCODE] = "PT")
* CONTEXT[NACHFRAGESCHICHT\PT_WALKCOEFF]
+ Matrix([CODE] = "JRT" & [MATRIXTYP] = 4 & [NSEGCODE] = "PT")
* CONTEXT[NACHFRAGESCHICHT\PT_COSTCOEFF]*1.03*0.235
+ Matrix([CODE] = "ACT" & [MATRIXTYP] = 4 & [NSEGCODE] = "PT")
* CONTEXT[NACHFRAGESCHICHT\PT_WALKCOEFF]
+ Matrix([CODE] = "EGT" & [MATRIXTYP] = 4 & [NSEGCODE] = "PT")
* CONTEXT[NACHFRAGESCHICHT\PT_WALKCOEFF]
+ Matrix([CODE] = "OWTA" & [MATRIXTYP] = 4 & [NSEGCODE] = "PT")
* CONTEXT[NACHFRAGESCHICHT\PT_WAITCOEFF]
+ Matrix([CODE] = "TWT" & [MATRIXTYP] = 4 & [NSEGCODE] = "PT")
* CONTEXT[NACHFRAGESCHICHT\PT_WAITCOEFF]
+ Matrix([CODE] = "IVT" & [MATRIXTYP] = 4 & [NSEGCODE]= "PT")
* CONTEXT[NACHFRAGESCHICHT\PT_IVTCOEFF]
+ Matrix([CODE] = "NTR" & [MATRIXTYP] = 4 & [NSEGCODE]= "PT")
* CONTEXT[NACHFRAGESCHICHT\PT_NTRCOEFF]
+ FROM[BC100MEANZONE] * CONTEXT[NACHFRAGESCHICHT\PT_AVAILCOEFF]
+ CONTEXT[NACHFRAGESCHICHT\PT_CONST]
+ FROM[CARAVAILMEAN] * CONTEXT[NACHFRAGESCHICHT\PT_SHOPCOEFF]
```

Lesebeispiel für den Einkaufsbonus Auto in der letzten Zeile:

Pro Bezirk wird der Durchschnittswert der Autoverfügbarkeit (**FROM[CARAVAILMEAN]**) mit dem Parameter für den Einkaufsbonus Auto (**CONTEXT[NACHFRAGESCHICHT\PT\_SHOPCOEFF]**) multipliziert.

## 4.4 Kalibrierung, Validierung und Vergleich der beiden Verkehrsmodelle

### 4.4.1 Kalibrierung und Validierung der Verkehrsmodelle

Nach der Etablierung beider Verkehrsmodelle erfolgte eine Kalibrierung der Nutzenfunktion der Verkehrsmittelwahl. Die angepasste Nutzenfunktion wurde dahingehend kalibriert, dass die damit errechneten Verkehrsmittelanteile ähnlich sind wie im Zustand mit der unveränderten Nutzenfunktion im Grundmodell ABM Halle. Das übergeordnete Ziel stellte nicht eine möglichst realitätsnahe Replik des Mobilitätsverhaltens der Stadt Halle dar, sondern die Umsetzung von zwei Verkehrsmodellen mit ähnlichen Verkehrsmittelanteilen nach Distanz, Fahrtzweck und Trips. Aus diesem Grund wurde kein Vergleich der Umlegungsergebnisse mit Zählstellen vorgenommen.

In einem ersten Schritt wurden die Parameter aus dem GVMB unverändert in beiden Modellen übernommen und für einen ersten unkalibrierten Modelllauf angewendet. Anhand des

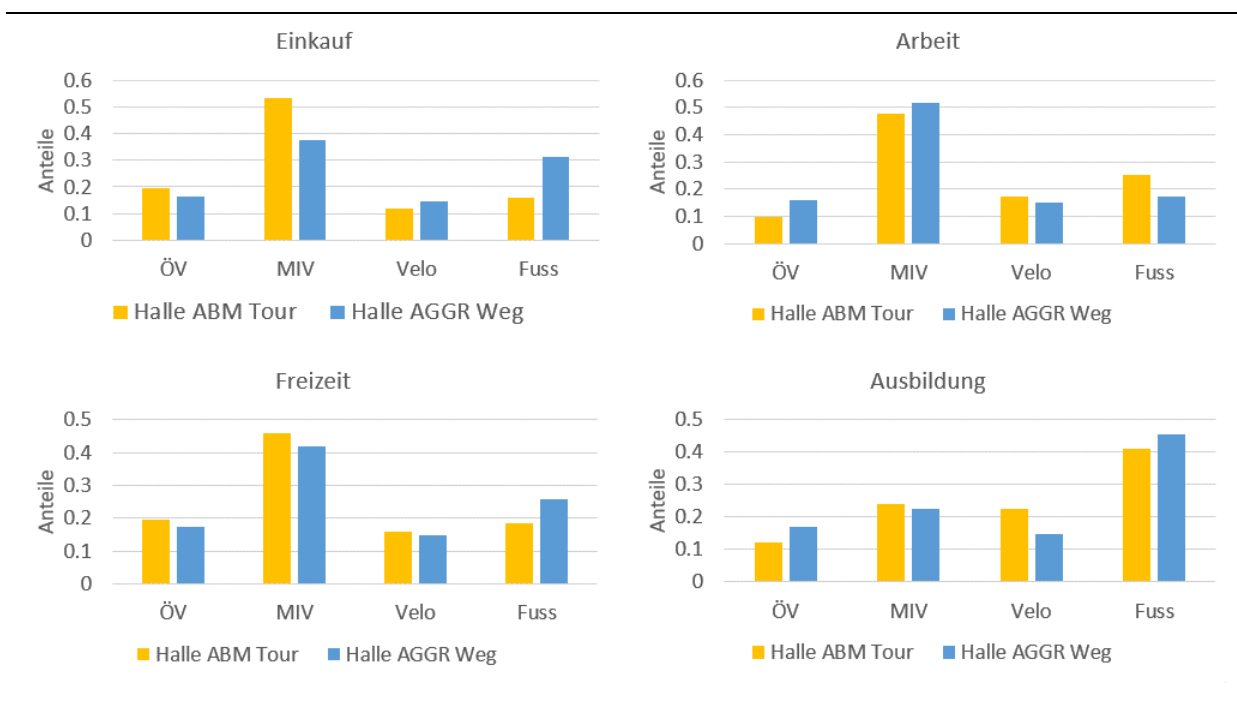
vorliegenden Resultats wurden die verkehrsmittelspezifischen Konstanten so weit verändert, dass die Verkehrsmittelanteile in beiden Modellen jenen des Grundmodells ABM Halle entsprechen. In Tab. 14 sind die Verkehrsmittelanteile nach Trips dargestellt.

Tab. 14: Vergleich der Verkehrsmittelanteile nach Trips aus den beiden Verkehrsmodellen

Modell	ÖV	MIV	Velo	Fuss
Halle AGGR Weg	17.3%	51.7%	15.6%	15.4%
Halle ABM Tour	18.3%	51.5%	15.2%	15.0%

Die Abb. 17 vergleicht für beide Modelle die Anteile der Trips für die einzelnen Verkehrszwecke. Über alles gesehen stimmen die Verteilungen der Kennwerte gut überein. Auffallend sind die etwas hoch ausfallenden MIV-Anteile für den Verkehrszweck Einkauf im disaggregierten Modell. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass der Einkaufsbonus für das Auto nicht in beiden Modellen auf die gleiche Art umgesetzt werden kann (vgl. Kapitel 4.3.2). Weiterhin zeigt sich bei gleichem Verkehrszweck ein etwas erhöhter Fussverkehrsanteil im aggregierten Modell.

Abb. 17: Vergleich der Verkehrsmittelanteile nach Verkehrszweck

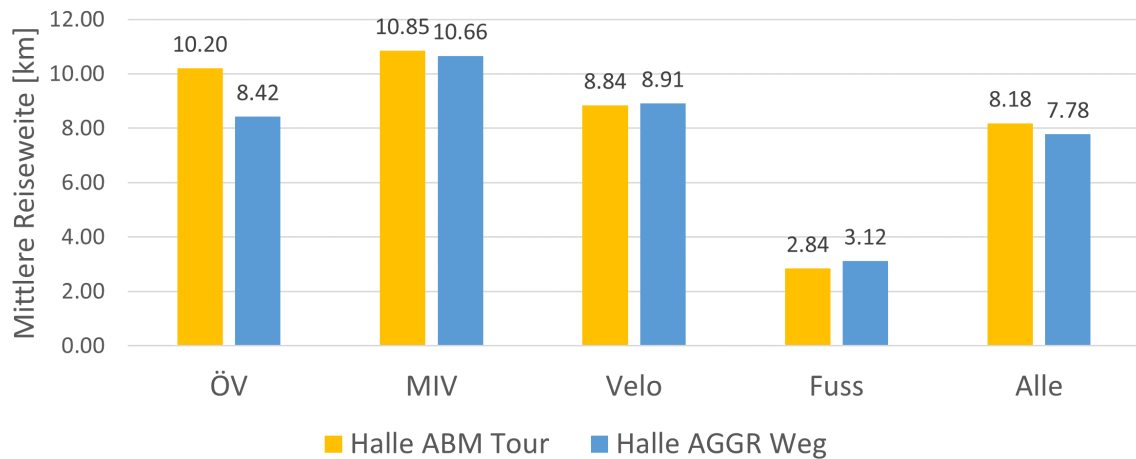


Quelle: Eigene Darstellung

Die Auswertung der mittleren Reiseweiten in der nachfolgenden Abb. 18 zeigt als grösste Auffälligkeit die deutlich niedrigere mittlere Reiseweite im ÖV beim aggregierten Modell Halle AGGR

Weg. Die restlichen Kennwerte sind in beiden Modellen ähnlich, wenn auch beispielsweise beim Velo- und Fussverkehr im Vergleich zum Schweizer Mikrozensus deutlich höher. So liegt im Vergleich die mittlere Etappenlänge für zu Fuss Gehende bei 0.9 km und Verwendung des Velos bei 3.3 km (Biedermann u. a. 2017).

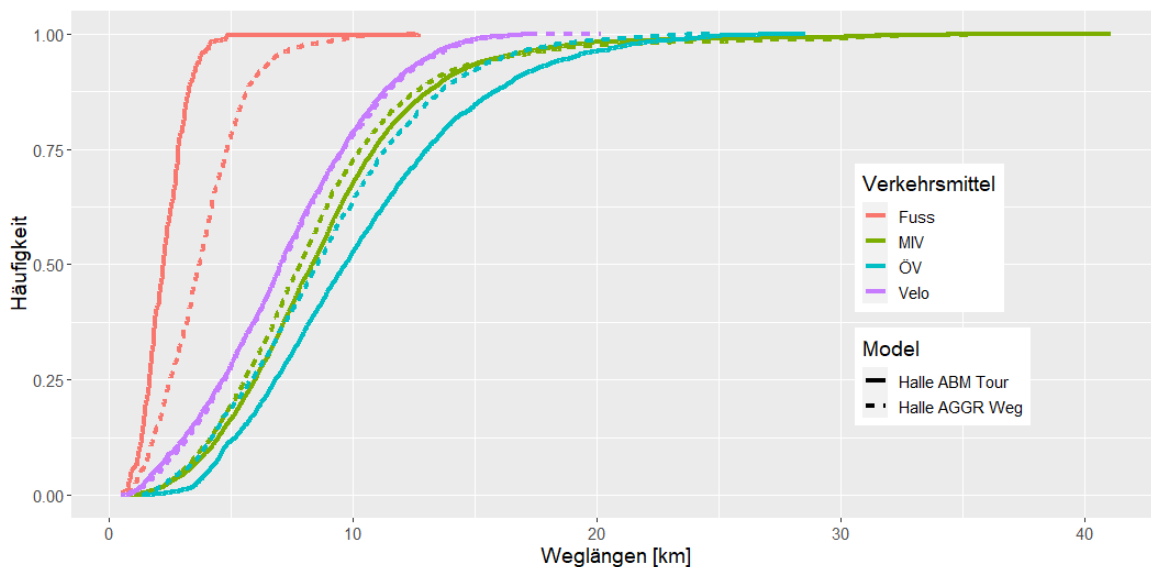
Abb. 18: Vergleich der mittleren Reiseweite nach Verkehrsmittel



Quelle: Eigene Darstellung

In Abb. 19 werden die Weglängenhäufigkeiten beider Modelle nach Verkehrsmittel dargestellt.

Abb. 19: Vergleich der Summenhäufigkeit der Weglängen nach Verkehrsmittel



Quelle: Eigene Darstellung

Auffällig sind die Unterschiede bei den Fussverkehrs- und ÖV-Weglängen, wo die Wege beim aggregierten Modell länger sind und dafür bei ÖV eher kürzer. Die Summenhäufigkeit der Weglängen bei MIV und Velo zeigen dagegen keine wesentlichen Unterschiede. Die Weglängen beim Velo scheinen auf den ersten Blick gar identisch zu sein. Auf eine Betrachtung der Weglängen nach Fahrtzwecken wurde aufgrund der bereits zufriedenstellenden Ergebnisse verzichtet. Da beide Modellarten die gleichen Netzdaten verwenden, wurde auf weiterführende Überprüfungen, z. B. des Netzmodells, verzichtet. Es wird davon ausgegangen, dass allfällige Abweichungen der Modellbelastungen keine Relevanz für die nachfolgenden Modellberechnungen aufweisen.

#### 4.4.2 Unterschiede der Verkehrsmittelwahlmodelle

Neben der differenzierteren Nutzenberechnung im disaggregierten Modell gegenüber dem aggregierten Modell ist ein weiterer wesentlicher Unterschied der Verkehrsmittelwahlmodelle bei den zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteln vorhanden. Beim aggregierten Modell Halle AGGR Weg stehen bei der Verkehrsmittelwahl alle Verkehrsmittel für jeden Trip zur Verfügung. Alle Verkehrsmittel zählen daher als austauschbar. Die Verkehrsmittelwahl erfolgt nicht für Einzelpersonen, sondern für die auf Bezirksebene vorliegende Verkehrsnachfrage, weshalb es keine Zuordnung von Hin- und Rückwegen gibt. Im Gegensatz dazu sind im disaggregierten Modell Halle ABM Tour die beiden Verkehrsmittel Velo und Auto nicht austauschbar. Das heisst: Wenn eine Tour mit dem Auto beginnt, endet sie auch automatisch mit dem Auto. Für allfällige Zwischentouren (z. B. Einkaufen über den Mittag vom Arbeitsort aus) stehen der jeweiligen Person alle anderen Verkehrsmittel wiederum zur Verfügung.

#### 4.5 Zwischenfazit zur Umsetzung der zwei Verkehrsmittelwahlmodelle

Die wohl wichtigste Erkenntnis für das Zwischenfazit ist, dass die Etablierung beider Verkehrsmittelwahlmodelle als erfolgreich zu bewerten ist. Beide Modelle reproduzieren fast identische Verkehrsmittelwahlanteile nach Distanz, Fahrtzweck und Trip. Für die vorliegende Masterarbeit reichen die zur Verfügung stehenden Modellparameter aus dem aggregierten GVMB aus. Zur Beantwortung von Fragen im Zusammenhang mit personenspezifischen Merkmalen oder zur Berechnung von Massnahmen mit einer starken Zeitdynamik empfiehlt es sich, empirische Studien zur Schätzung von Modellparametern durchzuführen, um das relevante Mobilitätsverhalten exakter abbilden zu können.

Der Rechenaufwand für das disaggregierte Modell ist deutlich höher als beim aggregierten Modell. Ein direkter Vergleich ist aufgrund der beiden fehlenden Modellschritte Verkehrserzeugung und Verkehrsverteilung beim aggregierten Modell nicht möglich. Dennoch betrug die Rechenzeit für die reine Verkehrsmittelwahl inkl. Umlegung im disaggregierten Modell mehr als das 25-Fache gegenüber dem aggregierten Modell (10 Sek. vs. 4 Min. 20 Sek.). Dabei wurden noch keine Iterationen berücksichtigt. Aufgrund der aber weiterhin geringen Rechenzeit des disaggregierten Modells stellte dies keine Herausforderung dar.

## 5 Abschätzung der Wirkung des Aggregation Bias

### 5.1 Einleitung und Definition der verkehrsplanerischen Massnahmen

In diesem Kapitel wird die Wirkung und die Relevanz des Aggregation Bias anhand des Vergleichs des aggregierten Modells Halle AGGR Weg mit dem disaggregierten Modell Halle ABM Tour untersucht. Die Abschätzung der Wirkung erfolgt durch eine Analyse der Berechnung von drei verkehrsplanerischen Massnahmen mit den beiden implementierten Modellen. Beide Modelle stellen ohne Massnahmen die Ausgangssituation in vergleichbarer Weise (vgl. Kap. 4.4) dar und entsprechen damit dem Basismodell. Für die effiziente Handhabung von verschiedenen Massnahmen stellt PTV Visum ein Massnahmen- bzw. Szenariomanagement zur Verfügung. Das Szenariomanagement verwendet drei wichtige Konzepte: Basisprojekt, Modifikation und Szenario (PTV Group 2020).

- Basisprojekt: Jedes Projekt baut auf einem Basismodell auf, das oft als Ausgangszustand, Analyse-Fall oder Null-Fall bezeichnet wird. Es ist in Form einer Versionsdatei gespeichert, der Basisversion. Halle ABM Tour und Halle AGGR Weg sind beides Basismodelle.
- Modifikation: Eine Modifikation ist eine oder eine Gruppe von Änderungen an Angebot oder Nachfrage, die inhaltlich zusammengehören. So könnte sich eine Modifikation auf den Bau einer Umgehungsstrasse beziehen und dann eine Reihe neu einzufügender Strecken, Änderungen an einigen existierenden Strecken und Anpassungen an den betroffenen Knoten umfassen. Eine andere Modifikation könnte die Einführung eines Tempolimits auf bestimmten Strassen beschreiben. Modifikation entspricht der eigentlichen Anpassungen am Modell.
- Szenario: Ein Szenario (auch Massnahme) entspricht einer zu untersuchenden Variante, oft auch als Planfall bezeichnet. Jedes Szenario bzw. jede Massnahme ergibt sich aus der Basisversion des Projekts durch Anwendung einer oder mehrerer Modifikationen. Die Unterscheidung zwischen Modifikation und Szenario hat den Vorteil, dass sehr leicht alle Kombinationen einer Menge von Massnahmen untersucht werden können.

Die drei verkehrsplanerischen Massnahmen werden in PTV Visum jeweils als Modifikation und Szenario umgesetzt, was einer 1:1-Beziehung entspricht. Kombinationen der verschiedenen Modifikationen zu Szenarien werden nicht untersucht.

#### 5.1.1 Verkehrsplanerische Massnahmen

Für die eingangs formulierte Forschungsfrage wurden drei relevante verkehrsplanerische Massnahmen definiert. Da die beiden Modelle nur den durchschnittlichen Werktagsverkehr (DWV) abbilden und keine stundenfeine Verkehrsnachfrage enthalten, umfassen die Massnahmen auch keine tageszeitspezifischen Verkehrslenkungsmassnahmen, wie z. B. Mobility Pricing. Bei der Massnahmenwahl wurde auf ein möglichst grosses Verkehrsmittelspektrum geachtet. Tab. 15 gibt eine Übersicht über die drei gewählten Massnahmen. Es werden insgesamt drei Hypothesen

aufgestellt. Zwei betreffen die allgemeine Wirkung, und eine Hypothese ist differenziert nur beim disaggregierten Modell Halle ABM Tour zu erwarten.

Tab. 15: Verkehrsplanerische Massnahmen

Nr.	Name	Kurzbeschreibung
M1	Erhöhung Fahrgeschwindigkeit Velo	Erhöhung Fahrgeschwindigkeit $v_0$ beim Velo von 15 km/h auf 20 km/h
M2	Einführung Parkierungsgebühr Innenstadt	In einem Innenstadtbereich wird eine Parkierungsgebühr für den MIV auf Ebene Zielbezirk simuliert.
M3	Einführung 9-Euro-Ticket	Etwa 40 % der synthetischen Bevölkerung erhalten ein 9-Euro-Ticket. Modellierung geringer Reisekosten im ÖV

Zur Analyse der Massnahmenwirkung wird vorgängig ein Analysekonzept entwickelt. Dieses beinhaltet pro Modellart eine differenzierte Hypothese zur jeweiligen Massnahmenwirkung. Zusätzlich wird definiert, mit welcher Methode (Verteilungen, Plots etc.) die Überprüfung der Hypothese erfolgt. Damit wird es möglich, nach Raum und Personengruppen differenzierte Aussagen zu den unterschiedlichen Massnahmenwirkungen abzuleiten. Ziel ist es, eine quantitative oder zumindest qualitative Abschätzung der Relevanz des Aggregation Bias zu erhalten.

## 5.2 Massnahme 1: Erhöhung Fahrgeschwindigkeit Velo

### 5.2.1 Beschrieb von Massnahme 1

Die erste Massnahme erhöht die Fahrgeschwindigkeit des Velos auf allen Strecken, auf denen das Velo als Verkehrsmittel zugelassen ist. Die Erhöhung der Geschwindigkeit von 15 km/h im Basisszenario auf 20 km/h mit Massnahme repräsentiert in vereinfachter Form eine deutliche Verbesserung der Veloverkehrsinfrastruktur. Die Massnahme erfordert in beiden Modellen Anpassungen im Netz auf Ebene der Streckentypen. Von dieser Änderung ausgeschlossen sind Strecken, die schon im Basisszenario nicht für das Verkehrsmittel Velo zugelassen sind. Dadurch werden für diese Analysen unerwünschte Routenwahleffekte vermieden.

### 5.2.2 Hypothesen zur Wirkung von Massnahme 1

Die Hypothesen zur Auswirkung aller nachfolgenden Massnahmen sind in mehrere Teile gegliedert. Im ersten Teil wird die erwartete allgemeine Wirkung beschrieben. Diese sollte grundsätzlich in beiden Modellen gleichermassen auftreten. Die folgenden Hypothesen umfassen differenziertere Aussagen auf Ebene der jeweiligen Modelle. Damit können weitergehende Analysen durchgeführt werden, die Aufschluss über den Aggregation Bias geben können. Zuletzt wird dargelegt, mit welcher Analysemethode die beschriebenen Auswirkungen untersucht werden. Für die Massnahme 1 werden in der nachfolgenden Tab. 16 drei Hypothesen aufgestellt.

Tab. 16: Hypothesen zur Wirkung von Massnahme 1

Nr.	Hypothese	Analysemethode
M1.1	<u>Wirkung allgemein</u> : Für beide Modelle wird aufgrund der erhöhten Fahrgeschwindigkeit und der damit verbundenen Reisezeitreduktion (höherer Nutzen) eine Erhöhung der Verkehrsmittelanteile des Velos erwartet.	Überprüfung mittels Vergleich der allgemeinen Verkehrsmittelanteile
M1.2	<u>Wirkung allgemein</u> : Im gleichen Zeitraum kann aufgrund der erhöhten Fahrgeschwindigkeit eine längere Distanz zurückgelegt werden. Erwartet wird bei beiden Modellen eine Erhöhung der Anteile von längeren Distanzen.	Überprüfung mittels Verteilung der Weglängen nach Distanzklassen
M1.3	<u>Wirkung differenziert</u> : Aufgrund der tourenbasierten Verkehrsmittelwahl wird eine überdurchschnittliche Zunahme der Wahl des Verkehrsmittels Velo für den ersten Trip einer Tour erwartet.	Überprüfung mittels Vergleich der Verkehrsmittelanteile auf Ebene des 1. Trips

### 5.2.3 Umsetzung von Massnahme 1

Die Implementierung der Massnahme Erhöhung Fahrgeschwindigkeit Velo konnte in beiden Modellen auf die gleiche Art und Weise erfolgen. Die rund 4'800 Strecken in beiden Modellen sind unterteilt in verschiedene Streckentypen. Die Streckentypen enthalten für jedes Verkehrssystem die maximale Fahrgeschwindigkeit im unbelasteten Netz. Auf Basis dieser Geschwindigkeiten erfolgt die Berechnung der IV-Kenngrössenmatrizen für das jeweilige Verkehrsmittel. Diese Kenngrössen werden wiederum in der Nutzenfunktion zur Berechnung der Verkehrsmittelwahl benötigt (vgl. Tab. 11 und Tab. 13). Bei allen 100 Streckentypen wurde die Fahrgeschwindigkeit des Velos von zuvor 15 km/h auf 20 km/h erhöht. Auf Strecken ohne Velo-Zulassung werden keine Änderungen gegenüber dem Basismodell vorgenommen.

## 5.3 Massnahme 2: Einführung Parkierungsgebühr Innenstadt

### 5.3.1 Beschrieb von Massnahme 2

Die zweite Massnahme modelliert die Einführung einer MIV-Parkierungsgebühr für neun Bezirke der Innenstadt. Bei allen Trips mit dem MIV, die als Zielbezirk einen dieser neun Bezirke haben, wird der Nutzen entsprechend reduziert. Keine Reduktion des Nutzens erfahren Trips, die zwar einen oder mehrere der betroffenen Bezirke passieren, aber nicht dort halten. Die Massnahme ist daher nicht als Kordonmaut zu verstehen, sondern entspricht einem Parkraummanagement. Trips innerhalb dieser neun Bezirke sind in beiden Modellen ebenfalls mit der Gebühr versehen.

### 5.3.2 Hypothesen zur Wirkung von Massnahme 2

Bei der zweiten Massnahme werden insgesamt vier Hypothesen aufgestellt (vgl. Tab. 17). Drei betreffen die allgemeine Wirkung, und eine Hypothese ist differenziert nur beim disaggregierten Modell Halle ABM Tour zu erwarten.

Tab. 17: Hypothesen zur Wirkung von Massnahme 2

Nr.	Hypothese	Analysemethode
M2.1	<u>Wirkung allgemein</u> : Für beide Modelle wird aufgrund der eingeführten Parkgebühr und der damit verbundenen Nutzenreduktion eine allgemeine Abnahme der Verkehrsmittelanteile des MIV erwartet.	Überprüfung mittels Vergleichs der allgemeinen Verkehrsmittelanteile
M2.2	<u>Wirkung allgemein</u> : In den Bezirken ausserhalb der neun Bezirke wird eine deutlich geringere Abnahme der MIV-Anteile erwartet.	Überprüfung mittels Visualisierung der Veränderung der Verkehrsmittelanteile auf Bezirksebene
M2.3	<u>Wirkung allgemein</u> : Aufgrund der Abnahme des Nutzens des MIV wird bei beiden Modellen erwartet, dass der Zuwachs an Verkehrsmittelanteilen schwerpunktmässig auf ÖV und Velo entfällt.	Überprüfung mittels Vergleichs der allgemeinen Verkehrsmittelanteile
M2.4	<u>Wirkung differenziert</u> : Aufgrund der tourenbasierten Verkehrsmittelwahl wird eine unterdurchschnittliche Wahl des Verkehrsmittels MIV für den ersten Trip einer Tour erwartet.	Überprüfung mittels Vergleichs der Verkehrsmittelanteile auf Ebene des 1. Trips

### 5.3.3 Umsetzung von Massnahme 2

Aufgrund der ungleichen Berechnungsart beider Modelle für die Verkehrsmittelwahl, erfolgte die Implementierung der Massnahme auf unterschiedliche Weise. Folglich wird die Umsetzung der Massnahme für jedes Modell separat beschrieben.

#### Umsetzung von Massnahme 2 im Modell Halle AGGR Weg

Das aggregierte Modell verwendet für die Nutzenberechnung bereits einige Variablen auf Bezirksebene, zum Beispiel die Zugangszeit. Die Implementierung der Massnahme erfolgt analog der Zugangszeit. Anstatt jedoch Wege mit einem negativen Nutzen für die Zugangszeit aufgrund der unterschiedlichen Dichte der Quellbezirke zu versehen, erfolgt bei der Parkierungsgebühr die Einführung eines negativen Nutzens auf Wege, die in einem der neun Bezirke ihr Ziel finden. Die Umsetzung der Massnahme besteht damit grob aus zwei Teilen:

1. Einführung eines neuen Attributs (Variable) auf Bezirksebene
2. Ergänzung der Nutzenfunktion um einen neuen Nutzenterm

Für die neun betroffenen Bezirke (Nr. 10 – 90, die Zählung der Bezirke erfolgt in Zehnerschritten) wurde das neue Attribut EGRESSTIMECAR mit dem Wert 10 versehen. Als Nutzenparameter für die Nutzenfunktion wurde der gleiche Wert verwendet, der für die Zugangszeit eingesetzt wurde (vgl. Tab. 13). Die Anpassung an der Nutzenfunktion für die Verkehrsmittelalternative MIV lautet wie folgt:

$$+ \text{TO}[\text{EGRESSTIMECAR}] * \text{CONTEXT}[\text{NACHFRAGESCHICHT} \setminus \text{C\_ACCEGRCOEFF}]$$

Die Variablen auf Bezirksebene holt sich PTV Visum aus den Zielbezirken, was im Nutzenterm mit (TO) abgebildet wird.

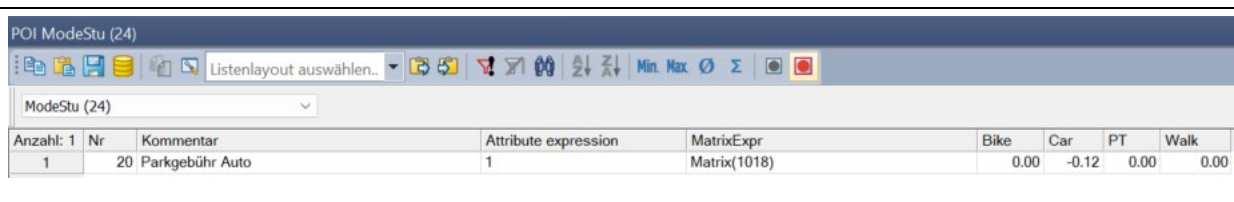
## Umsetzung von Massnahme 2 im Modell Halle ABM Tour

Das disaggregierte Modell verwendet für die Nutzenberechnung im Gegensatz zum aggregierten Modell keine Variablen auf Bezirksebene. Wie aus der Abb. 15 hervorgeht, werden zur Nutzenberechnung entweder personenspezifische Variablen (Personenattribute = Attribute expression) oder Variablen aus zuvor berechneten Matrizen (Matrixwerte = MatrixExpr) verwendet. Da Matrizen Kennwerte zwischen Von-Bezirken und Nach-Bezirken beinhalten und die Massnahme im Grunde nichts anderes als eine Gebühr für bestimmte Nach-Bezirke darstellt, wurde entschieden, die Umsetzung der Massnahme mithilfe einer neuen Matrix vorzunehmen. Die Umsetzung der Massnahme besteht damit auch in diesem Fall aus zwei wesentlichen Teilen:

1. Einführung einer neuen Matrix für die Verwendung in der Nutzenberechnung
2. Ergänzung der Nutzenfunktion um einen neuen Nutzenterm

Die neue Matrix (Nr. 1018) wurde im Netzmodell hinzugefügt. Bei allen Von-nach-Beziehungen, die einen der neun Nach-Bezirke enthalten, wurde der Wert 10 ergänzt. Als Nutzenparameter für die Nutzenfunktion wurde, wie beim aggregierten Modell, der gleiche Wert verwendet wie für die Zugangszeit (vgl. Abb. 15). Die Anpassung der Nutzenfunktion für die Verkehrsmittelalternative MIV präsentiert sich wie folgt:

Abb. 20: Ergänzung der Nutzenfunktion für die Massnahme 2 am Beispiel der VHG ModeStu



Anzahl: 1	Nr	Kommentar	Attribute expression	MatrixExpr	Bike	Car	PT	Walk
1	20	Parkgebühr Auto	1	Matrix(1018)	0.00	-0.12	0.00	0.00

Quelle: Eigene Darstellung

Die Ergänzung der Nutzenfunktion um den Nutzenterm erfolgte bei allen drei implementierten VHG, da eine Parkierungsgebühr naturgemäss nicht nur bei Personen mit verfügbarem Auto zählt, sondern bei allen Personen, wenn auch die Wirkung bei Personen ohne Auto gering ausfällt.

## 5.4 Massnahme 3: Einführung 9-Euro-Ticket

### 5.4.1 Beschrieb von Massnahme 3

Die dritte Massnahme soll die Auswirkung der Einführung eines 9-Euro-Tickets modellieren. Rund 40 % der synthetischen Bevölkerung erhalten ein 9-Euro-Ticket zugeteilt. Die Zuteilung erfolgt in derselben Weise wie die Implementierung der Verbundabo-Anteile (vgl. Kapitel 4.2.1). Im Vergleich zum Verbundabonnement sind es jedoch rund 15 % Personen mehr, die ein entsprechendes Ticket erhalten.

### 5.4.2 Hypothesen zur Wirkung von Massnahme 3

Bei der dritten Massnahme werden insgesamt drei Hypothesen aufgestellt (vgl. Tab. 18). Zwei betreffen die allgemeine Wirkung, und eine Hypothese ist differenziert nur beim disaggregierten Modell Halle ABM Tour zu erwarten.

Tab. 18: Hypothesen zur Wirkung von Massnahme 3

Nr.	Hypothese	Analysemethode
M3.1	<u>Wirkung allgemein:</u> Für beide Modelle wird aufgrund der Einführung des 9-Euro-Tickets eine allgemeine Erhöhung der Verkehrsmittelanteile des ÖV erwartet.	Überprüfung mittels Vergleichs der allgemeinen Verkehrsmittelanteile
M3.2	<u>Wirkung allgemein:</u> Da die Kosten im Vergleich zum MIV auch für lange ÖV-Reiseweiten sehr günstig sind, wird bei beiden Modellen eine Erhöhung der Anteile bei längeren ÖV-Distanzen erwartet.	Überprüfung mittels Verteilung der Weglängen nach Distanzklassen
M3.3	<u>Wirkung differenziert:</u> Aufgrund der disaggregierten Verkehrsmittelwahl und der Beziehung zwischen ÖV und Fusswegen (z. B. für Zwischentouren) wird von einer Erhöhung des Fussverkehrsanteils im disaggregierten Modell ausgegangen. Beim aggregierten Modell wird analog den anderen Verkehrsmitteln auch beim Fussverkehr eine Abnahme der Anteile erwartet.	Überprüfung mittels Vergleichs der allgemeinen Verkehrsmittelanteile und der Wegabfolgen

### 5.4.3 Umsetzung von Massnahme 3

Die Umsetzung der dritten Massnahme erfolgt auf die gleiche Art und Weise wie die Implementierung des Verbundabonnementsbesitzes. Das Python-Skript so angepasst, dass insgesamt einer um 15 % höher liegende Besitzquote des Verbundabonnements erfolgt. Die Zuweisung des 9-Euro-Tickets erfolgt auf Basis derselben Kreuztabelle, die aus den Daten des schweizerischen Mikrozensus für Mobilität und Verkehr (MZMV) abgeleitet wurde, und berücksichtigt die Korrelationen zwischen Altersgruppe, Einkommen und Verfügbarkeit eines Autos. Das Skript verwendet für den Import und Export der Daten aus PTV Visum die COM-Schnittstelle.

#### Umsetzung von Massnahme 3 im Modell Halle AGGR Weg

Die Mittelwerte des Verbundabonnementsbesitzes pro Bezirk wurden in das aggregierte Modell Halle AGGR Weg übertragen. Dafür wurde ein neues Attribut NEUNEUROTICKET angelegt, das bei der aggregierten Verkehrsmittelwahl verwendet werden kann. Die Anpassung an der aggregierten Nutzenfunktion für die Verkehrsmittelalternative ÖV lautet wie folgt:

$$+ \text{FROM}[\text{NEUNEUROTICKET}] * \text{CONTEXT}[\text{NACHFRAGESCHICHT} \backslash \text{PT\_9EUROCOEFF}]$$

Die Variablen auf Bezirksebene holt sich PTV Visum aus den Zielbezirken, was im Nutzenterm mit (FROM) abgebildet wird. Die Parameter sind unter (CONTEXT) aufgeführt.

## Umsetzung von Massnahme 3 im Modell Halle ABM Tour

Im Gegensatz zur Umsetzung der Massnahme 2 mithilfe einer Matrix, erfolgt für die Massnahme 3 eine Implementierung mithilfe einer personenspezifischen Variable (Personenattribut = Attribute expression). Die Anpassung der Nutzenfunktion wird in der nachfolgenden Abb. 21 dargestellt. Die Ergänzung der Nutzenfunktion um den Nutzenterm erfolgte bei allen drei implementierten VHG.

Abb. 21: Ergänzung der Nutzenfunktion für die Massnahme 3 am Beispiel der VHG ModeStu

Anzahl	Nr	Kommentar	Attribute expression	MatrixExpr	Bike	Car	PT	Walk
1	20	9 Euro Ticket	[Schedule\Person\NEUNEUROTICKET]	1	0.00	0.00	3.00	0.00

Quelle: Eigene Darstellung

## 5.5 Analyse der Massnahmenwirkungen

In diesem Kapitel wird die Wirkung der drei Massnahmen jeweils mit dem aggregierten und dem disaggregierten Modell berechnet und anhand der vordefinierten Methoden analysiert. Die Analyse geht auf die zuvor aufgestellten Hypothesen ein und versucht diese zu widerlegen oder zu bestätigen. Sie beginnt bei allen Massnahmen mit der Offenlegung der Verkehrsmittelanteile nach erfolgter Berechnung. Die Erkenntnisse aus jeder Analyse werden fortlaufend festgehalten und nicht in einem separaten Abschnitt dargestellt.

### 5.5.1 Analyse von Massnahme 1

Die Resultate der berechneten Verkehrsmittelanteile aufgrund der Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit mit dem Verkehrsmittel Velo sind Tab. 19 zu entnehmen (Zeile: Veränderung). Bei beiden Modellen ist die erwartete Erhöhung der Verkehrsmittelanteile des Velos eingetreten, wobei beim aggregierten Modell die Veränderung rund 0.5 Prozentpunkte höher ausfällt. Die Hypothese M1.1 ist damit bestätigt. Beim aggregierten Modell ist zudem auffällig, dass kaum Fussverkehrsanteile ersetzt wurden.

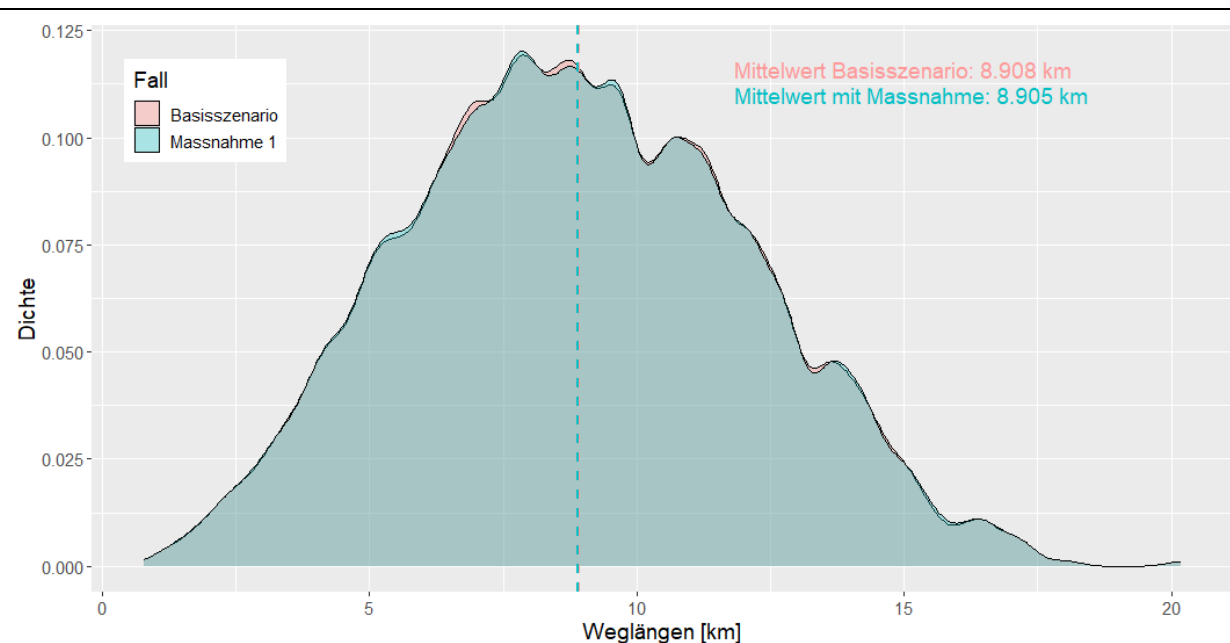
Tab. 19: Verkehrsmittelwahlanteile bei Massnahme 1 (Werte gerundet)

Modell	Halle AGGR Weg				Halle ABM Tour			
	MIV	ÖV	Velo	Fuss	MIV	ÖV	Velo	Fuss
Basisszenario	51.7%	17.3%	15.6%	15.4%	51.5%	18.3%	15.2%	15.0%
Mit Massnahme 1	48.8%	16.0%	19.8%	15.4%	48.8%	18.5%	18.9%	14.2%
Veränderung	<b>-2.8%</b>	<b>-1.3%</b>	<b>+4.2%</b>	<b>-0.1%</b>	<b>-2.7%</b>	<b>-0.2%</b>	<b>+3.7%</b>	<b>-0.8%</b>
Veränderung 1. Trip	-	-	-	-	<b>-2.6%</b>	<b>-0.7%</b>	<b>+3.9%</b>	<b>-0.6%</b>

Der ÖV büsst im Gegensatz dazu im aggregierten Modell rund sechsmal mehr Verkehrsmittelanteile ein als beim disaggregierten Modell. Wird nur der 1. Trip einer Tour betrachtet, ohne alle weiteren Zwischenhalte in der Wegabfolge zu berücksichtigen (vgl. Tab. 19, Spalte: Veränderung 1. Trip), so liegen die Ergebnisse erwartungsgemäss etwas näher am aggregierten Modell. Bei der tourenbasierten Modellierung wird der erste Trip im Vergleich zum aggregierten Modell am ähnlichsten modelliert. Die Differenz der Zunahme der Velo-Anteile zwischen dem ersten Trip einer Tour und allen Trips einer Tour ist mit 0.2 Prozentpunkten zwar relativ klein, liegt aber wie in Hypothese M1.3 formuliert über dem Durchschnitt. Auch diese Hypothese kann damit als bestätigt angesehen werden.

Hypothese M1.2 besagt, dass aufgrund der erhöhten Fahrgeschwindigkeit im gleichen Zeitraum längere Distanzen zurückgelegt werden können. Erwartet wird daher bei beiden Modellen eine Erhöhung der Anteile bei längeren Distanzen. Entgegen den Erwartungen zeigt die Abb. 22 beim aggregierten Modell keine solche Erhöhung. Im Gegenteil: Der Mittelwert liegt trotz 4.2 % mehr Trips etwas unter dem Wert ohne Massnahme. Die Zu- und Abnahmen der Weglängen liegen ungefähr im Gleichgewicht.

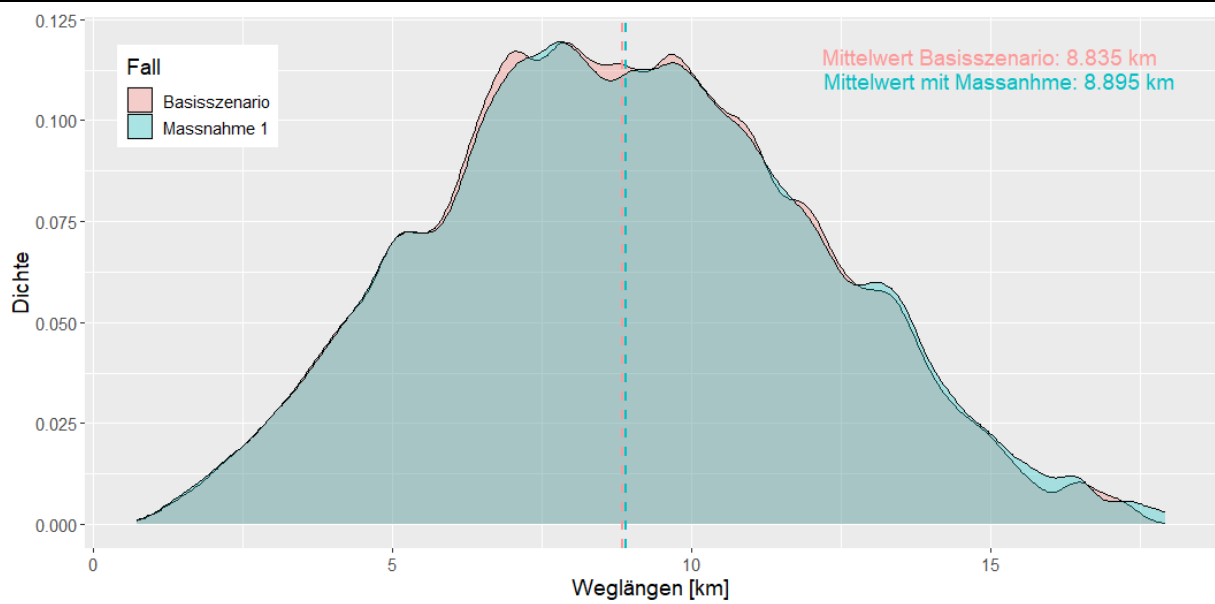
Abb. 22: Dichtediagramm der Velo-Weglängen mit und ohne Massnahme 1 im aggregierten Modell



Quelle: Eigene Darstellung

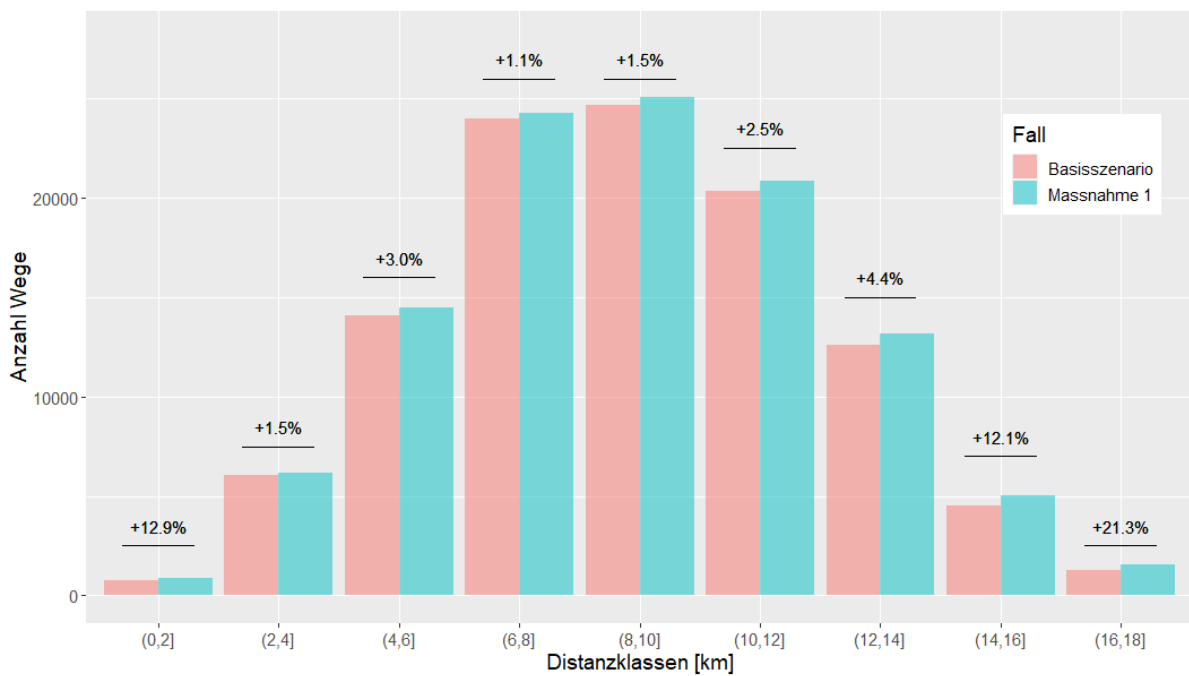
Beim disaggregierten Modell zeigt die Analyse ein abweichendes Verhalten. Wie in Abb. 23 dargestellt, erhöht sich die mittlere Weglänge minimal auf 8.895 km. Abb. 24 verdeutlicht, bei welchen Weglängen die grösste Zunahme zu verzeichnen ist. Gegenüber dem Basisszenario legen vor allem die Distanzklassen über 10 km an Häufigkeit zu. Die Hypothese M1.2 wird damit nur im disaggregierten Modell bestätigt. Im aggregierten Modell ist keine Erhöhung der Weglängen zu beobachten.

Abb. 23: Dichtediagramm der Velo-Weglängen mit und ohne Massnahme 1 im disaggregierten Modell



Quelle: Eigene Darstellung

Abb. 24: Balkendiagramm der Velo-Weglängen nach Distanzklassen im disaggregierten Modell



Quelle: Eigene Darstellung

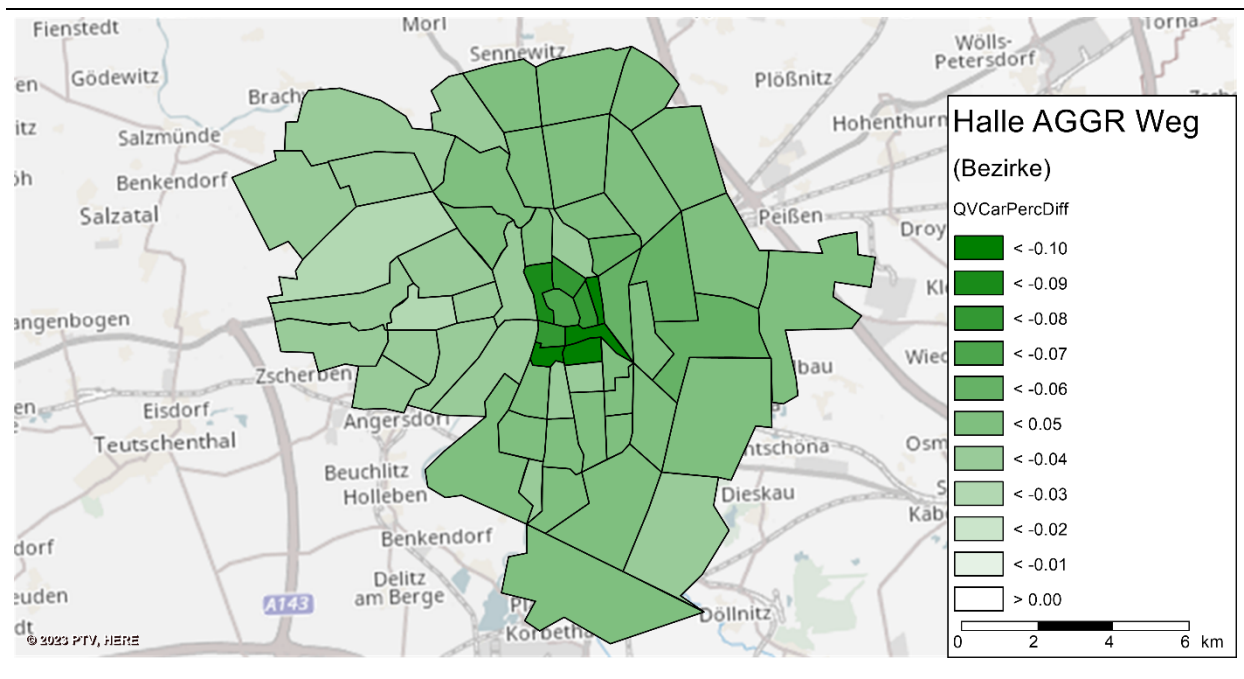
### 5.5.2 Analyse von Massnahme 2

Durch die Einführung der Parkierungsgebühr für den MIV ist in allen Bezirken, aber am ausgeprägtesten in den neun betroffenen Bezirken der Innenstadt, eine Abnahme der MIV-Verkehrsmittelanteile zu erwarten. Die Ergebnisse der Berechnungen und die Darstellungen in Abb. 25 und Abb. 26 bestätigen die Hypothese M2.1. Wie aus Tab. 20 zu entnehmen ist, haben die Verkehrsmittelanteile beim MIV im aggregierten Modell wie auch im disaggregierten Modell um 4.7 resp. 2.7 Prozentpunkte abgenommen (Zeile: Veränderung). Der Unterschied von 2 Prozentpunkten zwischen den beiden Modellen ist gross. Wie schon in der vorhergehenden Massnahme reagiert das aggregierte Modell deutlich stärker auf die Massnahme als das disaggregierte.

Tab. 20: Verkehrsmittelwahlanteile bei Massnahme 2 (Werte gerundet)

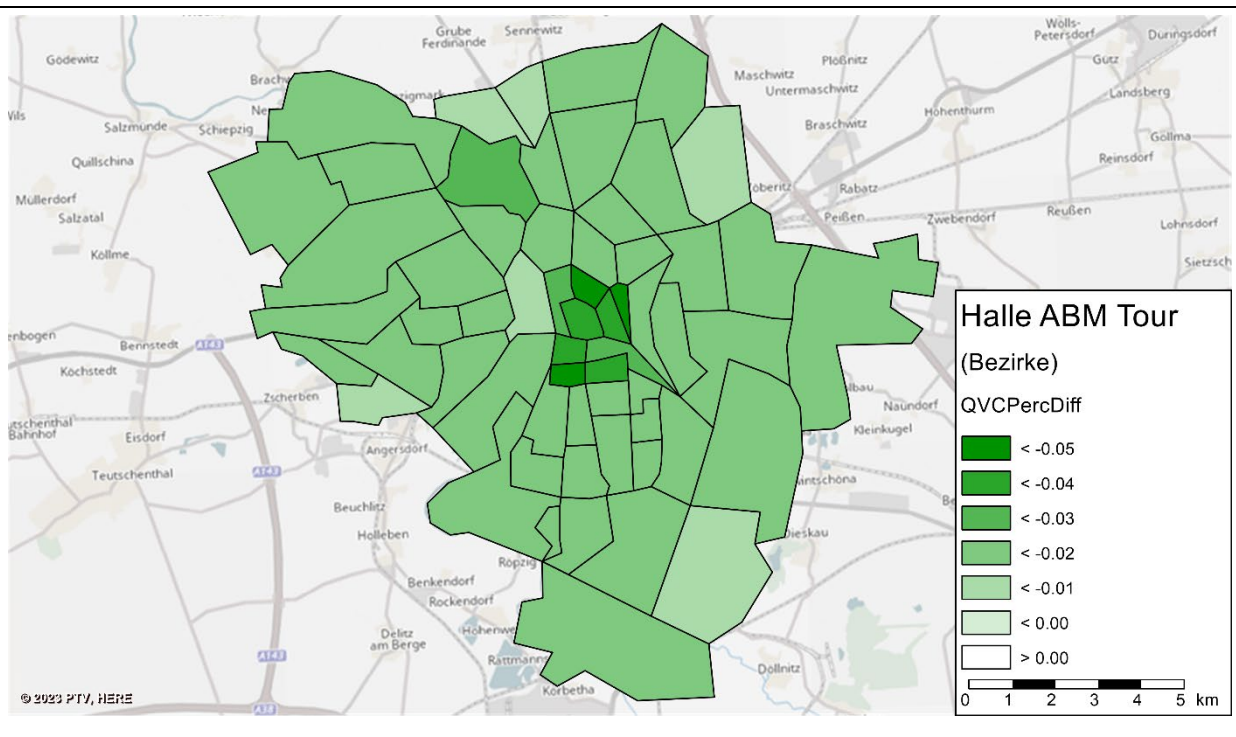
Modell	Halle AGGR Weg				Halle ABM Tour			
	MIV	ÖV	Velo	Fuss	MIV	ÖV	Velo	Fuss
Basisszenario	51.7%	17.3%	15.6%	15.4%	51.5%	18.3%	15.2%	15.0%
Mit Massnahme 2	46.9%	19.8%	17.8%	15.4%	48.8%	18.8%	17.3%	15.2%
Veränderung	<b>-4.7%</b>	<b>+2.5%</b>	<b>+2.2%</b>	<b>0.0%</b>	<b>-2.7%</b>	<b>+0.5%</b>	<b>+2.1%</b>	<b>+0.1%</b>
Veränderung 1. Trip	-	-	-	-	<b>-2.8%</b>	<b>+0.6%</b>	<b>+2.1%</b>	<b>+0.1%</b>

Abb. 25: MIV-Entlastung der Bezirke aufgrund von Massnahme 2 im aggregierten Modell



Quelle: Eigene Darstellung

Abb. 26: MIV-Entlastung der Bezirke aufgrund von Massnahme 2 im disaggregierten Modell



Quelle: Eigene Darstellung

In beiden Modellen ist die höchste Abnahme der MIV-Verkehrsmittelanteile in den bepreisten neun Bezirken im Kern zu beobachten. Alle ausserhalb liegenden Bezirke haben eine deutlich geringere Abnahme der MIV-Anteile zu verzeichnen, was die Hypothese M2.2 bestätigt. Die Dimension der Zunahme der Verkehrsmittelanteile beim ÖV und Velo markiert einen weiteren Unterschied zwischen den beiden Modellen. Im aggregierten Modell entfällt die Zunahme etwa zu gleichen Anteilen auf den ÖV und das Velo. Im Gegensatz dazu verzeichnet der ÖV im disaggregierten Modell einen rund fünfmal tieferen Zuwachs der Verkehrsmittelanteile, wobei das Velo fast den gleichen Zuwachs zeigt wie im aggregierten Modell. Der Fussverkehr verzeichnet in beiden Modellen eine vernachlässigbare Veränderung. Die Hypothese M2.3 wird zwar bestätigt, zeigt aber deutliche quantitative Unterschiede zwischen den Modellen.

Entgegen der Hypothese M2.4 zeigt das disaggregierte Modell bei der Betrachtung der Verkehrsmittelanteile zwischen dem 1. Trip und allen Trips einer Tour (vgl. Tab. 20, Zeile: Veränderung 1. Trip) keine wesentlichen Unterschiede. Die Differenz von 0.1 Prozentpunkten ist zu gering, um die Hypothese der unterdurchschnittlichen MIV-Anteile beim 1. Trip bestätigen zu können. Das hängt mit grösster Wahrscheinlichkeit damit zusammen, dass der Modus MIV kein austauschbarer Modus ist und daher innerhalb einer Tour zwischen dem 1. Trip oder 2. Trip kein Unterschied besteht, da beide ohnehin auch mit dem Auto erledigt werden.

### 5.5.3 Analyse von Massnahme 3

Die letzte Analyse untersucht die Wirkung der Einführung eines 9-Euro-Tickets. Durch das 9-Euro-Ticket wird aufgrund der einschlägigen Erhöhung des Nutzens für den ÖV bei beiden Modellen eine deutliche Zunahme der Verkehrsmittelanteile im ÖV erwartet. Die Ergebnisse der Berechnungen unterstützen diese Hypothese M3.1. Wie aus Tab. 21 hervorgeht, liegt die Zunahme der Verkehrsmittelanteile im aggregierten Modell im ÖV bei 10.8 % und im disaggregierten Modell bei 9.1 %. Wie bei den vorhergehenden Massnahmen zeigt sich eine deutlich höhere Veränderung im aggregierten Modell. Im vorliegenden Fall liegt der Unterschied bei beträchtlichen 1.7 Prozentpunkten.

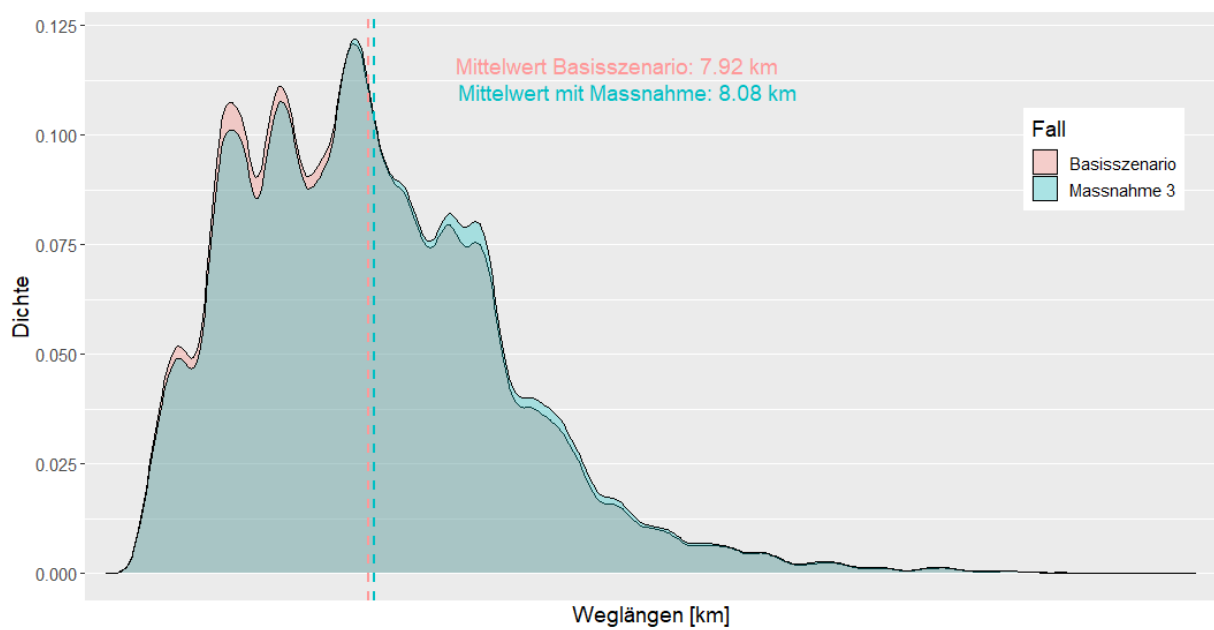
Tab. 21: Verkehrsmittelwahlanteile der Massnahme 3 (Werte gerundet)

Modell	Halle AGGR Weg				Halle ABM Tour			
	MIV	ÖV	Velo	Fuss	MIV	ÖV	Velo	Fuss
Basisszenario	51.7%	17.3%	15.6%	15.4%	51.5%	18.3%	15.2%	15.0%
Mit Massnahme 3	44.6%	28.2%	12.2%	15.1%	45.6%	27.3%	10.8%	16.2%
Veränderung	<b>-7.1%</b>	<b>+10.8%</b>	<b>-3.4%</b>	<b>-0.4%</b>	<b>-5.9%</b>	<b>+9.1%</b>	<b>-4.4%</b>	<b>+1.2</b>

Die Hypothese M3.2 besagt, dass aufgrund der geringen Kosten für lange Distanzen im ÖV (hauptsächlich im Vergleich zum MIV, mit dem ebenfalls lange Distanzen zurückgelegt werden), bei beiden Modellen eine Erhöhung der Anteile bei längeren ÖV-Distanzen zu erwartet ist. Sowohl das aggregierte als auch das disaggregierte Modell bestätigen diese Hypothese. Wie aus den beiden Abb. 27 und Abb. 28 zu entnehmen ist, erhöht sich der Mittelwert der Weglängen von 7.92 km auf 8.08 km im aggregierten Modell resp. von 10.20 km auf 10.38 km im disaggregierten Modell. Das entspricht einer prozentualen Erhöhung von 2.0 % bzw. 1.8 %.

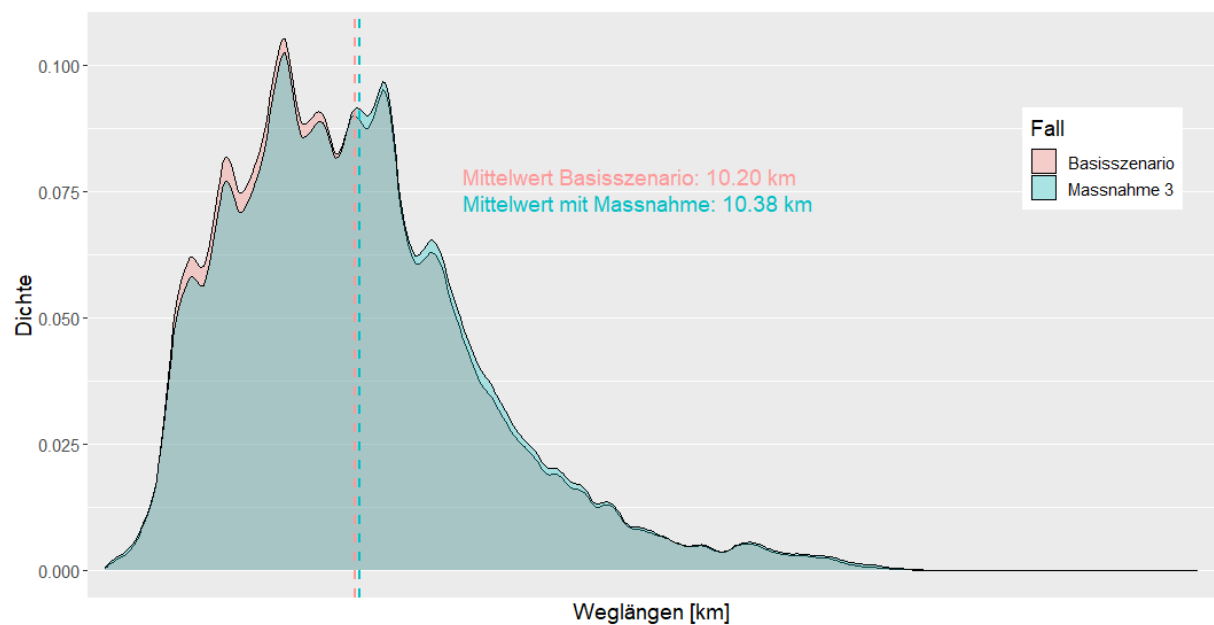
Die Abb. 29 und Abb. 30 illustrieren, welche Weglängen gegenüber dem Basisszenario die grösste Zunahme zu verzeichnen haben. Im aggregierten Modell verzeichnen die Distanzklassen mit Weglängen unter 10 km einen unterdurchschnittlichen Zuwachs an Wegen. Ab Weglängen über 10 km zeigt sich ein umgekehrtes Bild. Ab da verzeichnen alle Distanzklassen überdurchschnittliche Zuwachsraten. Ein fast identisches Ergebnis ist im disaggregierten Modell zu beobachten. Der Unterschied besteht darin, dass die Weglängen bereits ab den Distanzklassen über 8 km einen überdurchschnittlichen Zuwachs erfahren. Die Hypothese M3.2 findet demzufolge in beiden Modellen Bestätigung.

Abb. 27: Dichtediagramm der ÖV-Weglängen mit und ohne Massnahme 3 im aggregierten Modell



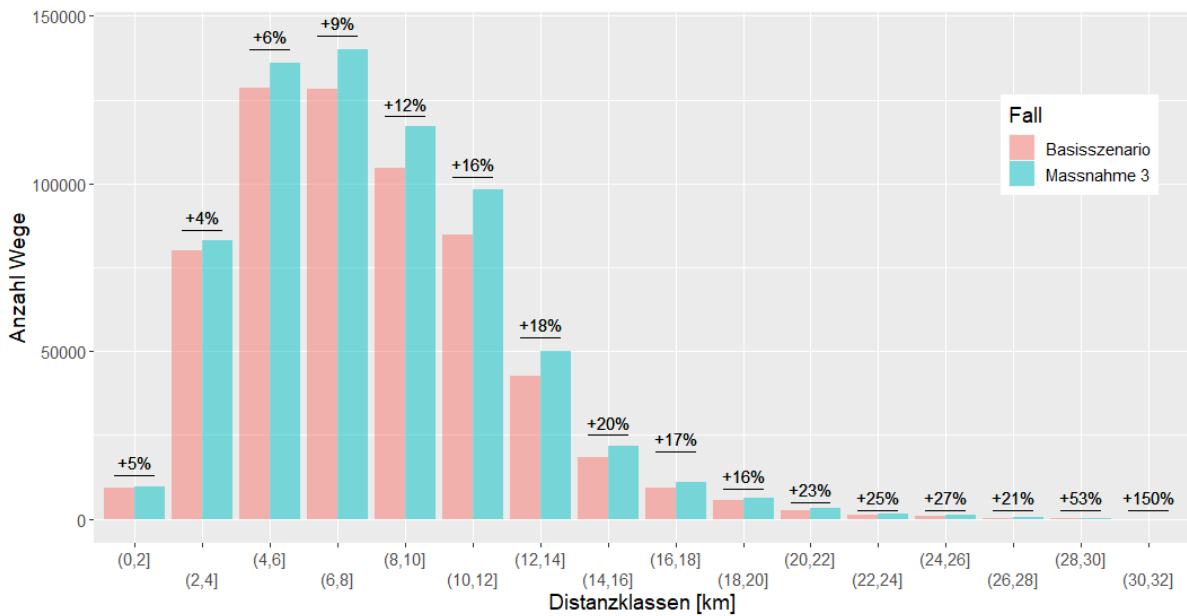
Quelle: Eigene Darstellung

Abb. 28: Dichtediagramm der ÖV-Weglängen mit und ohne Massnahme 3 im disaggregierten Modell



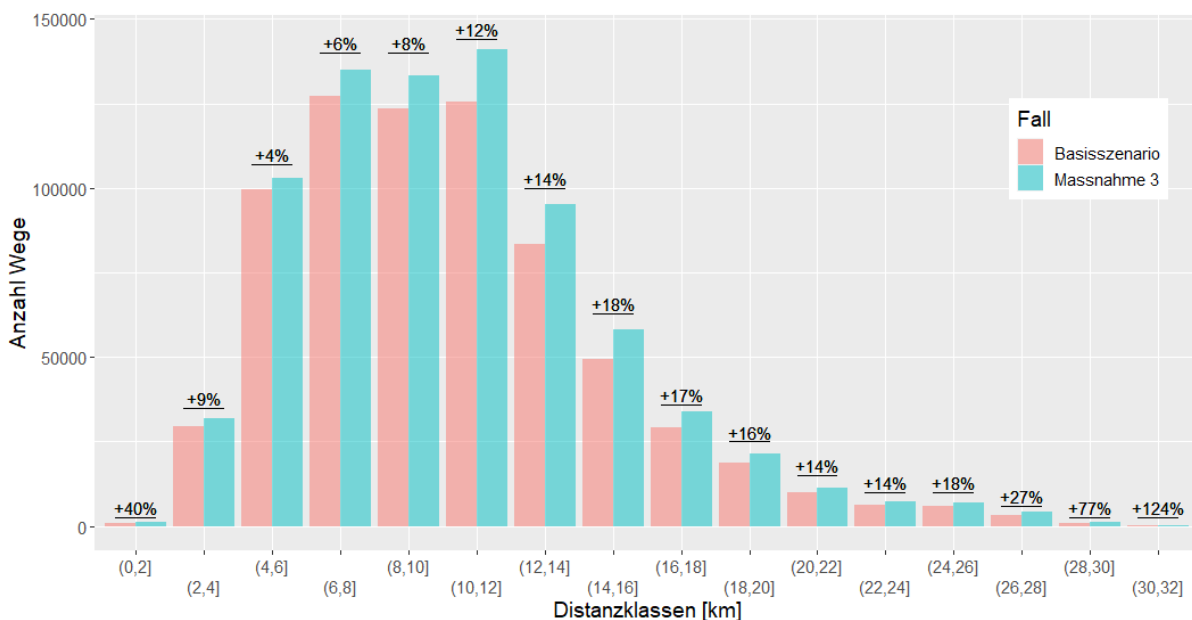
Quelle: Eigene Darstellung

Abb. 29: Balkendiagramm der ÖV-Weglängen nach Distanzklassen im aggregierten Modell



Quelle: Eigene Darstellung

Abb. 30: Balkendiagramm der ÖV-Weglängen nach Distanzklassen im disaggregierten Modell



Quelle: Eigene Darstellung

In Hypothese M3.3 wurde prognostiziert, dass der Fussverkehrsanteil durch die enge Beziehung zwischen ÖV und Fusswegen im disaggregierten Modell zunehmen und im aggregierten abnehmen wird. Tatsächlich verzeichnet das disaggregierte Modell eine Erhöhung der Fussverkehrsanteile um 1.2 %, während die Anteile beim aggregierten Modell um 0.4 % sinken. Dieser Unterschied ist auf die tourenbasierte Verkehrsmittelwahl im Modell Halle ABM Tour zurückzuführen. Aufgrund der Modellierung von Wegabfolgen (vgl. Tab. 22) ist eine starke (und realitätsnahe) Beziehung zwischen dem ÖV und Fusswegen (z. B. bei Zwischentouren) vorhanden. Diese Beziehung führt dazu, dass bei steigenden Verkehrsmittelanteilen im ÖV folglich auch die Fussverkehrsanteile zunehmen. Zusätzlich kann beobachtet werden, dass die reinen Fuss-Wegabfolgen analog dem aggregierten Modell in ihrer Häufigkeit abnehmen. In der nachfolgenden Tab. 22 sind die häufigsten ÖV- und Fuss-Wegabfolgen und beide soeben erläuterten Befunde aus dem disaggregierten Modell samt der Veränderung aufgrund von Massnahme 3 dargestellt.

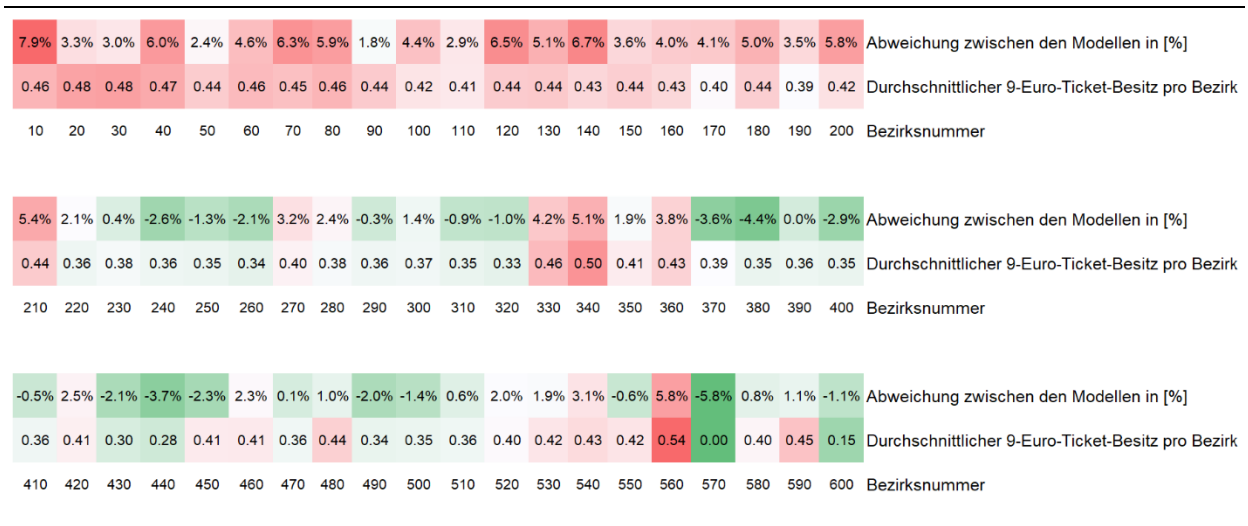
Tab. 22: Veränderung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Wegabfolgen im ÖV und Fussverkehr

Wegabfolge	Häufigkeit ohne Massnahme 3	Häufigkeit mit Massnahme 3	Veränderung
Fuss – Fuss	43'496	43'026	-1.1%
ÖV – ÖV	12'261	28'100	+129.2%
Fuss – Fuss – Fuss – Fuss	12'161	11794	-3.4%
ÖV – ÖV – ÖV – ÖV	11'817	16071	+36.0%
ÖV – ÖV – Fuss – Fuss	9'119	9'261	+1.6%
Fuss – Fuss – ÖV – ÖV	8'962	9'101	+1.6%
ÖV – ÖV – ÖV – Fuss	3'046	4'883	+60.3%
Fuss – ÖV – ÖV – ÖV	2'850	4'716	+65.5%
ÖV – ÖV – Fuss – ÖV	2'660	4'478	+68.3%
ÖV – Fuss – ÖV – ÖV	2'658	4'466	+68.0%

Im Verlauf der Datenanalyse ist ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Modellarten zum Vorschein gekommen. Die nachfolgende Abb. 31 illustriert ein speziell aufgrund des Aggregation Bias auftretendes Verhalten. In der ersten Reihe ist pro Bezirk die relative Abweichung der Verkehrsmittelanteile zwischen den beiden Modellen dargestellt. In der zweiten Reihe ist der durchschnittliche Besitz des 9-Euro-Tickets enthalten. Der durchschnittliche Besitz des 9-Euro-Tickets liegt in beiden Modellen bei rund 38 %. Was nun beobachtet werden kann, ist, dass im aggregierten Modell die positiven Abweichungen (häufigere Wahl der Alternative ÖV) bei Bezirken mit einem überdurchschnittlichen 9-Euro-Ticket-Besitz deutlich höher ausfallen und die negativen Abweichungen (geringere Wahl der Alternative ÖV im aggregierten Modell) bei einem unterdurchschnittlichen 9-Euro-Ticket-Besitz deutlich geringer ausfallen. Dieses Verhalten ist auf das

verwendete Logit-Modell zurückzuführen, das im mittleren Bereich am empfindlichsten reagiert (vgl. Kapitel 2.3).

Abb. 31: Vergleich der Abweichungen der Verkehrsmittelanteile ÖV aufgrund der Massnahme 3



Quelle: Eigene Darstellung

### 5.6 Zwischenfazit zur Abschätzung der Wirkung des Aggregation Bias

Der Aufwand zur Implementierung, Berechnung und Auswertung der drei Massnahmen liegt in beiden Modellen für die vorliegende Modellgrösse und Komplexität in derselben Grössenordnung. Von den zur Verfügung stehenden Auswertungsmöglichkeiten beim disaggregierten Modell wurde nur ein Bruchteil verwendet. Einem allfälligen Mehraufwand bei der disaggregierten Modellierung stünden unverhältnismässig viele zusätzliche Auswertungsmöglichkeiten gegenüber, was den Aufwand rechtfertigen würde. Trotz unterschiedlicher Umsetzung der Massnahmen haben beide Modelle keine Ungereimtheiten hervorgebracht, die eine Überprüfung der aufgestellten Hypothesen verunmöglicht hätten. Acht von zehn Hypothesen konnten bestätigt werden.

Im Rahmen dieser Überprüfungen konnte festgestellt werden, dass das aggregierte Modell grössere Abweichungen als Reaktion auf die von den Massnahmen hervorgerufenen Änderungen der Inputvariablen vorhersagt als das disaggregierte Modell. Diese Erkenntnis stimmt mit den Aussagen von Castiglione u. a. (2015) überein. Auch wenn der Aggregation Bias nicht als absoluter quantitativer und allgemeiner Wert festgelegt werden kann, so zeigt zumindest das in dieser Arbeit verwendete aggregierte Modell auf Basis der drei modellierten Massnahmen im Durchschnitt einen Aggregation Bias zwischen 0,5 und 1,7 Prozentpunkte beträgt.

Zudem scheint die Modellierung der Fussverkehrsanteile aufgrund der tourenbasierten Modellierung im Modell Halle ABM Tour realitätsnäher als beim aggregierten Modell. Dieses vermag es nicht, die nachweislich vorhandenen Zusammenhänge zwischen dem Fussverkehr und dem ÖV auf die gleiche Art und Weise zu berücksichtigen.

## 6 Diskussion

In diesem Kapitel erfolgt die Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse aus den synthetischen Fallbeispielen (vgl. Kapitel 3) und den modellierten Massnahmen (vgl. Kapitel 5). Darauf aufbauend wird die Relevanz des Aggregation Bias für weg- und tourenbasierte Verkehrsmittelwahlansätze eingeordnet. Ergänzend dazu wird das gewählte Vorgehen rückblickend beurteilt sowie dessen Grenzen und Anwendbarkeit erläutert.

### 6.1 Synthese der Ergebnisse

#### 6.1.1 Synthetische Fallbeispiele

In den bewusst überschaubar gehaltenen Fallbeispielen hat die Verwendung von Zonenmittelwerten für die Ermittlung der Verkehrsmittelanteile im Beispielfall mit aggregierten Daten zu einer Verzerrung, dem Aggregation Bias, geführt. Der Aggregation Bias führt in Bezug auf die Verkehrsmittelwahl bei allen geprüften Massnahmen (Reisezeitreduktionen im ÖV um 10, 20 und 30 %) beim aggregierten Modell zu deutlich grösseren Veränderungen der Verkehrsmittelanteile als beim disaggregierten Modell. Der Extremfall ist erwartungsgemäss dann aufgetreten, als die Verkehrsmittelanteile zu ausgeglichenen Anteilen (vgl. Tab. 8, Szenario Agglo) vorlagen. Die relative Veränderung der Verkehrsmittelanteile beträgt im Extremfall das 14-Fache. Auch zwischen den beiden disaggregierten Beispielfällen sind Differenzen zu erkennen. Nur unter strenger Berücksichtigung der Mobilitätswerkzeuge, wie dies im Beispielfall mit strenger MIV-Verfügbarkeit abgebildet ist, entsteht erwartungsgemäss der kleinste Aggregation Bias.

#### 6.1.2 Modellberechnungen

Die in der Zielsetzung formulierte Forschungsfrage kann aufgrund der durchgeführten Berechnungen und Analysen nun beantwortet werden: Ein aggregierter und wegbasierter Ansatz zur Verkehrsmittelwahl zeigt im Vergleich zu einem disaggregierten und tourenbasierten Ansatz bei bestimmten verkehrsplanerischen Massnahmen einen etwa 0.5 bis 2.0 % grossen Unterschied der Verkehrsmittelanteile (Aggregation Bias). Da die wegbasierten und aggregierten Modelle auf der Aggregation von Personen, Haushalten und deren Merkmalen beruhen, können sie nur begrenzt abbilden, wie Menschen abhängig von ihrem Reisezweck, Einkommen und anderen Faktoren auf unterschiedliche Massnahmen reagieren.

Die disaggregierte und tourenbasierte Modellberechnung der drei verkehrsplanerischen Massnahmen hat eine weitere relevante Auswirkung auf die Verkehrsmittelwahl hervorgebracht. Der touren- und personenbasierte disaggregierte Ansatz ermöglicht es im Vergleich zum wegbasierten aggregierten Ansatz, die Beziehung zwischen öffentlichem Verkehr und Fussverkehr akkurater zu modellieren. Dagegen lässt sich in aggregierten Modellen die Relevanz der primären Verkehrsmittelwahl bei Touren und die damit teilweise einhergehende Gebundenheit an Verkehrsmittel nur mangelhaft abbilden.

## 6.2 Beurteilung des Vorgehens

Aus methodischer Sicht wurde versucht, alle unkontrollierbaren Einflüsse auszugrenzen, sodass die Auswertungen, sei es bei den synthetischen Fallbeispielen, sei es bei den Berechnungen mit den beiden implementierten Modellen, möglichst von weiteren Faktoren unbeeinflussten Antworten auf den gestellten Fragen geben. In diesem Sinne ist es vorteilhaft, dass die Basis beider Verkehrsmodelle (Netze, Bezirke etc.) identisch ist. Grundsätzlich hätte man auf dieser Basis aufbauend auch ein komplettes 4-Stufen-Modell mit Verkehrserzeugung, Verkehrsverteilung, Verkehrsmittelwahl und Umlegung etablieren können. Die Herausforderungen hätten in diesem Fall darin bestanden, ähnliche Parameter für die Verkehrserzeugung und Verkehrsverteilung festzulegen, um auf Bezirksebene die möglichst identische Verkehrsnachfrage zu erreichen. Dieses Vorgehen wäre mit grossem Aufwand verbunden gewesen und hätte nichts dazu beigetragen, die verschiedenen Ansätze der Verkehrsmittelwahl zu untersuchen. Daher wurde das Vorgehen nicht weiterverfolgt.

Ein potenzieller Störeinfluss muss dennoch genannt werden: Nach der Berechnung der Wahl der Abfahrtszeit für die Modellierung einer Massnahme im disaggregierten Modell entsteht eine geringfügige Veränderung der vorliegenden Verkehrsnachfrage. Grund dafür ist die aus dem Grundmodell Halle ABM verwendete Berechnungsart der Startzeiten einer Aktivität. Da die Verkehrsmittelwahl vor diesem Schritt erfolgt, ist es möglich, dass bei gewissen Trips keine Startzeit zugewiesen werden kann. Daraufhin wird die gesamte Tour als «Invalid», also als ungültig markiert, sodass für diese Tour keine Umlegung erfolgt. Aus der geplanten Aktivität ist damit keine ausgeführte Aktivität geworden. Dies betrifft zwar nur einen äusserst kleinen Anteil der Touren (< 5 ‰). Da die Aggregation der Verkehrsnachfrage für das aggregierte Modell vor der Wahl der Abfahrtszeit erfolgt, hat dies trotzdem zur Folge, dass die Verkehrsnachfrage beider Modelle nicht auf den Trip genau identisch ist, was das Ergebnis im Nachkommabereich verfälschen kann.

Der Entscheid, für die Fallstudien (Kapitel 3) nur zwei Verkehrsmittelalternativen zu verwenden, schränkt die Belastbarkeit der Resultate etwas ein. Für gewöhnlich stehen mehr als nur zwei Alternativen zur Verfügung. Da es sich bei den Fallbeispielen aber um die rein mathematische Analyse des Aggregation Bias gehandelt hat, spielt das eine untergeordnete Rolle.

## 6.3 Grenzen des Vorgehens

Eine Schwäche des Vorgehens liegt in der verwendeten Methode der tourenbasierten Verkehrsmittelwahl aus dem Grundmodell Halle ABM. Zur Festlegung der Verkehrsmittel einer Tour verwendet das Modell im ersten Schritt die langfristige Entscheidung (Zielort) einer Person als Hauptkriterium. Da im disaggregierten Modell etwas mehr als 76 % aller Touren einen langfristigen Zielort besitzen, erfolgt die Verkehrsmittelwahl aufgrund dieses Zielortes, und zwar unabhängig davon, ob die Person den Trip zu diesem Zielort als ersten Trip oder letzten Trip der Tour durchführt und ob die Aktivität an diesem Ort nur 10 Minuten oder 10 Stunden dauert. Unter Umständen kann es sein, dass diese langfristige Entscheidung innerhalb der Tour um ein Vielfaches weniger lang dauert als andere Aktivitäten. Erst in einem zweiten Schritt erfolgt die Verkehrsmittelwahl für Zwischentouren, die aber auch nur dann eine andere Verkehrsmittelalternative besitzen, wenn

das zuvor gewählte Verkehrsmittel austauschbar ist. Bei diesen sonstigen Touren ohne langfristige Entscheidung erfolgt die Verkehrsmittelwahl auf Basis der Festlegung einer Nebenhauptaktivität, die wiederum mittels «Rubberbanding» festgelegt wird (PTV Group 2020). Die Idee dabei ist, dass die Ziel- und Verkehrsmittelwahl aller Nebenaktivitäten in Hinblick auf eine Hauptaktivität geschieht und so konsistentere Wegeketten ermittelt werden. Das mag für die Zielwahl sinnvoll erscheinen, birgt aber Nachteile bei der Verkehrsmittelwahl. Liegt eine Zwischentour vor der Tour mit der langfristigen Entscheidung, erhält diese automatisch das Verkehrsmittel der Tour mit der langfristigen Entscheidung zugewiesen. Dieses Verhalten ist nicht immer realitätsnah.

Ein weiterer Problembereich verbindet sich mit den Stated-Preference-Parametern, die in beiden Modellen verwendet werden. Diese Parameter wurden disaggregiert und wegbasiert geschätzt, aber anschliessend aggregiert und auch tourenbasiert angewendet. Konsistenterweise hätte Parameter verwendet werden sollen, die auf Basis von tourenbasierten Schätzungen ermittelt wurden. Derartige Parameter sind aber schwierig zu bestimmen: Denn während es nicht an modelltheoretischen Grundlagen für den Aufbau von ABM mangelt, fehlt es bisher an empirischen Studien zur Abschätzung von tourenbasierten Modellparametern.

Das Vorgehen und die ermittelten Resultate weisen nur eine begrenzte Anwendbarkeit auf reale Gegebenheiten aus. Aufgrund des weitaus komplexeren Entscheidungsverhaltens und der verfügbaren Mobilitätsalternativen sind bspw. die Ergebnisse aus der Modellberechnung für das 9-Euro-Ticket kaum für die Stadt Halle anwendbar. An dieser Stelle muss auch festgehalten werden, dass dies nicht der Anspruch dieser Arbeit ist. Die ausdrücklich für die Verkehrsmittelwahl implementierten Mobilitätswerkzeuge fanden in den vorgelagerten Modellschritten keine Berücksichtigung. Die Einführung eines Verbundabonnements als auch des 9-Euro-Tickets hätten bereits bei der Verkehrsverteilung (Zielwahl) grössere Veränderungen herbeigeführt. Diese Umstände fanden ausdrücklich keine Berücksichtigung in dieser Arbeit.

## 7 Gesamtfazit

### 7.1 Schlussfolgerungen

Alle einführend beschriebenen Arbeitspakete konnten erfolgreich bearbeitet werden. Sowohl aus den bearbeiteten Fallstudien als auch aus den Modellberechnungen konnten Schlüsse zur Beantwortung der Forschungsfrage gezogen werden. Die verschiedenen Fallbeispiele zeigen eindrücklich, dass die Verwendung von Zonenmittelwerten für die Ermittlung der Verkehrsmittelanteile mit aggregierten Daten zu einer Verzerrung, dem Aggregation Bias, führt. Die Fallstudien legen nahe, dass ein aggregierter Ansatz zur Verkehrsmittelwahl im Vergleich zu einem disaggregierten Ansatz bei der Abschätzung der Wirkung bestimmter verkehrsplanerischer Massnahmen nicht vernachlässigbare Differenzen hervorruft. Die Fallstudie in Kapitel 3 hat gezeigt, dass unter ungünstigen Voraussetzungen, sprich bei ausgeglichenen Verkehrsmittelanteilen, die relative Differenz der Verkehrsmittelwahlanteile bei einer Änderung der Reisezeit von 30% im Vergleich zur disaggregierten Berechnung das 14-Fache betragen kann.

Die Modellberechnungen auf Basis der beiden Verkehrsmodelle zeigen als Erstes, dass alle wesentlichen Schritte der Verkehrsmittelwahl mit beiden Ansätzen abgebildet werden können und dass beide Modelle eine funktionierende und massnahmensensitive Methodik aufweisen. Keines der beiden implementierten Modelle erweist sich als unbrauchbar. Als Zweites haben die Modellberechnungen gezeigt, dass ein aggregierter und wegbasierter Ansatz zur Verkehrsmittelwahl im Vergleich zu einem disaggregierten und tourenbasierten Ansatz bei der Abschätzung der Wirkung der in dieser Arbeit getesteten verkehrsplanerischer Massnahmen eine etwa 0,5 bis 2,0 % grossen Unterschied der Verkehrsmittelanteile aufweist. Für Vorhersagen, z. B. in Bezug auf Netzbelastungen, sind derartige Verzerrungen akzeptierbar und schränken die Verwendbarkeit kaum ein. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob es aufgrund des Aggregation Bias Anwendungsfälle gibt, bei denen man sich grundsätzlich von aggregierten Modellen verabschieden sollte. Dieser Aggregation Bias ist dann am ausgeprägtesten, wenn personenbezogene Entscheidungen oder Merkmale entscheidend in die Modellberechnungen von Massnahmen einfließen. Hier kommen die Vorteile einer personenbezogenen und aktivitätenbasierten Modellierung der ABM zum Tragen. Um die Auswirkung des Aggregation Bias möglichst gering zu halten, wird daher empfohlen, besondere Aufmerksamkeit auf die Abbildung des Mobilitätswerkzeugbesitzes zu legen. Das gilt sowohl für die personenbezogenen Merkmale bei ABM als auch für die Festlegung von verhaltenshomogenen Gruppen und deren Verwendung bei der Verkehrsmittelwahl in aggregierten Modellen.

Die tourenbasierte und disaggregierte Verkehrsmittelwahl offenbart im Vergleich zur wegbasierenden Verkehrsmittelwahl eine weitere Wirkung auf verkehrsplanerische Massnahmen, die überwiegend im Zusammenhang mit dem ÖV zum Tragen kommt. Aufgrund der Modellierung von Wegabfolgen ist eine starke (und realitätsnahe) Beziehung zwischen dem ÖV und Fusswegen (z. B. bei Zwischentouren) vorhanden. Diese Beziehung führt dazu, dass bei steigenden Verkehrsmittelanteilen im ÖV auch die verketteten Fussverkehrsanteile zunehmen. Aggregierte Modelle können diese nachweislich vorhandenen Zusammenhänge zwischen dem Fussverkehr und dem ÖV

nicht in zufriedenstellender Weise abbilden. Für Verkehrsmodelle, die als Anwendungsfall auch multimodale Wegabfolgen untersuchen und vorhersagen sollen, liegt daher die Empfehlung nahe, ein ABM zu verwenden. Was es konkret für Planerinnen und Planer bedeutet, in solchen Fällen dennoch aggregierte Modelle zu verwenden, kann nicht abschliessend beurteilt werden.

Abschliessend möchte ich erneut kurz auf den eingangs zitierten Aphorismus von George Box eingehen. Der Aphorismus «All models are wrong, but some are useful» (Box 1979) räumt ein, dass statistische Modelle den komplexen Gegebenheiten der Realität bei allen Fortschritten nicht gerecht werden, aber dennoch nützlich sein können. Vor diesem Hintergrund erscheinen die disaggregierten Verkehrsmodelle den komplexen Gegebenheiten der Realität besser gewachsen zu sein.

## 7.2 Weiterer Forschungsbedarf

Die überwiegende Mehrzahl der in der Praxis in der Schweiz verwendeten aggregierten Verkehrsmodelle kommt typischerweise bei kantonalen Ämtern sowie dem Bund für die Untersuchung des Nutzens von Ausbau- und Erhaltungsprojekten im Infrastrukturbereich zum Einsatz. Aufgrund der Erkenntnis, dass der Aggregation Bias bei gewissen Modellberechnungen (z. B. ÖV-Planungen) zu überschätzten Veränderungen und damit zu einem höheren Nutzen führt, stellt die Auswirkung des Aggregation Bias auf Kosten-Nutzen-Analysen einen Forschungsgegenstand dar.

Zur Implementierung beider Modelle wurden Stated-Preference-Parameter verwendet, die zwar disaggregiert erhoben, anschliessend aber wegbasiert geschätzt wurden. Die anschliessende tourenbasierte Anwendung trägt ebenfalls nicht zur konsistenten Verwendung bei. Doch während es nicht an modelltheoretischen Grundlagen für den Aufbau eines ABM mangelt, fehlt es bisher an empirischen Studien zur Schätzung von tourenbasierten Modellparametern. Das Fehlen von Entscheidungsmodellen, mit denen die Modellparameter in Abhängigkeit des Haushaltskontextes geschätzt werden können, wurde bereits durch Vitins u. a. (2021) als Forschungsbedarf identifiziert. Empirische Studien und Modellschätzungen zur Verkehrsmittelwahl in Abhängigkeit der Verkehrsmittelverfügbarkeit im Haushaltskontext wären sinnvoll, um nicht nur ein ABM mit gesicherten Daten versehen zu können, sondern auch die Entwicklung von Verkehrsnachfragemodellen insgesamt zu fördern.

Ganz grundsätzlich stellt sich zu guter Letzt die Frage, ob man nicht prinzipiell bei Neuanschaffungen von Verkehrsmodellen zu disaggregierten Modellen übergehen sollte, die die tatsächlichen Verhältnisse präziser abbilden können.

## Literaturverzeichnis

- Arendt Consulting, Roland Müller, und Infras. 2019. „Gesamtverkehrsmodell der Region Basel 2016/40“. Modellbeschrieb. Basel, Liestal: Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft.
- Arentze, T.A., und H.J.P. Timmermans. 2001. „Deriving Performance Indicators from Models of Multipurpose Shopping Behavior“. *Journal of Retailing and Consumer Services* 8 (6): 325–34. [https://doi.org/10.1016/S0969-6989\(00\)00038-2](https://doi.org/10.1016/S0969-6989(00)00038-2).
- Axhausen, Kay W., und Philipp Fröhlich. 2012. „Übersicht zu Stated Preference-Studien in der Schweiz und Abschätzung von Gesamtelastizitäten: Statusbericht 2012“. Application/pdf. ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000046605>.
- Ben-Akiva, M.E., S.R. Lerman, und S.R. Lerman. 1985. *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*. MIT Press series in transportation studies. MIT Press. <https://books.google.it/books?id=oLC6ZYPs9UoC>.
- Biedermann, Ferenc, Christian Perret, Schweiz, und Bundesamt für Statistik. 2017. *Verkehrverhalten der Bevölkerung: Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015*.
- Box, G.E.P. 1979. „Robustness in the Strategy of Scientific Model Building“. In *Robustness in Statistics*, 201–36. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-438150-6.50018-2>.
- Cachaco, Fabio. 2021. „Datenhaltung bei aktivitätenbasierten Nachfragemodellen“. Seminararbeit. Muttenz und Zürich: Fachhochschule Nordwestschweiz.
- Cachaco, Fabio. 2022a. „Aufbereitung und Überprüfung von Netzdaten für ein aktivitätenbasiertes Verkehrsmodell“. Vertiefungsprojekt 1. Muttenz und Zürich: Fachhochschule Nordwestschweiz.
- Cachaco, Fabio. 2022b. „Umsetzen und Testen von Mobility Pricing Massnahmen im ABM Basel“. Vertiefungsprojekt 2. Muttenz und Zürich: Fachhochschule Nordwestschweiz.
- Castiglione, Joe, Mark Bradley, John Gliebe, Strategic Highway Research Program Capacity Focus Area, Transportation Research Board, und National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2015. *Activity-Based Travel Demand Models: A Primer*. Washington, D.C.: Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/22357>.
- Friedrich, Markus, Eric Pestel, Udo Heidl, Juliane Pillat, Christian Schiller, und Robert Simon. 2019. „Anforderungen an städtische Verkehrsnachfragemodelle“. Projekt FE-Nr. 70.919/2015.
- Goebel, Viktor, und Florian Kohler. 2014. *Raum mit städtischem Charakter 2012: Erläuterungsbericht*. Neuchâtel: Office fédéral de la statistique (OFS).
- Jones, P. M., I. G. Heggie, M. I. Clarke, und M. C. Dix. 1985. „Understanding Travel Behaviour“. *Journal of Forecasting* 4 (3): 315–16. <https://doi.org/10.1002/for.3980040311>.

- Kirchgässner, Gebhard. 2013. *Homo oeconomicus: das ökonomische Modell individuellen Verhaltens und seine Anwendung in den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften*. 4., Ergänzte und Aktualisierte Auflage. Die Einheit der Gesellschaftswissenschaften, Band 74. Tübingen: Mohr Siebeck.
- Koppelman, Frank S. 1975. „Travel Prediction with Models of Individualistic Choice Behavior“. Ph.D. dissertation, Cambridge, Mass: Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Civil Engineering.
- Ortúzar S., Juan de Dios, und Luis G. Willumsen. 2011. *Modelling Transport*. Fourth edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons.
- PTV Group. 2020. „PTV Visum 2020 Handbuch“.
- Rasouli, Soora, und Harry Timmermans. 2013. „Assessment of Model Uncertainty in Destinations and Travel Forecasts of Models of Complex Spatial Shopping Behaviour“. *Journal of Retailing and Consumer Services* 20 (2): 139–46. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2012.05.001>.
- Rasouli, Soora, und Harry Timmermans. 2014. „Activity-Based Models of Travel Demand: Promises, Progress and Prospects“. *International Journal of Urban Sciences* 18 (1): 31–60. <https://doi.org/10.1080/12265934.2013.835118>.
- Scherr, Wolfgang, Patrick Manser, und Patrick Bützberger. 2020. „SIMBA MOBI: Microscopic Mobility Simulation for Corporate Planning“. *Transportation Research Procedia* 49: 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.09.004>.
- Train, Kenneth. 2003. *Discrete Choice Methods with Simulation*. New York: Cambridge University Press.
- Vitins, Basil J., Alexander Erath, Martin Fellendorf, und Michael Arendt. 2021. „Aktivitätenbasierte Verkehrsmodelle: Entscheidungshilfe für Betreiber“. Bericht zum Forschungsprojekt SVI2018/004 1714. Bern: Bundeamt für Strassen. [https://www.mobilityplatform.ch/fileadmin/mobilityplatform/normenpool/21810\\_1714\\_Inhalt.pdf](https://www.mobilityplatform.ch/fileadmin/mobilityplatform/normenpool/21810_1714_Inhalt.pdf).
- Vrtic, Milenko, Claude Weis, Philipp Fröhlich, Jörg Uhlig, Birgit Dugge, Jens Landmann, Juliane Pillat, u. a. 2020. „Modelletablierung Nationales Personenverkehrsmodell (NPVM) 2017“. Schlussbericht. Bern: Bundesamt für Raumentwicklung. [https://www.are.admin.ch/dam/are/de/dokumente/verkehr/dokumente/bericht/NPVM\\_2017\\_Schlussbericht.pdf.download.pdf/NPVM\\_2017\\_Schlussbericht.pdf](https://www.are.admin.ch/dam/are/de/dokumente/verkehr/dokumente/bericht/NPVM_2017_Schlussbericht.pdf.download.pdf/NPVM_2017_Schlussbericht.pdf).
- Walker, Joan, und Moshe Ben-Akiva. 2002. „Generalized Random Utility Model“. *Mathematical Social Sciences* 43 (3): 303–43. [https://doi.org/10.1016/S0165-4896\(02\)00023-9](https://doi.org/10.1016/S0165-4896(02)00023-9).
- Weis, Claude, Milenko Vrtic, Basil Schmid, und Kay Axhausen. 2017. „Analyse der SP-Befragung 2015 zur Verkehrsmodus- und Routenwahl“. Grundlagen. Bern: Bundesamt für Raumentwicklung.

Winkler, Christian. 2012. „Ein integriertes Verkehrsnachfrage- und Bewertungsmodell – Ansatz einer Synthese von Mikroökonomie und Verkehrsplanung“. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrsplanung und Straßenverkehr Heft13/2012. Dresden: Technische Universität Dresden.

## **Anhangsverzeichnis**

<b>ANHANG 1: EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG .....</b>	<b>82</b>
<b>ANHANG 2: ARBEITSJOURNAL MASTERARBEIT.....</b>	<b>83</b>
<b>ANHANG 3: ÜBERSICHT ELEKTRONISCHE DOKUMENTATION (GITLAB).....</b>	<b>86</b>

## ANHANG 1: EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

### Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel «**Analyse der Relevanz von weg- und tourenbasierten Verkehrsmittelwahlansätzen am Beispiel eines aggregierten und eines aktivitätenbasierten Verkehrsmodells der Stadt Halle**» selbstständig, ohne Mithilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen, Hilfsmitteln und Hilfeleistungen erstellt habe und dass Zitate kenntlich gemacht sind.

3. März 2023

Fabio Martins Cachaco

## ANHANG 2: ARBEITSJOURNAL MASTERARBEIT

Tab. 23: Arbeitsjournal der Masterarbeit

Datum	Zeit	Arbeitsschritte	Bemerkungen
30.08.22	9.5h	- ABM überarbeiten	
31.08.22	5h	- ABM überarbeiten	
06.09.22	8.5h	- ABM überarbeiten	
07.09.22	9h	- ABM überarbeiten	
14.09.22	1h	- ABM überarbeiten	
17.09.22	8h	- ABM überarbeiten	
21.09.22	8.5h	- ABM überarbeiten	
22.09.22	8h	- ABM überarbeiten	
23.09.22	4h	- Literatur lesen	
24.09.22	6.5h	- Literatur lesen	
27.09.22	7.5h	- Literatur lesen	
28.09.22	4.5h	- Literatur lesen	
12.10.22	9.5h	- ABM überarbeiten	
13.10.22	5h	- ABM überarbeiten	
19.10.22	6h	- Literatur lesen und zusammenfassen	
20.10.22	6.5h	- Literatur lesen und zusammenfassen	
25.10.22	9.5h	- Nach PTV-Support überarbeiten - ABM überarbeiten	
26.10.22	5.5h	- Nach PTV-Support überarbeiten - ABM überarbeiten	
01.11.22	9.5h	- ABM Basel überarbeiten - Kenngrößen berechnen	Berechnung der ÖV-Kenngrößen (50h)
02.11.22	8.5h	- Literatur lesen und zusammenfassen	
05.11.22	5.5h	- Literatur-Kapitel schreiben - ÖV-Umlegung	
08.11.22	9h	- Literatur-Kapitel schreiben	
09.11.22	9h	- Literatur-Kapitel schreiben	
13.11.22	9h	- Varianten zum Aufbau einer SynPop prüfen - SynPop erstellen (R-Skript)	
15.11.22	9h	- SynPop bearbeiten (R-Skript) - Vorbereitung ZB und Zeitplan aktualisieren	
<b>16.11.22</b>	<b>1h</b>	<b>1. Zwischenbesprechung</b>	
16.11.22	8h	- Choice Model bearbeiten (R-Skript)	
17.11.22	9h	- Choice Model bearbeiten (R-Skript)	
19.11.22	12h	- Choice Model (R-Skript) funktioniert	<b>Erste Resultate zusammengefasst</b>
22.11.22	9h	- Choice Model bearbeiten (R-Skript)	
25.11.22	9h	- Choice Model bearbeiten (R-Skript)	
26.11.22	9h	- Choice Model bearbeiten (R-Skript)	
29.11.22	9h	- Visualisierungen Aggregation Bias	
30.11.22	8h	- Visualisierungen Aggregation Bias	

30.11.22	1h	- Besprechung zu Mode Choice	Basel, SBB
01.12.22	9h	- Choice Model bearbeiten (R-Skript)	
03.12.22	9h	- Choice Model bearbeiten (R-Skript)	
04.12.22	9h	- Choice Model bearbeiten (R-Skript) - Vorbereitung ZB und Zeitplan aktualisieren	Einladung inkl. Terminverschiebung
06.12.22	7.5h	- Nachbereitung ZB inkl. Anpassungen	
<b>06.12.22</b>	<b>1.5h</b>	<b>2. Zwischenbesprechung</b>	
07.12.22	9h	- Choice Model Cases (R-Skript)	
10.12.22	9h	- Choice Model Visualisierung (R-Skript)	
14.12.22	9h	- Choice Model Resultate (R-Skript)	
15.12.22	9h	- Bericht Kapitel 2 fertig schreiben - Vorbereitung ZB und Zeitplan aktualisieren	
20.12.22	7.5h	- Nachbereitung ZB inkl. Anpassungen	
<b>20.12.22</b>	<b>1.5h</b>	<b>3. Zwischenbesprechung</b>	
21.12.22	9h	- Auswertungen zu Fallstudien	
22.12.22	9h	- Auswertungen zu Fallstudien	
29.12.22	10h	- Auswertungen im Bericht ergänzen	<b>AP2 fertig</b>
02.01.23	7h	- Erarbeitung Fallbeispiel SynPop	
03.01.23	9h	- Erarbeitung Fallbeispiel SynPop	
04.01.23	9h	- Erarbeitung Fallbeispiel SynPop	
05.01.23	8.5h	- Auswertung Fallbeispiel SynPop	
06.01.23	9h	- Bericht Kapitel 3 im Entwurf schreiben	
07.01.23	9.5h	- Bericht Kapitel 3 im Entwurf schreiben	
09.01.23	9h	- Vorbereitung ZB und Zeitplan aktualisieren	
10.01.23	9h	- Vorbereitung AP3.2	
11.01.23	7.5h	- Nachbereitung ZB inkl. Anpassungen	
<b>11.01.23</b>	<b>1.5h</b>	<b>4. Zwischenbesprechung</b>	
12.01.23	9h	- Bericht Kapitel 3 überarbeiten	
13.01.23	9h	- Anpassung/Kalibrierung der Nutzenfunktion	
14.01.23	9h	- Anpassung/Kalibrierung der Nutzenfunktion	
16.01.23	9h	- Anpassung/Kalibrierung der Nutzenfunktion	
17.01.23	9h	- Anpassung/Kalibrierung der Nutzenfunktion	
18.01.23	9h	- Kalibrierung der Nutzenfunktion	<b>Modell umgesetzt</b>
19.01.23	9h	- Vorgehensvorschlag für wegbasiertes Modell	
20.01.23	9h	- Vorgehensvorschlag für wegbasiertes Modell	
21.01.23	9h	- Bericht Kapitel beginnen	
23.01.23	11h	- Vorbereitung ZB und Zeitplan aktualisieren	
24.01.23	6h	- Vorbereitungen für AP3.3	
25.01.23	7.5h	- Nachbereitung ZB inkl. Anpassungen	<b>AP3 fertig</b>
<b>25.01.23</b>	<b>1.5h</b>	<b>5. Zwischenbesprechung</b>	
26.01.23	10h	- Umsetzung Model Halle AGGR als 4-Stufen-Modell	
27.01.23	9h	- Umsetzung Model Halle AGGR als 4-Stufen-Modell	<b>4-Stufen-Modell verworfen</b>
28.01.23	10h	- Umsetzung Model Halle Weg	
29.01.23	2h	- Umsetzung Model Halle Weg	
30.01.23	13.5h	- Kalibration Modelle und Distanzverteilung	

31.01.23	10.5h	- Umsetzung Modell Halle Weg	
01.02.23	7.5h	- Nacharbeitung ZB - Umsetzung Modell Halle Weg	
<b>01.02.23</b>	<b>1.5h</b>	<b>6. Zwischenbesprechung</b>	
02.02.23	9h	- Umsetzung Modell Halle Weg	
03.02.23	9h	- Kalibrierung der Nutzenfunktion Modell Halle Weg	<b>Modell umgesetzt</b>
04.02.23	9h	- Umsetzung Szenariomanagement mit Massnahme	
05.02.23	4h	- Umsetzung Massnahme 1	
06.02.23	9h	- Bericht schreiben Kapitel 4	
07.02.23	9h	- Vorbereitung ZB und Zeitplan aktualisieren	
08.02.23	7.5h	- Nachbereitung ZB	
<b>08.02.23</b>	<b>1.5h</b>	<b>7. Zwischenbesprechung</b>	
09.02.23	5h	- Bericht schreiben Kapitel 4	
11.02.23	9h	- Umsetzung Massnahme 2	
12.02.23	11.5h	- Umsetzung Massnahme 3	
13.02.23	12h	- Auswertung/Analyse Massnahmen	
14.02.23	12h	- Auswertung/Analyse Massnahmen	
15.02.23	12h	- Fazit Aggregation Bias verfassen	
16.02.23	12h	- Vorbereitung ZB und Zeitplan aktualisieren - Fazit Aggregation Bias verfassen	
<b>17.02.23</b>	<b>1.5h</b>	<b>8. Zwischenbesprechung</b>	
17.02.23	10.5h	- Nacharbeitung ZB	
18.02.23	12h	- Letzte Anpassungen an den Massnahmen/Plots	<b>Alle Ergebnisse liegen vor (AP4)</b>
19.02.23	5h	- Bericht schreiben Kapitel 4	
20.02.23	12h	- Bericht schreiben Kapitel 4	
21.02.23	12h	- Bericht schreiben Kapitel 5	
22.02.23	12h	- Bericht schreiben Kapitel 5	
23.02.23	12h	- Bericht schreiben Kapitel 5	
24.02.23	12h	- Bericht schreiben Kapitel 5	
25.02.23	12h	- Bericht schreiben Kapitel 6	
26.02.23	12h	- Bericht schreiben Kapitel 7	
27.02.23	12h	- Bericht, Präsentation	
28.02.23	10h	- Bericht, Präsentation und Blog erstellen	
01.03.23	15h	- Dokumente finalisieren	
02.03.23	12h	- Dokumente finalisieren und Druck	
<b>03.03.23</b>	<b>1.5h</b>	<b>Schlusspräsentation</b>	<b>Muttenz</b>
<b>Summe</b>	<b>910.5h</b>		

### ANHANG 3: ÜBERSICHT ELEKTRONISCHE DOKUMENTATION (GITLAB)

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht zu den Inhalten, die als elektronische Dokumentation auf die GitLab-Plattform der FHNW hochgeladen worden sind. Alle Skripte dieser Masterarbeit sind unter Einhaltung der MIT-Lizenz<sup>10</sup> frei verfügbar (Open Source).

Tab. 24: Übersicht elektronische Dokumentation

Ordner	Inhalt	Format
01_mzmv_sample	- mzmv_marginals - persons_mzmv	- R-Datei - RDS-Datei
02_aggregation_bias	- 1_synpop_sggregation_bias	- R-Datei
03_mod_verbundabo	- 2_halle_mod_verbundabo - 3_synpop_mobilitätswerkzeuge - persons_mzmv_mobilitaetswerkzeuge	- IPYNB-Datei - R-Datei - RDS-Datei
04_halle_abm_tour	- Halle ABM Tour Modell inkl. Szenarios - Skripte und Gesamtlayouts - Verkehrsnachfragematrizen	- VER-Datei - Ordner - MTX-Datei - LAY-Datei - PY-Datei
05_halle_aggr_weg	- Halle AGGR Weg Modell inkl. Szenarios - Skripte und Gesamtlayouts - Verkehrsnachfragematrizen	- VER-Datei - Ordner - MTX-Datei - LAY-Datei - PY-Datei
06_skripte_auswertung	- 4_abm_demand_to_aggr_matrices - 5_halle_mod_9_euro_ticket - 6_plot_mode_distance_distribution - 7_plot_travel_distance - 8_analyse_tours - All_Exc_Trips_1 - All_Exc_Trips_1 - Distanzverteilung_Tour_V2_CDP - Distanzverteilung_Weg_V3_CDP - Distanz_Velo_ABM_Basic_V2 - Distanz_Velo_ABM_M1_V2 - Distanz_Velo_AGGR_Basic - Distanz_Velo_AGGR_M1 - Distanz_ÖV_ABM_Basic_V2 - Distanz_ÖV_ABM_M3_V2 - Distanz_ÖV_AGGR_Basic - Distanz_ÖV_AGGR_M3 - Wegabfolgen_ABM_Basic - Wegabfolgen_ABM_M3	- R-Datei - IPYNB -Datei - R-Datei - R-Datei - R-Datei - CSV-Datei - TXT-Datei

<sup>10</sup> <https://opensource.org/licenses/MIT>