



Aktivitätenbasierte Verkehrsmodelle

Modèles de transport basés sur les activités

Activity-based travel demand models

ASE (Analysis Simulation Engineering) AG
Dr. Basil Vitins

Fachhochschule Nordwestschweiz
Prof. Dr. Alexander Erath

M. Fellendorf Verkehrsberatung
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf

Arendt Consulting AG
Michael Arendt

**Forschungsprojekt SVI 2018/004 auf Antrag der Schweizerischen
Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)**

Dezember 2021

1714

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Aktivitätenbasierte Verkehrsmodelle

Modèles de transport basés sur les activités

Activity-based travel demand models

ASE (Analysis Simulation Engineering) AG
Dr. Basil Vitins

Fachhochschule Nordwestschweiz
Prof. Dr. Alexander Erath

M. Fellendorf Verkehrsberatung
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf

Arendt Consulting AG
Michael Arendt

**Forschungsprojekt SVI 2018/004 auf Antrag der Schweizerischen
Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)**

Dezember 2021

1714

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dr. Basil Vitins

Mitglieder

Prof. Dr. Alexander Erath

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Fellendorf

Michael Arendt

Begleitkommission

Präsident

Wolfgang Scherr

Mitglieder

Urs Birchmeier

Damien Cataldi

Alessio Guffanti

Dr. Andreas Justen

Orhan Özkul

Dr. Michael Redle

Dr. Milenko Vrtic

Antragsteller

Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	9
Résumé	21
Summary	33
1 Einleitung	43
1.1 Ausgangslage	43
1.2 Problembeschreibung	44
1.3 Zielsetzung	45
1.4 Vorgehen und Arbeitsschritte	45
1.5 Aufbau des Berichts	46
2 Grundlagen	47
2.1 Vorstellung der Modellansätze	47
2.1.1 Wegbasierte Modelle.....	47
2.1.2 Tourbasierte Modelle.....	48
2.1.3 Aktivitätenbasierte Modelle.....	49
2.2 Vergleich der Modellansätze	50
2.2.1 Modellkomponenten.....	50
2.2.2 Kopplung mit Angebotsmodell	53
2.2.3 Datenbedarf	56
2.3 Vergleich der Modellarchitektur	56
2.3.1 Datenstruktur zur Beschreibung der Verkehrsnachfrage	56
2.3.2 Speicherbedarf.....	57
2.3.3 Rechenintensität	58
2.3.4 Erweiterbarkeit.....	58
2.3.5 Aggregation Bias.....	59
2.3.6 Analysemöglichkeiten.....	60
2.4 Vergleich der Massnahmensensitivität.....	61
2.4.1 Veränderung der Strukturdaten	61
2.4.2 Verkehrsverhalten	62
2.4.3 Emissionen	66
2.4.4 Zukünftige Mobilitätsformen	66
3 Literatur	69
3.1 Aktivitätenbasierten Modelle in der Forschung.....	69
3.1.1 Entwicklungsgeschichte	69
3.1.2 Modellansätze.....	69
3.2 Stand der aktivitätenbasierten Modelle in der Praxis.....	75
3.2.1 USA	75
3.2.2 Europa.....	78
3.2.3 Schweiz	79
3.3 Fazit.....	83
4 Experteninterviews	87
4.1 Methodische Grundlagen	87
4.2 Vorbereitung und Durchführung der Experteninterviews	89
4.2.1 Leitfaden.....	89
4.2.2 Stichprobenbildung	90
4.2.3 Stichprobe.....	90
4.3 Anforderungen und Anwendungen heutiger Verkehrsmodelle.....	94
4.3.1 Anforderungen	94
4.3.2 Anwendungen	95

4.3.3	Verwendung der Modelle im Planungsprozess	97
4.3.4	Zwischenfazit	98
4.4	Potenziale für den Einsatz von aktivitätenbasierten Modellen	99
4.4.1	Praxisrelevanz verschiedener Eigenschaften von aktivitätenbasierten Modellen	99
4.4.2	Zukünftige Anforderungen an Verkehrsmodelle	100
4.4.3	Eignung von aggregierten und aktivitätsbasierten Modellen für zukünftige Fragestellungen	101
4.4.4	Zwischenfazit	103
4.5	Erfahrungen mit aktivitätenbasierten Modellen in der Praxis	103
4.5.1	Erfahrung in den USA.....	104
4.5.2	SIMBA MOBi.....	110
4.5.3	MATSim Modell bei den Berliner Verkehrsbetrieben	112
4.5.4	Weitere Erfahrungen	113
4.5.5	Zwischenfazit	114
4.6	Herausforderungen und Entwicklungspotenziale beim Einsatz von aktivitätenbasierten Modellen in der Praxis	116
4.6.1	Software.....	116
4.6.2	Ökosystem	119
4.6.3	Rechenzeiten	120
4.6.4	Datengrundlagen.....	121
4.7	Fazit.....	121
5	Verwendete Modelle und Methoden	125
5.1	Gesamtverkehrsmodell Basel (GVM Region Basel)	125
5.1.1	Aggregiertes Gesamtverkehrsmodell Basel	129
5.2	Aktivitätenbasiertes Verkehrsmodell Basel (ABVM Basel).....	129
5.2.1	Hintergrund.....	129
5.2.2	Übersicht Modell	129
6	Modellvergleich	135
6.1	Übersicht Modellvergleich.....	135
6.1.1	Ablauf Modellvergleich	136
6.1.2	Kriterien für den Modellvergleich.....	138
6.1.3	Kenngrossen für die Modellgüte	138
6.2	Teil 1: Vergleich der Modelleingabedaten	140
6.2.1	Anbindungslängen.....	140
6.2.2	Unterschiedliche Zonenaggregation	142
6.2.3	Synthetische Population	143
6.3	Teil 2: Vergleich Verkehrsnachfrageberechnung.....	146
6.3.1	Erzeugung der Wege und Wegeketten	146
6.3.2	Verteilung (Zielwahl) und Wegeketten	150
6.3.3	Verkehrsmittelwahl	156
6.4	Teil 3: Vergleich Umlegung und Simulation.....	162
6.4.1	Routenwahl.....	162
6.4.2	Umlegung und Simulation.....	165
6.4.3	Vergleich kalibrierte Zustände	171
6.4.4	Berechnung der Spitzenstunden.....	173
6.4.5	Auswertungsmöglichkeiten	174
6.5	Teil 4: Konvergenzanalysen	176
6.5.1	Methodischer Einschub „Konvergenz bei der Routenwahl MIV“	176
6.5.2	Methodischer Einschub „Grosse Schlaufe“	179
6.5.3	Zusammenfassung Konvergenzanalysen	181
6.6	Teil 5: Realitätstests	182
6.6.1	Sperrung MIV Strecke (Birsig-Viadukt)	182
6.6.2	Taktverdichtung OeV (Linie 64 Arlesheim – Bachgraben)	188
6.7	Szenarienvergleich.....	191
6.7.1	Szenario 1: Änderung der Flächennutzung	191
6.7.2	Szenario 2: Einführung einer Kordonmaut	196
6.7.3	Szenario 3: Methodisches Vorgehen des Homeoffice Einflusses	202
6.8	Übersicht Modellschritte und Bewertung	204

6.8.1	Rechenzeit.....	204
6.8.2	Aufwandschätzung.....	205
6.8.3	Software	206
6.9	Fazit Modellvergleich.....	207
7	Synthese der untersuchten Methoden	211
7.1	Unterscheidungsmerkmale.....	211
7.1.1	Inhaltliche Unterschiede	211
7.1.2	Unterschiede in der Organisation und Handhabung.....	217
7.2	Entscheidungshilfe für Einsatzbereiche	219
7.3	Reifegrad der Softwareprodukte	225
7.4	Reifegrad von ABM	227
7.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	228
7.6	Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	230
7.7	Forschungsbedarf	233
	Anhänge	235
	Literaturverzeichnis	243
	Projektabschluss	253

Zusammenfassung

Einleitung, Ziele und Vorgehen

In der Schweiz und Europa werden in der Praxis heute fast ausschliesslich wege-basierte makroskopische Verkehrsmodelle eingesetzt. In solchen Modellen werden die Verkehrsströme aufgrund der Aktivitäten am jeweiligen Start- und Zielort klassifiziert, in sogenannte Quell-Zielgruppen unterteilt und die verkehrliche Nachfrage berechnet. Aktivitätenbasierte Modelle (ABM) unterscheiden sich wesentlich von den wege-basierten Modellen; sie basieren auf dem Prinzip, dass die Mobilität der Menschen aufgrund von Aktivitätsketten beschrieben wird und individuelle Eigenschaften integral über die gesamte Modellberechnung berücksichtigt werden können. Somit kann mit ABM abgebildet werden, dass Wege (Reisen) als Verbindung von einer Aktivität zur nächsten entstehen, und dass die Wahl des Ziels, des Verkehrsmittels und des Zeitpunkts einer Reise sich nicht auf einzelne Wege bezieht, sondern vom gesamten individuellen Aktivitätenprogramm des Tages abhängt.

Derzeit werden in der Praxis ABM-basierte Verkehrsmodelle bisher vor allem in den USA eingesetzt. Die mit einem ABM erzeugte Verkehrsnachfragematrizen werden dort in der Regel zusammen mit aggregierten Umlegungsmodellen eingesetzt. Durch Rückkopplung der dabei berechneten Widerstandsmatrizen wird gewährleistet, dass das ABM und die Umlegung im Gleichgewicht sind.

Agenten-basierte Simulationsmodelle erlauben es die Belastung der Verkehrsnetze zeitlich dynamisch und disaggregiert auf Ebene einzelner Personen (Agenten) zur berechnen. Dadurch stehen auch bei der Routenwahl personenspezifische Attribute für die Modellierung zur Verfügung. Die Open Source Software MATSim¹, welche an der ETH Zürich mitentwickelt und in der Schweizerischen Forschung oft verwendet wird, umfasst solche Funktionalitäten. Darüber hinaus integriert sie mittels eines iterativen Lernverfahrens Modelle der Routenwahl, Verkehrsmittelwahl und Abfahrtszeit. Gekoppelt mit einer mikroskopischen Simulation haben ABM die Möglichkeit das Verkehrsgeschehen über den gesamten Tagesverlauf zeitlich fein aufgelöst abzubilden.

ABM wird in der Literatur das Potenzial zugesprochen die klassischen wege-basierten makroskopischen Verkehrsmodelle zu ergänzen und langfristig zu ersetzen. Die feinere zeitliche und räumliche Granularität des Modells und die Rückverfolgbarkeit einzelner Personen über den ganzen Tagesverlauf ermöglicht es verkehrliche Fragestellungen detaillierter anzugehen, als das bei aggregierten Modellen der Fall ist.

Grundsätzlich benötigen aggregierte Verkehrsmodelle und ABM zur Analyse der Fragestellungen empirische Datengrundlagen zur Entwicklung der geeigneten Entscheidungsmodelle. Bei den ABM gibt es hier noch Bedarf zur Weiterentwicklung der bestehenden Ansätze und auch die Kalibrationsmethoden bei den ABM müssen noch verbessert werden.

Es gibt verschiedene Gründe, die den Einsatz von ABM in der Praxis erschweren. Die meisten Gründe sind eine Folge der Komplexität der ABM, insbesondere wenn diese mit einer Mikrosimulation gekoppelt werden. Mit der Komplexität steigen die Anforderungen an die Ressourcen (Daten, Software, Rechenkapazität, Personal etc.). Trotzdem werden ABM in einigen Metropolregionen der USA seit einigen Jahren erfolgreich in der praktischen Verkehrsplanung eingesetzt (z.B. SoundCast², SF-Champ³, Travel Model One⁴, Activity

¹ www.matsim.org

² <https://www.psrc.org/activity-based-travel-model-soundcast>

³ <https://www.sfcta.org/sf-champ-modeling>

⁴ <https://github.com/BayAreaMetro/modeling-website/wiki/TravelModel>

Based Modeling der Atlanta Regional Commission⁵, Sandag⁶, New York⁷, North Florida⁸). Diese ABM werden in Kombination mit aggregierten Umlegungsmodellen eingesetzt und kommen sowohl für die Evaluation kurzfristiger verkehrsplanerischer Massnahmen als auch strategische Fragestellungen zum Einsatz (siehe z.B. (Erhardt et al., 2012) und Sall (2012)). Dabei sind auch Nutzergruppen entstanden, welche die Modellierung, Software und Implementierung auf praktischer Ebene weiterentwickeln (z.B. www.activitysim.org, www.zephyrtransport.org). In der Schweiz gibt es bisher ein ABM, das in der Praxis der Verkehrsplanung regelmässig eingesetzt wird: SIMBA MOBi der SBB. Zusätzlich besteht das aktivitätenbasierten Verkehrsmodell Basel (ABVM Basel) welches als Innovationsprojekt erstellt wurde und in diesem Projekt ausführlich vorgestellt wird.

Ziel dieser Studie ist die Erstellung einer Entscheidungshilfe für Betreiber von Verkehrsmodellen, die den Nutzen, die Voraussetzungen, sowie Vor- und Nachteile des Einsatzes aktivitätenbasierter Modelle (ABM) darstellt. Dazu wurden Experteninterviews und ein praktischer Vergleich eines ABM mit einem klassischen makroskopischen Modell durchgeführt. Das dazu verwendete ABVM Basel wurde im Rahmen eines angewandten Innovationsprojektes entwickelt. Das aggregierte und wege-basierte Gesamtverkehrsmodell Region Basel wurde 2019 aktualisiert und wird von den Behörden als Planungswerkzeug für praktische Fragestellungen eingesetzt.

Experteninterviews

In 13 Experteninterviews wurden in einem ersten Schritt die heute an Verkehrsmodelle gestellten Anforderungen und deren Anwendung im Planungsprozess unabhängig vom Modellansatz abgeklärt. In weiteren Schritten wurden Meinungen zu Potenzialen und Herausforderungen beim Einsatz aktivitätenbasierter Verkehrsmodelle in der Praxis eingeholt. Zudem konnte von Experten, die bereits mit aktivitätenbasierten Modellen arbeiten, in Erfahrung gebracht werden, welche Hürden sich bei der Entwicklung und Einführung solcher Modellansätze stellten und welcher Nutzen sich für praktische Anwendungen bisher ergeben haben.

Bei der Wahl der interviewten Experten wurde darauf geachtet, dass sowohl Experten mit als auch ohne Erfahrung mit ABM berücksichtigt werden und die Funktionen Modellbetreiber, Modellentwickler und Softwarebetreiber und Forschung abgedeckt sind. Dadurch konnte eine ausgeglichene Abbildung des Erfahrungswissens zum Thema Verkehrsmodelle gewährleistet werden und auch mögliche Hemmnisse für den Einsatz von ABM adäquat in Erfahrung gebracht werden. Die Stichprobe umfasst drei Experten aus den USA, die als Modellbetreiber oder Modellentwickler eine aktive Rolle bei der Implementierung der ersten ABM hatten, die nun für praktische Fragestellungen eingesetzt werden.

Eine Erkenntnis aus den Experteninterviews ist, dass die bestehenden wegbasierten Modelle sich gut für die derzeit relevanten Anwendungen eignen. Aufgrund knapper Zeit- und Geldbudgets wird das Potenzial, welche die bestehenden, wege-basierten Modelle bieten, in der Praxis nicht immer ausgeschöpft. Bisher waren zudem Fragestellungen, bei denen diese Einschränkung besonders stark wiegen und aktivitätenbasierte Modellansätze praktische Vorteile bieten, von beschränkter Relevanz. Daraus wird abgeleitet, dass der Einsatz von aktivitätenbasierten Modellen nur dann sinnvoll ist, wenn a) Fragestellungen an Relevanz gewinnen, bei denen aktivitätenbasierte Modelle praxisrelevante Vorteile bieten, b) die Betreiber bereit sind, mehr Ressourcen für die Modellentwicklung und -anwendung zur Verfügung zu stellen und c) der Umgang mit ABM zugänglicher und effizienter wird (z.B. aufgrund der Verfügbarkeit entsprechender Software).

In den USA sind für verschiedene Metropolregionen ABM entstanden, welche für angewandte planerische Fragestellungen verwendet werden. In der Schweiz hat die SBB über die letzten Jahre ein eigenes ABM aufgebaut, welches nun Schritt für Schritt auch für die Bearbeitung planerischer und betrieblicher Fragestellungen eingesetzt wird und auch eine

⁵ <https://atlantaregional.org/transportation-mobility/modeling/modeling/>

⁶ <https://www.sandag.org/index.asp?subclassid=120&fuseaction=home.subclasshome>

⁷ <https://www.nymtc.org/Data-and-Modeling/New-York-Best-Practice-Model-NYBPM>

⁸ <http://northfloridatpo.com/planning/modeling>

Mikrosimulation umfasst. Zusätzlich besteht ein ABM für die Region Basel, welches als Innovationsprojekt erstellt und für verschiedene Szenarien angewendet wurde.

Die Erfahrungen in den USA, aber auch bei der SBB in der Schweiz zeigen, dass bei einem aktivitätenbasierten Ansatz die einzelnen Teilmodelle flexibel kalibrierbar sind und so auch die in der Praxis gestellten Ansprüche bezüglich Modellgenauigkeit erfüllt werden können. Bezüglich der Massnahmensensitivität bieten aktivitätenbasierte Modelle Vorteile, da über die verschiedenen Teilmodelle Verhaltensreaktionen differenzierter abgebildet werden können. Aktivitätenbasierte Modelle, die in akademischen Institutionen für die Forschung entwickelt wurden, sind aber selten so kalibriert, dass sie für die praktische Verkehrsplanung einsetzbar wären.

Die Erfahrung mit ABM in der Praxis (z.B. Atlanta Regional Commission, 2019) zeigt, dass mit solchen Modellansätzen potentiell komplexere Verhaltensreaktionen abgebildet werden können als dies mit aggregierten Modellen möglich ist. Die Voraussetzungen dafür sind aber geeignete Entscheidungsmodelle und Kalibrierbarkeit auf empirisch erhobenen Gesetzmässigkeiten des Verkehrsverhaltens.

Vereinzelt wurde von Interviewpartnern angemerkt, dass bisher nicht gezeigt werden konnte, dass die mit einem ABM und agenten-basierter Simulation berechneten Verhaltensreaktionen auf empirische Datengrundlagen kalibriert werden können und dazu auch keine plausiblen Entscheidungsmodelle vorliegen. Gleichzeitig wurde aus den Interviews klar, dass die in den USA und bei der SBB eingesetzten aktivitätenbasierten Modelle zur Beschreibung der Verkehrsnachfrage gut auf empirische Datengrundlagen kalibriert werden konnten. In der hiesigen Praxis besteht aber noch Klärungsbedarf, wie diese Modelle – mit und ohne agenten-basierter Simulation - im Planungsalltag eingesetzt werden. Daher wird im Rahmen der Experteninterviews am Beispiel des Regional Travel Demand Model der Atlanta Regional Commission ein in der Praxis eingesetztes ABM näher vorgestellt.

Die Vorteile von ABM kommen besonders dann zum Tragen, wenn sich die Anforderungen an die Modelle aufgrund von neuen Angebotsformen, nachfrageorientierter Massnahmen zur Verkehrslenkung- und -finanzierung sowie flexibleren Mobilitätsbedürfnissen erhöhen. Solchen Fragestellungen attestieren die befragten Experten in Zukunft eine zunehmende Relevanz. Um diese Potenziale der ABM praxisrelevant nutzbar machen zu können, bedarf es aber auch verbesserter Verhaltensmodelle.

Gegenüber aggregierten Modellen stellt die Entwicklung und Anwendung von aktivitätenbasierten Modellen noch höhere Anforderungen bezüglich des fachlichen Know-Hows der beteiligten Personen. Mit der Veröffentlichung von PTV Visum 2020 gibt es aber mittlerweile Softwarewerkzeuge mit grafischer Nutzeroberfläche, welche die Anwendung von aktivitätenbasierten Modellen vereinfachen. Ebenso unterstützen TransCAD und EMME die Anwendung von ABM, die aber vom Modellentwickler definiert werden müssen. Diese Entwicklungen werden von Betreibern und Modellentwicklern in der Praxis als sehr positiv empfunden. Trotzdem sind derzeit für die Implementierung und Anwendung eines ABM Programmierkenntnisse notwendig. Zudem hat sich gezeigt, dass eine enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit zwischen Betreiber und Entwickler ebenfalls ein wichtiges Element für den Erfolg bei der Entwicklung eines ABM darstellt.

Die Anwendung von aktivitätenbasierten Modellen stellt derzeit höhere Anforderungen an die Modellnutzenden, als dies bei den aggregierten Modellen der Fall ist. Der Verzicht auf eine agenten-basierte Simulation war für die dortigen Betreiber eine wichtige Massnahme zur Beschränkung der Komplexität bei der Transition von aggregierten zu aktivitätenbasierten Modellen.

Aus den Experteninterviews wurde klar, dass die Bereitschaft zur Weiterbildung oder das Anstellen von Personal mit den entsprechenden Kenntnissen Voraussetzungen für einen Einstieg von aggregierten zu aktivitätenbasierten Modellen darstellen. Schulungen und der kontinuierliche Wissensaustausch bilden somit eine wichtige Grundlage für den erfolgreichen Einsatz von aktivitätenbasierten Verkehrsmodellen in der Praxis. Der in der Schweiz gut funktionierende Austausch zwischen den Betreibern sowie der Forschung und Start-Up-Firmen bildet eine gute Basis für den Aufbau von Strukturen, die einen solchen Wissensaustausch ermöglichen. Die Etablierung einer landesweiten synthetischen Population und die Erfahrungen beim Aufbau des aktivitätenbasierten Verkehrsmodells bei der SBB

bilden in der Schweiz weitere gute Voraussetzungen für einen möglichen Einstieg zu aktivitätsbasierten Modellen.

Modellvergleich

Die Methoden eines ABMs sowie eines aggregierten Modells werden beispielhaft und exemplarisch für die Modellregion Basel miteinander verglichen. Die Wahl der Modellregion Basel erfolgt aus zwei Gründen: Einerseits ist für diese Region ein aggregiertes Modell wie auch ein ABM Modell vorhanden, welche denselben räumlichen Perimeter abdecken, und somit einen direkten Vergleich zulassen. Andererseits ist das Gesamtverkehrsmodell bezüglich der hohen räumlichen Auflösung (hektarfeine Zonierung) in der Schweiz einzigartig. Dies lässt eine Analyse zu, in welcher der Vorteil einer potenziell höheren Modellgenauigkeit, der mit einem räumlich und zeitlich diskreten agenten-basierten Ansatzes möglich ist, auch mit einem weg-basierten, aber räumlich fein aufgelösten Modellansatz verglichen werden kann. Eine zusätzliche Auswertung mit einer räumlichen Aggregation und somit mit weniger Verkehrszonen ermöglicht es, ein aggregiertes Kantonsmodell mit in der Praxis üblicher Zonen-Granularität mit dem aktivitätsbasierten Modell mit einer feinen Auflösung zu vergleichen.

Vergleich der Modelle und Methoden hinsichtlich Modellkomponenten

Abb. 1 zeigt schematisch das Vorgehen wie die untersuchten Modellansätze verglichen werden. Dabei liegt der Fokus auf der Nachfrageberechnung wie auch den unterschiedlichen Berechnungsmethoden der Verkehrsbelastung. Die Bewertung erfolgt strukturiert anhand von sechs Kriterien: Anforderungen an die Datengrundlagen, Aufwandabschätzung, Methodik und Funktionalität, Ergebnisvergleich und Vergleich Empirie, Rechenzeit und Verfügbarkeit der Software. Die einzelnen Teilschritte und Vergleiche sind in Abb. 1 dargestellt. Der Hauptvergleich bezieht sich auf die Nachfrageberechnung (Pfeile 1a und 1b mittig in Abb. 1 dargestellt), die Umlegung sowie Simulation inklusive Sensitivitätsbetrachtungen (2a und 2b), die Auswertung der Belastungsergebnisse (3) sowie beispielhafte Szenarienanalysen (4). Der Vergleich bezieht sich auf einzelne, zentrale Elemente und hat nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

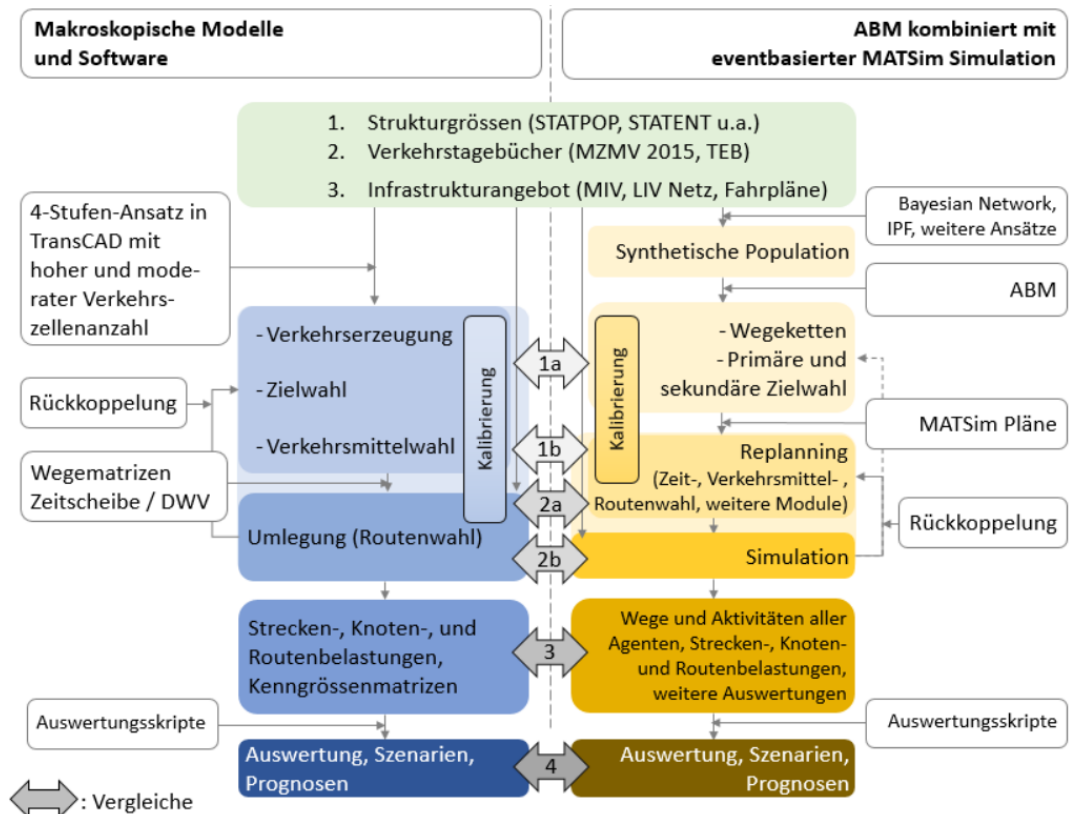


Abb. 1 Übersicht der Arbeitsschritte innerhalb dieses Projektes.

Resultate des Modellvergleichs GVM Region Basel und ABVM Basel

Es hat sich gezeigt, dass die Hauptunterschiede in der Nachfrageberechnung aus methodischer Sicht in der Zielwahl und der Erstellung der Wegeketten liegen, neben der Eigenschaft, dass das ABM auf die Definition verhaltenshomogener Gruppen verzichten kann und stattdessen die Agenten und Ihre Ausprägungen durchgängig als Informationen zur Verfügung stehen. Das ABVM Basel unterteilt die Zielwahl in eine primäre (Pendler- und Ausbildungswege) und sekundäre Zielwahl (verbleibende Zwecke), und modelliert auch die Eigenschaften der Wegeketten (Definition der Wege, Aktivitätenabfolge und Dauer). Dies erfolgt im Unterschied zur Berechnung im Vierstufenansatz des GVM Region Basel, welche keine methodischen Unterscheidungen bei der Zielwahl vornimmt, und die zeitlichen Aspekte statisch berücksichtigt. Der Vorteil der vollständigen Informationen über die Agenten im ABM erhöht die Flexibilität bei den Entscheidungsmodellen innerhalb der Nachfrageberechnung; der Bezug zu verhaltenshomogenen Gruppen wie beim GVM entfällt. Die Kategorisierung und die Parameter der Verhaltensmodelle wurden beim GVM Region Basel für die verhaltenshomogenen Gruppen, wie sie das ARE erhoben hat, übernommen. Beim ABVM wurden teilweise neue Modelle geschätzt, oder ebenfalls auf vorhandene Parameter zurückgegriffen. Aufgrund unterschiedlicher Kategorisierung bei den vorhandenen Verhaltensmodellen konnte dies nur eingeschränkt erfolgen (strategische Entscheidung bei der Modellerstellung), für zukünftige Anwendungen kann die Kategorisierung nochmals überdacht werden.

Die Simulation im ABVM Basel beinhaltet eine MATSim-Simulation mit verschiedenen Modulen. Sie unterscheidet sich erheblich von der Umlegung im aggregierten Modell. Die verwendete MATSim Simulation beinhaltet ein Fahrzeugfolgemodell und umfasst in der schon länger verfügbaren Modellversion die Wahl der Abfahrtszeit, die Routenwahl und die Verkehrsmittelwahl. Die verwendete Simulation weist aufgrund der diskreten Definition der Agenten stochastische Eigenschaften auf; entsprechend können die Simulationsergebnisse innerhalb einer Bandbreite variieren. Eine Umlegung, ob deterministisch oder stochastisch, beinhaltet ausschliesslich die Routenwahl. Dies führt auch zu unterschiedlichen Eigenschaften der Rückkoppelungen („grossen Schlaufe“). Die MATSim Simulation beinhaltet die Wahl der Abfahrtszeit, die Routen- und Verkehrsmittelwahl und damit auch einen wesentlichen Anteil an der „grossen Schlaufe“ und benötigt dafür längere Berechnungszeiten. Die Zielwahl kann in einer externen Loop ebenfalls iterativ neu gerechnet werden. Das GVM Region Basel hat eine sequenzielle Berechnung der Verkehrsmittelwahl und Zielwahl ausserhalb der Umlegung; die Wahl der Abfahrtszeit wird dabei aus der Empirie abgeleitet.

Schlussfolgerungen Modellvergleich

Aus methodischer Sicht kann bei der Nachfrageberechnung des GVM Region Basel und des ABVM Basel wie auch bei der Umlegung respektive Simulation kein eindeutiger Vorteil für die eine oder andere Methode herausgearbeitet werden. Vielmehr müssen, im Hinblick auf zukünftige Anwendungen, die Funktionalitäten berücksichtigt werden. Es geht, auch im Hinblick auf die Schlussfolgerung, weniger um eine pauschale Ja/Nein Frage, sondern vielmehr um eine Frage der Kombination der verschiedenen Methoden, welche dann gesamtheitlich die optimale Lösung für den jeweiligen Modelleinsatz ergeben.

Es hat sich gezeigt, dass ein konkreter Modellvergleich sehr komplex und aufwändig ist. Grund dafür sind die unterschiedlichen Methoden, die in den Modellschritten angewendet werden, und nur einen begrenzten Modellvergleich zulassen. Es ist zusätzlich anzumerken, dass die Anforderungen an die Modelle und die Zielsetzungen sehr unterschiedlich sein können. Es können an diesem Punkt noch keine verallgemeinerten Aussagen getroffen werden. Der durchgeführte Vergleich der Modellanwendungen für die Modellregion Basel wird im Folgenden zusammengefasst:

Beide Modelle, das ABVM Basel sowie das GVM Region Basel haben eine funktionierende Methodik; das ABVM hat eine vollständige Methodik und Funktionalität auf Ebene Aktivitäten und Wege-Ketten, und das GVM Region Basel hat eine vollständige Methodik und

Funktionalität für ein Wege-Modell mit verhaltenshomogenen Gruppen. Bei der Nachfrageberechnung werden in beiden Modellansätzen die Randsummen eingehalten, mit dem Gravitationsmodell für das GVM und dem Ausgleichsverfahren für das ABVM (Vitins & Erath, 2019). Die Nachfragematrix-Korrekturverfahren (numerische Veränderung der Nachfrage zur verbesserten Übereinstimmung mit den Zählwerten) sind beim GVM etablierter, hingegen die „triple Convergence“ (Verkehrsmittelwahl, Routenwahl, Wahl der Abfahrtszeit) wird beim ABVM umfassender abgebildet, speziell die zeitliche Abbildung der Wegeketten. Das ABVM ist aufwändiger in der Modellerstellung, passt sich jedoch flexibler an lokale Gegebenheiten an (grenzquerende Ströme, Randsummen im Zielwahl-Entscheidungsmodell). Das GVM ist effizienter bei den gängigen Anwendungen, die ABVM Methodik eignet sich gut für komplexere Szenarien, sowie für Szenarien, welche die zeitliche Komponente der Aktivitätenketten und die Verkehrsmittelwahl auf Ebene ganzer Wegeketten beeinflussen und welche auf die unterschiedlichen benutzerspezifischen Attribute detailliert zugreifen. Teilweise fehlen für eine praktische Umsetzung dieser Vorteile aber bisher entsprechend formulierte und kalibrierte Entscheidungsmodelle. Hinsichtlich der Modellgüte sind beide Nachfragemodelle auf der Ebene aggregierter Gesamtstatistiken vergleichbar. Das ABVM Basel wurde nicht mit flächendeckenden Zählwerten kalibriert. Das GVM Region Basel hat eine etwas höhere Modellgüte aufgrund der zusätzlichen Ressourcen bei der Modellerarbeitung und der längeren Entwicklungszeit. Das GVM Region Basel wurde zudem aufgrund von Erfahrungen in der Anwendungspraxis in einem Aktualisierungsschritt verbessert und nachkalibriert. Aufgrund der Stochastik ist bei Strecken mit geringer Verkehrsbelastung bei der MATSim Simulation eine Varianz zu beobachten. Beim GVM Region Basel kann es wegen der von der Zonengrösse abhängigen Anbindungen zu Abweichungen kommen, welche punktuell alle 100 Meter in das Verkehrsnetz eingespeist werden.

Hinsichtlich der erforderlichen Datengrundlagen gibt es grundsätzlich geringe Unterschiede zwischen den Modellen. Die elementaren Grundlagen des Mikrozensus Mobilität und Verkehr sowie der Stated-Preference Befragung zum Verkehrsmodus- und Routenwahlverhalten werden von beiden Modellansätzen genutzt. Die Etablierung der Nutzenparameter ist bei der verkehrlichen Simulation (MATSim) weniger standardisiert als beim aggregierten Modell. Die Parameter sind teilweise auch für aggregierten Modelle nicht vollständig vorhanden; zum Beispiel sind die Zielwahl Parameter in vielen Anwendungen nicht direkt geschätzt worden. Hier besteht bei beiden Modellansätzen ein Nachholbedarf. Eine synthetische Population und korrespondierende Prognose ist für das ABVM als Grundlage notwendig (zum Beispiel aus vorhandener synthetischer Population des AREs). Es ist zurzeit noch unklar, ob zukünftig, wie beim NPVM, auch regionale aggregierten Modelle eine synthetische Population als Grundlage verwenden werden.

Das ABVM Basel bedarf etwa 50% mehr Aufwand für eine vergleichbare Modellerstellung wie bei einem aggregierten Modell, u. a. wegen der Berechnung der Wegeketten und den zusätzlichen Teilmodellen und deren Bearbeitung. Eine synthetische Population ist für die Schweiz erstellt worden (Bodenmann et al., 2019) und kann vorbehaltlich datenschutzrechtlicher Einschränkungen am Datensatz für eine Anwendung genutzt werden, ausser für angrenzende Gebiete im Ausland. Die Rechenzeiten sind beim ABVM Basel höher, auch wenn man die neusten Beschleunigungsmöglichkeiten in MATSim berücksichtigt; hier ist jedoch auf den unterschiedlichen Berechnungsaufwand hinzuweisen (Thema „grosse Schlaufe“). Es ist anzunehmen, dass trotzdem die meisten Modellanwendungen mit einem vernünftigen Modellaufwand gerechnet werden können. Die zusätzlichen Auswertungsmöglichkeiten beim ABVM können je nach Anwendung und Szenarien die Rechenzeit wieder kompensieren.

Hinsichtlich vorhandener Software ist das GVM im Vorteil, das Modell ist komplett in TransCAD umgesetzt. Das ABVM Basel verwendet die OpenSource Software MATSim für die Simulation, und erstellt die Nachfrage hauptsächlich in R-Cran und standardisierte Datenbanken und greift darin auch auf SQL-Tabellenkalkulationen zu. Dies erfordert für die Modellerstellung einen hohen Programmieraufwand; für die üblichen Standardanwendungen reichen Basiskenntnisse für die Programmierung (Computerkenntnisse), weil heute ABM nur teilweise durch Standard-Software unterstützt wird; zusätzlich entfallen Lizenzen. Die Visualisierung erfolgt in GIS und kann erweitert werden mit Visualisierungstools für

MATSim. Zukünftig kann die Nachfrageberechnung auch in einer ABM Software umgesetzt werden (siehe unten).

Abb. 2 zeigt eine Übersicht über die einzelnen Komponenten des Modellvergleichs sowie eine qualitative Beurteilung hinsichtlich Modellerstellung und Anwendung. Die Hauptunterschiede sind bei der Rechenzeit und der Software Verfügbarkeit, beides ist beim GVM optimiert, wo beim ABVM noch Nachholbedarf besteht. Zusätzlich ist der Aufwand für die Modellerstellung beim ABVM ebenfalls höher. Das ABVM bietet Vorteile bei der Berechnung grösserer Szenarien bei welchen speziell die zeitliche Variation der Tagespläne eine wesentliche Rolle spielt, sowie die Auswertungen nach beliebigen Merkmalen der Agenten und deren Aktivitätenketten. Die Realitätstests und Sensitivitätstests wurden beispielhaft für ausgesuchte Testanwendungen und Merkmale durchgeführt.

	GVM Region Basel					ABVM Basel				
	Datengrundlagen	Aufwandschätzung	Methodik, Funktionalität	Rechenzeit	Verfügbarkeit Software	Datengrundlagen	Aufwandschätzung	Methodik, Funktionalität	Rechenzeit	Verfügbarkeit Software
1) Modelleingabedaten	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar
2) Nachfrageberechnung	Verfügbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar
3) Umlegung und Simulation	Verfügbar	Nicht durchführbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Verfügbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar
4) Durchgeführte Sensitivitätstests	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Verfügbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar	Verfügbar
5) Durchgeführte Realitätstests	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Verfügbar
6) Durchgeführte Szenarien	Verfügbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar

Skala: Verfügbar / vertretbar Nicht durchführbar nicht vorhanden

Abb. 2 Verfügbarkeit und Durchführbarkeit der Modellkomponenten und Anwendungen, untersucht für das GVM Region Basel und ABVM Basel.

Synthese und Empfehlungen

Sowohl die Experteninterviews zusammen mit der Literaturrecherche als auch die Modellanwendungen in Basel haben gezeigt, dass sowohl aggregierte Verkehrsnachfragemodelle als auch ABMs aufgrund gestiegener Erwartungshaltungen an die Erklärungsmöglichkeiten eines Verkehrsmodells hoch komplexe Modelle darstellen, die mit hohen Anforderungen an die Modellerstellung verbunden sind. Der Komplexitätsgrad nimmt deutlich ab, wenn ein Modell nur für genau einen Anwendungsfall erstellt wird.

Aggregierte Verkehrsnachfragemodelle sind besonders dann einfacher zu erstellen, wenn es sich um Standardanwendungen handelt, für die nicht nur die Modellansätze, sondern auch die erforderlichen Modellparameter aus Erhebungen hinlänglich erprobt sind. Dies betrifft insbesondere Verkehrsmodelle, die zur Beurteilung von Infrastrukturmaßnahmen wie Umplanungen in der Straßeninfrastruktur, Kosten-Nutzenanalysen der Verkehrsinfrastruktur oder raumplanerische Analysen herangezogen werden. In diesen Standardanwendungen kommen die besonderen Stärken eines ABM wie Zielwahl sekundärer Ziele für Einkauf, Erledigungen und Freizeit in Abhängigkeit der Primärziele Wohnen, Arbeit und Ausbildung oder die Verfügbarkeit der Mobilitätswerkzeuge über die gesamte Wegekette kaum zur Geltung. Die größere Modellflexibilität eines ABM erfordert jedoch einen erheblichen Mehraufwand in der Modellerstellung und Kalibrierung (bis zu ca. 50%), der in den Standardanwendungen (Anwendungsfälle 1a, 2a, 5, 8 in Tab. 1) nicht entsprechend gewürdigt wird.

Sobald in den Anwendungen personenbezogen unterschiedliches Verhalten entscheidend zur Modellaussage beiträgt, kommen die Vorteile eines ABM zum Tragen. Dies betrifft detaillierte ÖV-Planungen ebenso wie Untersuchungen zur Mobilität und Homeoffice. Aufgrund der durchgängigen Modellierung von Aktivitätenfolgen im Haushaltskontext werden Verkehrsmittelwahlentscheidungen für ganze Wegeketten einer Person getroffen, so dass intermodale Wege wie bei Park&Ride oder beim Ride-Sharing modellaffiner als im aggregierten Nachfragemodell abgebildet werden. Sehr fein aufgelöste aktivitätenbasierte Modelle mit einer synthetischen Population sind darüber hinaus auch für Fahrten mit kurzen

Reiseweiten, wie im Fußgänger- und Veloverkehr üblich, besser geeignet als gröber skalierte aggregierte Nachfragemodelle.

Wenn ein ABM für eine simultane Wahl der Verkehrsmittel und Abfahrtszeitpunkte sowie der Routenwahl mit einem Verkehrsflussmodell statt eines reinen Umlegungsmodells gekoppelt ist, und die Tageszeitwahl gut kalibriert ist, hat es einen Vorteil gegenüber einem aggregierten Modell für alle Fragestellungen, in denen die Tageszeit der Nachfrage eine wesentliche Rolle spielt wie z.B. der Liniennetzplanungen im Öffentlichen Verkehr. Auch bei Mobility Pricing ist die Tageszeitverteilung wichtig. Allerdings ist bei Mobility Pricing die Einstellung der Preiselastizität die grösste Herausforderung unabhängig davon, ob ein ABM oder ein aggregiertes Modell benutzt wird.

Tab. 1 Vergleich der Einsatzbereiche von ABM und aggregierter Nachfragemodelle

Nr.	Entwicklungen und Maßnahmen	ABM	Aggregiertes Modell	Bedeutung
Projekte mit Angebotsanpassung				
1a	Verkehrsuntersuchungen zum Neubau oder Kapazitätsausweitung wichtiger Straßenachsen (Werktagsmodell)	□	■	+
1b	Neubau oder Kapazitätsausweitung wichtiger Straßenachsen mit Leistungsfähigkeitsanalyse (Spitzenstundenmodell)	□	□	0
2a	Liniennetzplanung im ÖV	■	■	+
2b	ÖV Studien mit Dimensionierung des Fahrzeugeinsatzes	■	□	0
2c	Liniennetzplanung im ÖV unter Berücksichtigung unterschiedlicher Tarifmodelle	□	□	0
Projekte mit Angebotsanpassung				
3	Bau von Park & Ride Anlagen	□	□	0
4	Bau von Verkehrsanlagen für Veloverkehr oder Fußgänger	■	□	0
Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen				
5	Kosten-Nutzen Analysen (aktuell)	□	■	+
6	Kosten-Nutzen Analysen differenziert nach Personengruppen	■	□	-
7	Mobility Pricing	□	□	0
Projekte mit Nachfrageanpassung				
8	Raumplanung und Siedlungsentwicklung	□	■	+
9	Homeoffice	■	□	0
Zukunftsthemen				
10	Vehicle Sharing	□	□	0
11	Ridesharing	■	□	-
12	Elektromobilität	□	□	-

Vor einer Modellentscheidung muss festgelegt werden, wieviel proprietäre Softwareentwicklung für die jeweilige Modellanwendung vorgenommen werden muss. Vollständig implementierte Modelle, die lediglich eine anwendungsspezifische Parameterkalibrierung benötigen, wie dies für zahlreiche Anwendungen mit Hilfe kommerzieller Verkehrsplanungssoftware mit aggregierten Nachfragemodellen möglich ist, liegt für ABMs derzeit noch nicht

vor. In den USA unterstützt eine Gruppe kommunaler Anwender (Association of Metropolitan Planning Organizations, 2019) open-source Entwicklungen von ABMs, um übertragbare Mehrfachnutzungen von Nachfragemodellen zu ermöglichen. Auch kommerzielle Verkehrsplanungspakete wie PTV Visum fördern mittlerweile durch vollständig dokumentierte Skripte im Quellcode die Entwicklung eigener aktivitätenbasierte Modelle. Allerdings ist der Reifegrad der Software bisher nicht mit dem aggregierter Nachfragemodelle vergleichbar, so dass bei der Erstellung eines komplexen ABM und den Anwendungen nicht nur ein Verkehrsmodellierer, sondern auch eine Person mit praktischer Programmiererfahrung erforderlich ist.

Zu Beginn einer ABM Erstellung muss auch eine Methodik für die Routenwahl festgelegt werden, die nachgelagert eines ABM erfolgt. In den USA wird meist der klassische Ansatz gewählt, in dem als Ergebnis eines ABM Verkehrsnachfragematrizen erzeugt werden, die anschließend durch den Einsatz kommerzieller Verkehrsplanungssoftware auf die Verkehrsnetze umgelegt werden. In zahlreichen europäischen ABMs (z.B. Schweiz-Modelle der ETHZ und der SBB, Wien Modell des AIT, Bologna und Hasselt Modell im EU Projekt iSCAPE) werden Verkehrserzeugung, Zielwahl und Berechnung der Wegeketten mit der Verkehrsflusssimulation MATSim gekoppelt, um die Abfahrtszeitwahl, Verkehrsmittelwahl und Routenwahl innerhalb der Agenten-basierten Simulation abzubilden (siehe Abb. 3). Die MATSim Simulation bietet die Vorteile einer zeitdynamischen Rückkopplung zu Lasten einer stabilen wiederholbaren Konvergenz der Ergebnisse. Die Routenwahl ganzzahliger Agenten erfordert im Gegensatz zur Verkehrsumlegung von Nachfragematrizen, die auch nicht ganzzahlige Fahrten enthalten können, rechenzeitintensive Iterationen bevor stabile Verkehrsbelastungen erreicht werden.

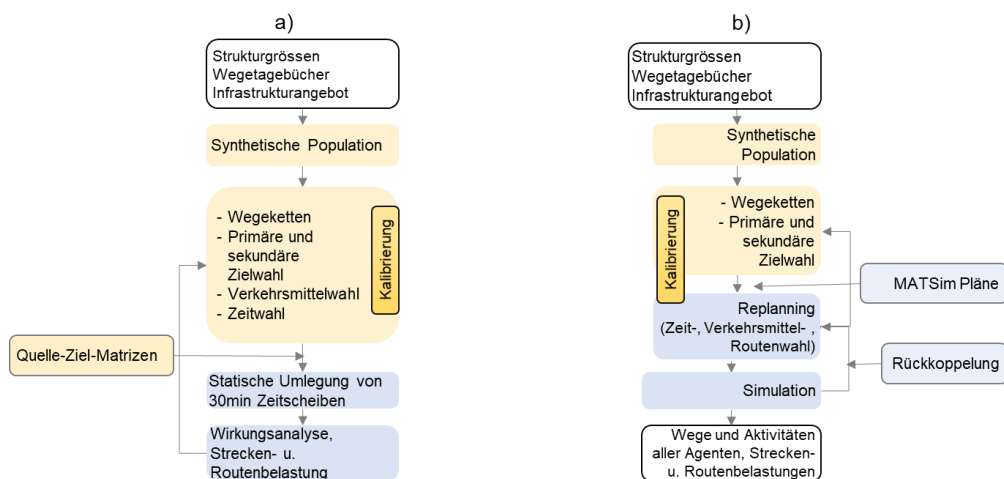


Abb. 3 ABM gekoppelt mit Umlegungsmodellen (a) oder mit einer Verkehrssimulation wie MATSim (b); im ABVM Basel wurde der Modellansatz (b) gewählt.

Im Rahmen der Realitätstests mit dem ABVM Basel wurde demonstriert, wie Anwendungen von ABM in der Schweiz durchgeführt werden können. Allerdings besteht noch Bedarf, passende Entscheidungsmodelle und Kalibrierungsmethoden für ABM bei Modellierern zu vertiefen, um die vollen Potentiale eines ABM nutzen zu können. Für die Förderung der Einsatzmöglichkeiten eines ABM in der Schweiz werden Begleituntersuchungen zu Standardplanungsprojekten empfohlen. Unter dem Dach einer Organisation wie der SVI könnte ein Erfahrungsaustausch zwischen Softwareentwicklern, Modellentwicklern und Modellanwendern gefördert werden. Bei künftigen Anwendungen, in denen auch ABM eine Rolle spielen sollten, empfiehlt sich ein schrittweises Vorgehen. Zuerst sollten Erfahrungen mit einer synthetischen Population statt der traditionellen Verwendung von zellspezifischen Strukturdaten gesammelt werden bevor ein aktivitätenbasiertes Nachfragemodell zu einem ABM vervollständigt wird. Schlussendlich kann der Schritt von einem Umlegungsmodell basierend auf Nachfragematrizen zu einem Verkehrsflussmodell mit agentenbasierter Routenwahl vorgenommen werden.

Bei der Weiterentwicklung von Verkehrsnachfragemodellen sollte unabhängig von der gewählten Methodik künftig mehr Augenmerk auf die Wirkung räumlicher Variablen gelegt werden, um Einflüsse wie Fußläufigkeit und multimodale Erreichbarkeiten besser abbilden zu können. Es fehlen bisher auch empirische Untersuchungen, um die Verhaltensmodelle zur Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahl nicht nur auf aggregierter Ebene, sondern auch personenbezogen schätzen zu können. Mit der Berücksichtigung von Touren statt einzelner Wege müssen die Parameter zur Verkehrsmittelwahl nicht pro Wegezweck, sondern pro Tour vorgenommen werden. Auch sollte die Fahrzeugverfügbarkeit im Haushaltskontext überprüft werden, statt mit Durchschnittswerten der Pkw-Verfügbarkeit operieren zu müssen.

Résumé

Introduction, objectifs et procédure

À l'heure actuelle, la pratique autant à l'échelle suisse qu'européenne implique quasi exclusivement des modèles de transport macroscopiques basés sur des déplacements. Dans le cadre de ces modèles, les flux de trafic sont classifiés sur la base des motifs à l'origine et à la destination des déplacements, puis répartis selon des matrices origine/destination pour ensuite calculer la demande de transports. Les modèles de transport basés sur les activités (MBA) diffèrent fondamentalement des modèles basés sur des déplacements ; le principe de ces premiers veut que la mobilité des personnes soit décrite sur la base de l'enchaînement des activités et que les caractéristiques individuelles puissent être considérées de manière intégrale sur tout le calcul du modèle. Partant, les MBA permettent d'illustrer le fait que les trajets (voyages) découlent du lien entre deux activités et que le choix de la destination, du mode de transport et de l'horaire ne se rapporte pas à des trajets isolés mais au programme complet des activités individuelles de la journée.

Dans la pratique, ces modèles de transport ont jusqu'ici été principalement utilisés aux États-Unis. Les matrices portant sur la demande de transports obtenues à partir d'un tel modèle y sont généralement mises en œuvre avec une affectation issue de modèles agrégés. La cohérence entre les matrices issues d'ABM et les matrices d'affectation. A travers le principe de l'affectation à l'équilibre obtenues par la rétroaction des matrices de résistance.

Les modèles de simulation basés sur les agents permettent de calculer charge des différents réseaux de transport de manière temporelle, dynamique et désagrégée à l'échelle des individus (agents). Ainsi, des attributs spécifiques à la personne sont également disponibles pour la modélisation dans le choix de l'itinéraire. Le logiciel *open source* MATSim⁹, développé conjointement à l'EPF de Zurich et très souvent utilisé dans la recherche en Suisse, comporte ce type de fonctions. Par ailleurs, un processus d'apprentissage itératif lui permet d'intégrer des modèles de choix d'itinéraire, de mode de transport et d'horaire de départ. Conjugués à une simulation microscopique, les MBA permettent de représenter de manière détaillée la circulation tout au long de la journée.

On attribue aux MBA le potentiel de compléter les modèles classiques basés sur des trajets et de les remplacer à long terme. La granularité temporelle et spatiale plus fine de ces modèles par rapport à leurs homologues agrégés et la traçabilité des différentes personnes tout au long de la journée permet d'aborder des questions liées au trafic de manière plus détaillée.

Fondamentalement, ces deux types de modèles requièrent des bases de données empiriques pour le développement de modèles décisionnels adaptés en vue d'analyser les différentes questions. En ce qui concerne les MBA, il faudra continuer de développer les approches existantes et améliorer les méthodes de calage.

Leur application dans la pratique est toutefois entravée par différents facteurs, dont la plupart résultent de la complexité même de ces modèles, en particulier lorsqu'ils sont couplés à une simulation microscopique. Cette complexité fait augmenter les besoins en ressources (données, logiciels, capacités informatiques, personnel, etc.). Pourtant, les MBA sont utilisés avec succès depuis plusieurs années pour la planification pratique des transports dans certaines régions métropolitaines des États-Unis (p. ex., SoundCast¹⁰,

⁹ www.matsim.org

¹⁰ <https://www.psrc.org/activity-based-travel-model-soundcast>

SF-Champ¹¹, Travel Model One¹², *Activity Based Modeling* de l'*Atlanta Regional Commission*¹³, Sandag¹⁴, New York¹⁵, North Florida¹⁶). Ils sont employés en combinaison avec des modèles d'affectation agrégés, et ce, aussi bien pour l'évaluation des mesures de planification des transports à court terme que pour les questions stratégiques (cf. Erhardt et al. (2012) and Sall (2012) à titre d'exemple). Des groupes d'utilisateurs, qui développent la modélisation, les logiciels et l'implémentation sur le plan pratique se sont formés (p. ex., www.activitysim.org, www.zephyrtransport.org). En Suisse, un seul MBA est pour l'heure utilisé régulièrement dans la planification des transports : il s'agit de SIMBA MOBi des CFF. Il existe également le modèle de transport bâlois basé sur les activités (MTBA Bâle), élaboré sous forme de projet d'innovation et dont les résultats sont analysés en détail dans le cadre du présent projet.

Cette étude a pour objectif de fournir aux opérateurs de modèles de transport un outil d'aide à la décision, qui illustre l'utilité, les conditions ainsi que les avantages et les inconvénients découlant de l'utilisation de MBA. Pour ce faire, des entretiens d'experts et une comparaison pratique entre un MBA et un modèle macroscopique classique ont été réalisés. Le MTBA Bâle employé à cet égard a été développé dans le cadre d'un projet d'innovation appliqué et sera utilisé pour répondre aux différentes questions. Le modèle global des transports de la région de Bâle (MGT région Bâle), agrégé et basé sur des trajets, a été actualisé par les autorités en 2019 et servira d'outil de planification pour les futurs réseaux de transport.

Entretiens d'experts

Dans un premier temps, les exigences posées aujourd'hui aux modèles de transport et leur application dans le processus de planification, indépendamment du modèle, ont été identifiées dans le cadre de treize entretiens d'experts. Les opinions concernant les potentiels et les défis liés à l'utilisation d'un modèle de transport basé sur les activités ont ensuite été recueillis. Qui plus est, l'expérience d'experts qui travaillent déjà avec des MBA a permis de mettre en lumière à la fois la valeur ajoutée et les obstacles liés à l'utilisation de cette nouvelle génération de modèles de transport.

En ce qui concerne le choix des experts interrogés, on a veillé à tenir compte aussi bien de ceux qui avaient de l'expérience avec les MBA que de ceux qui n'en n'avaient pas et à ce que les fonctions d'utilisateur et de développeur de modèle et de logiciels ainsi que de chercheur soient couvertes. Ainsi, on a pu garantir une représentation équilibrée des connaissances issues de l'expérience en matière de modèles de transport et mettre en lumière de manière adéquate les éventuels obstacles à l'utilisation de MBA. Dans l'échantillonnage figurent trois experts actifs aux États-Unis qui, en leur qualité d'utilisateurs ou de développeurs de modèles, ont joué un rôle dans l'implémentation des premiers MBA dans leur pays et qui sont désormais consultés pour répondre aux besoins en termes de planification des transports.

Les entretiens d'experts ont révélé que les modèles existants basés sur des trajets sont tout à fait adaptés pour répondre aux besoins en matière de planification. Étant donné les ressources temporelles et financières limitées, le potentiel de ces modèles n'est pas toujours exploité dans la pratique. Par ailleurs, les problématiques pour lesquelles les MBA se révèlent plus performants ne se présentent pas fréquemment. On peut en conclure que l'utilisation de MBA n'est pertinente que si a) les questions pour lesquelles les MBA offrent des avantages pratiques gagnent en importance, b) les utilisateurs sont prêts à mettre davantage de moyens à disposition pour le développement et l'application des modèles et

¹¹ <https://www.sfcta.org/sf-champ-modeling>

¹² <https://github.com/BayAreaMetro/modeling-website/wiki/TravelModel>

¹³ <https://atlantaregional.org/transportation-mobility/modeling/modeling/>

¹⁴ <https://www.sandag.org/index.asp?subclassid=120&fuseaction=home.subclasshome>

¹⁵ <https://www.nymtc.org/Data-and-Modeling/New-York-Best-Practice-Model-NYBPM>

¹⁶ <http://northfloridatpo.com/planning/modeling>

c) l'utilisation des MBA devient plus accessible et plus efficace (p. ex., du fait de la disponibilité d'un logiciel adapté).

Aux États-Unis, des MBA utilisés pour des questions de planification appliquées ont vu le jour dans différentes régions métropolitaines. En Suisse, au cours des dernières années, les CFF ont développé un MBA propre, qui sera désormais mis en œuvre progressivement pour traiter les questions d'opération et de planification. Ce modèle inclut par ailleurs une simulation microscopique. Il existe aussi un MBA pour la région de Bâle, qui sera élaboré et utilisé en tant que projet d'innovation.

Les expériences faites aussi bien aux États-Unis que par les CFF en Suisse montrent que les modèles partiels peuvent être plus facilement calibrés avec une approche basée sur les activités et que les exigences en matière de précision peuvent ainsi être satisfaites dans la pratique. Les MBA présentent des avantages en matière de sensibilité des mesures, car les différents modèles partiels permettent de représenter les réactions comportementales de manière différenciée. Toutefois, le niveau de calage des MBA développés pour la recherche dans des établissements académiques n'est que rarement suffisant pour disposer de résultats fiables dans le domaine de la planification des transports.

Les expériences pratiques faites avec les MBA (p. ex., *Atlanta Regional Commission*, 2019) indiquent que de telles approches permettraient d'illustrer des réactions comportementales plus complexes que les modèles agrégés. Pour cela il faut toutefois des modèles décisionnels adaptés et une possibilité de calage sur des lois empiriques qui régissent le comportement des déplacements.

Certains experts ont noté qu'il avait jusqu'ici été impossible de démontrer que les réactions comportementales calculées à partir d'un MBA et d'une simulation basée sur les agents peuvent être calées sur des bases de données empiriques et qu'il n'existait pas non plus de modèles décisionnels plausibles à cet égard. Parallèlement, les entretiens ont révélé que les MBA utilisés aux États-Unis et par les CFF pour décrire la demande de transports se prêtaient bien à un calage sur des bases de données empiriques. La manière dont ces modèles seront utilisés chez nous dans la planification quotidienne (avec et sans simulation basée sur les agents) nécessite encore des clarifications. Par conséquent, dans le cadre des entretiens d'experts, une application concrète d'un MBA sera présentée plus en détail sur la base de l'exemple du *Regional Travel Model* de l'*Atlanta Regional Commission*.

Les avantages en question apparaissent notamment lorsque les exigences en matière de modèles augmentent en raison de nouvelles formes d'offres, de mesures orientées sur la demande de régulation et de financement de la mobilité ainsi que de services de mobilité plus flexibles. Les experts interrogés pensent que ces questions bénéficieront d'une importance croissante à l'avenir. Des modèles de comportement améliorés sont toutefois nécessaires pour pouvoir exploiter les potentiels des MBA dans la pratique.

Par rapport aux modèles agrégés, le développement et l'application de MBA génère des exigences encore plus élevées en matière de compétences techniques des personnes impliquées. Avec la sortie de PTV Visum 2020, il existe toutefois désormais des outils logiciels offrant des interfaces utilisateur graphiques qui facilitent l'usage des MBA; les logiciels TransCAD et EMME favorisent aussi l'utilisation de MBA : ces derniers doivent toutefois être définis par le développeur de modèles. Dans la pratique, les utilisateurs et développeurs de modèles jugent ces évolutions très positives. Des connaissances en matière de programmation restent néanmoins nécessaires pour implémenter et utiliser un MBA. Par ailleurs, il a été constaté qu'une collaboration étroite et empreinte de confiance entre les opérateurs et les développeurs constituait également un aspect essentiel pour le succès du développement d'un MBA.

L'utilisation de MBA pose actuellement des exigences plus élevées que les modèles agrégés. Le fait de renoncer à une simulation basée sur les agents a constitué une mesure importante pour limiter la complexité et ainsi favoriser l'utilisation de modèles agrégés à des MBA à la place des modèles agrégés.

Les entretiens d'experts ont clairement révélé que le fait d'être disposés à suivre une formation continue ou à engager du personnel ayant les connaissances requises était des conditions *sine qua non* pour passer des modèles agrégés aux MBA. Ainsi, les formations

et l'échange continu de connaissances sont capitaux pour garantir une utilisation satisfaisante des MBA. L'échange entre les utilisateurs, chercheurs et les entreprises en démarrage fonctionne très bien en Suisse et forme ainsi une bonne base pour la mise en place de structures permettant un tel partage de connaissances. L'établissement d'une population synthétique à l'échelle nationale et les expériences faites avec la mise en place d'un MBA aux CFF sont autant d'autres bonnes conditions de départ pour un favoriser l'utilisation des MBA en Suisse.

Comparaison de modèles

Les méthodes d'un MBA et d'un modèle agrégé sont comparées ici à titre d'exemple pour la région de Bâle. Le choix s'est porté sur cette région modèle pour deux raisons : d'une part, il existe pour cette zone aussi bien un modèle agrégé qu'un MBA, qui couvrent le même périmètre et permettent donc une comparaison directe. D'autre part, le modèle agrégé de prévision de trafic actuellement en place à Bâle est unique en Suisse en termes de résolution spatiale (zonage par hectares). Ces caractéristiques permettent d'analyser quel serait le bénéfice d'une éventuelle précision accrue du modèle obtenue grâce à une approche spatiale et temporelle discrète basée sur les agents. Une évaluation supplémentaire

impliquant une agrégation spatiale et, par conséquent, moins de zones de transport, permet de comparer un modèle cantonal agrégé affichant une granularité des zones commune dans la pratique avec un MBA à fine résolution.

Comparaison des modèles et des méthodes en termes de composants

L'Abb. 4 affiche de manière schématique le procédé de comparaison des approches examinées. L'accent repose ici sur le calcul de la demande ainsi que sur les différentes méthodes de calcul de la charge de trafic. L'évaluation intervient de manière structurée, sur la base de six critères : exigences en matière de bases de données, estimation de la charge, méthodologie et fonctionnalité, comparaison des résultats et comparaison empirique, temps de calcul et disponibilité du logiciel. Les étapes partielles et les comparaisons sont représentées à l'Abb. 4. Le comparatif principal porte sur le calcul de la demande (représenté par les flèches 1a et 1b au milieu de l'Abb. 4), la répartition et la simulation incluant les critères de sensibilité (2a et 2b), l'évaluation des résultats en termes de charge (3) et des applications de scénarios à titre d'exemple (4). Cette comparaison se rapporte à certains éléments essentiels et ne prétend pas à l'exhaustivité.

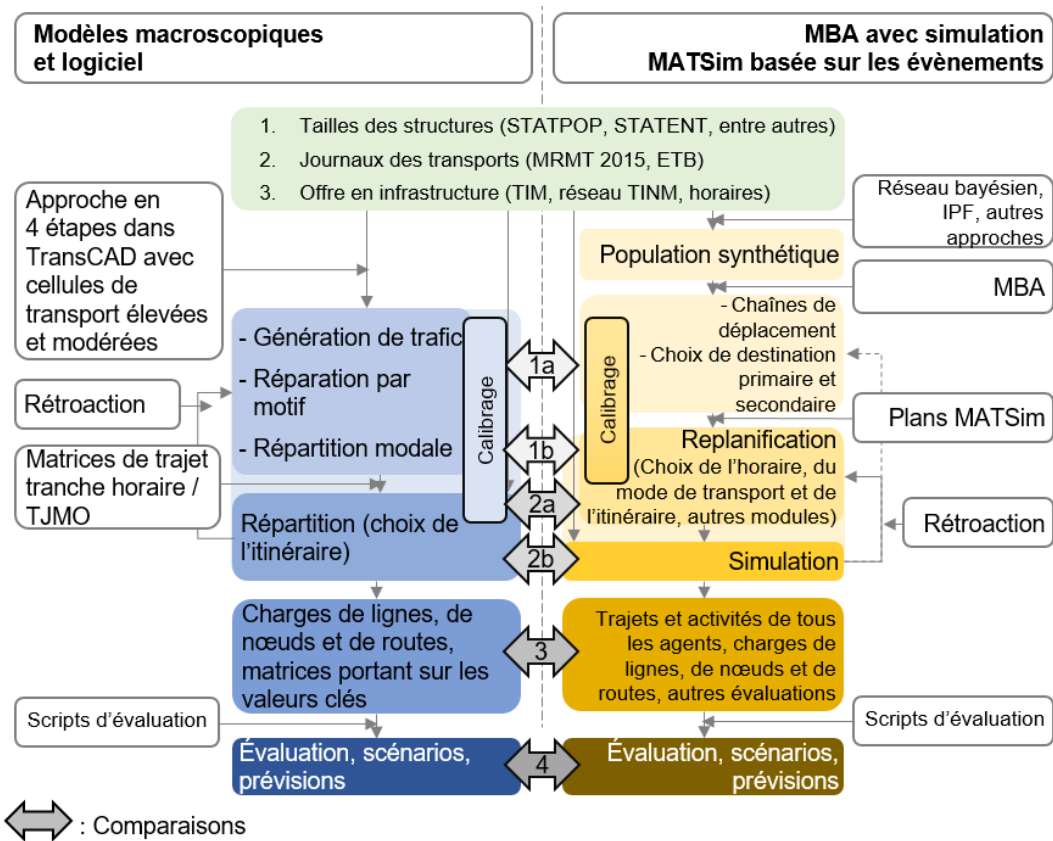


Abb. 4 Aperçu des étapes de travail au sein de ce projet

Résultats de la comparaison entre le MGT région de Bâle et le MTBA Bâle

Il s'est avéré que les principales différences dans le calcul de la demande d'un point de vue méthodologique portaient, d'une part, sur le choix de la destination et la création de chaînes de déplacement et, d'autre part, sur le fait que le MBA peut se passer de la définition de groupes aux comportements homogènes et que les modalités sur les personnes (agents) sont constamment à disposition. Le MTBA Bâle subdivise les choix de la destination de type primaire (trajets pour se rendre au travail ou sur son lieu de formation) et secondaire (autres destinations) et modélise également les caractéristiques des chaînes de déplacement (définition des itinéraires, suite d'activités et durée). Cette procédure diffère du calcul en quatre étapes du MGT région de Bâle, qui ne fait pas de distinction méthodologique en termes de choix de la destination et considère les aspects temporels de manière statique. Les informations complètes concernant les agents dans le MBA présentent l'avantage d'accroître la flexibilité des modèles décisionnels au sein du calcul de la demande ; le lien avec des groupes aux comportements homogènes, tel qu'il existe dans le cadre du MGT, disparaît. La catégorisation et les paramètres des modèles de comportement ont été repris par le MGT de la région de Bâle pour les groupes aux comportements homogènes, tels qu'ils avaient été recueillis par l'Office fédéral du développement territorial (ARE). En ce qui concerne le MTBA, d'une part, de nouveaux modèles ont été évalués et, d'autre part, des paramètres existants ont été utilisés. Ceci n'a été possible que de manière limitée en raison de la différence de catégorisation des modèles de comportement à disposition (décision stratégique en matière d'élaboration de modèles) : la catégorisation pourra être repensée pour des applications futures.

La simulation du MTBA a été réalisée par le biais de MATSim et impliquant différents modules. Elle diffère fortement des résultats d'affectation du modèle agrégé. L'outil de simulation MATSim comporte un modèle permettant le suivi des véhicules, et la version disponible propose depuis longtemps le choix de l'heure de départ, de l'itinéraire et du mode

de transport. La simulation employée présente des caractéristiques stochastiques en raison de la définition discrète des agents ; par conséquent, les résultats de la simulation peuvent varier dans une certaine fourchette. Toute répartition, qu'elle soit déterministe ou stochastique, inclut uniquement le choix de l'itinéraire, ce qui se traduit également par des caractéristiques de rétroactions différentes (« boucle de rétroaction »). L'outil de simulation MATSim permet de choisir l'heure de départ, l'itinéraire ainsi que le mode de transport et nécessite, par conséquent, un processus important de rétroaction », ce qui génère des temps de calcul plus longs. Le choix de la destination peut donc également faire l'objet d'un nouveau calcul itératif dans une boucle externe. Le MGT région de Bâle implique un calcul séquentiel du choix du mode de transport et de la destination sauf pour l'affectation ; le choix de l'heure de départ est donc déduit à partir de données empiriques.

Conclusions de la comparaison des modèles

D'un point de vue méthodologique, le calcul de la demande du MGT région de Bâle et du MTBA Bâle ou de l'affectation n'ont fait ressortir aucun avantage explicite pour l'une ou l'autre méthode. Il convient plutôt de tenir compte des fonctionnalités en vue des applications futures. En termes de conclusion aussi, il s'agit bien moins d'une question générale à laquelle on répondrait par oui ou non que d'une question de combinaison des différentes méthodes, permettant d'aboutir à la solution globale optimale pour répondre à un besoin spécifique.

Une comparaison concrète entre les modèles s'est révélée très complexe et laborieuse en raison des diverses méthodes appliquées dans les différentes étapes, qui ne permettent qu'une comparaison limitée. Il convient en outre de souligner que les exigences posées aux modèles et les objectifs peuvent fortement varier. À ce stade, il n'est pas encore possible de formuler une prise de position univoque. Ci-dessous, un résumé de la comparaison des applications de modèles effectuées pour la région de Bâle :

Aussi bien le MTBA Bâle que le MGT région de Bâle reposent sur une méthodologie efficace : la méthodologie et la fonctionnalité intégrales du MTBA interviennent au niveau des activités et des chaînes de déplacement tandis que celles du MGT région de Bâle concernent un modèle basé sur des trajets, qui impliquent des groupes aux comportements homogènes. Les sommes marginales sont respectées dans les deux approches pour le calcul de la demande, avec la méthode gravitaire dans le MGT et le procédé de compensation dans le MTBA (Vitins & Erath, 2019). Les procédés de correction de la matrice portant sur la demande (modification numérique de la demande pour une meilleure conformité avec les valeurs de comptage) sont mieux établis pour le MGT, tandis que la « triple convergence » (choix du mode de transport, de l'itinéraire et de l'heure de départ) est représentée de manière plus complète dans le MTBA (notamment la représentation temporelle des chaînes de déplacement). La création d'un MTBA des plus chronophage mais s'adapte avec davantage de flexibilité aux particularités locales (flux avec l'étranger, sommes marginales dans le modèle décisionnel du choix de la destination). Le MGT est plus efficace pour les applications usuelles tandis que la méthodologie du MTBA se prête bien pour les scénarios plus complexes ainsi que pour ceux qui influencent la composante temporelle de l'enchaînement des activités et le choix du mode de transport à l'échelle de chaînes de déplacement complètes et qui ont recours à différents attributs détaillés spécifiques aux utilisateurs. Il existe pour l'instant peu de modèles de ce type suffisamment calibrés et formulés de manière adéquate pour mettre en exergue des avantages. En ce qui concerne la pertinence du modèle, les deux approches sont comparables en termes de statistiques globales agrégées. Contrairement au MGT région de Bâle, le MTBA Bâle n'a pas été call avec des valeurs de comptage à large échelle. La pertinence du MGT région de Bâle est un peu plus élevée en raison, d'une part, des ressources supplémentaires utilisées pour l'élaboration du modèle et a bénéficié d'une période plus longue de développement.. Par ailleurs, il a bénéficié d'une mise à jour récente ce qui a pu permettre d'en améliorer le calage.. Étant donné l'effet stochastique, on observe une variance dans la simulation MATSim lors d'une charge de trafic moindre. Des écarts sont possibles pour le MGT de la région de Bâle en raison des connecteurs reliant les zones hectométriques aux réseaux de transports qui sont de ce fait intégrés de manière ponctuelle dans le réseau de transport tous les 100 mètres.

Pour ce qui est des bases de données requises, il n'existe fondamentalement que de faibles différences entre les modèles : les deux approches utilisent, en effet, les bases élémentaires du microrecensement mobilité et transports (MRMT) ainsi que du sondage de préférences déclarées (*stated preferences*, SP) pour le choix du mode de transport et l'itinéraire. L'établissement de paramètres d'utilité est moins standardisé pour la simulation de trafic (MATSim) que pour le modèle agrégé. Ces paramètres ne sont parfois pas non plus disponibles dans leur intégralité pour les modèles agrégés ; par exemple, les paramètres relatifs au choix de destination n'ont pas pu être estimés de manière systématique. Les deux approches ont ici un retard à rattraper. Une population synthétique et des prévisions correspondantes sont nécessaires comme bases pour le MTBA (p. ex., à partir de la population synthétique de l'ARE). On ignore pour l'heure comment se développera le besoin concernant la population synthétique et si, à l'avenir, les modèles agrégés généraux utiliseront une telle population comme base, à l'image du modèle national de trafic voyageurs (MNTP).

L'élaboration d'un modèle dans le cadre du MTBA Bâle demande environ 50 % d'efforts en plus que pour un modèle agrégé comparable, entre autres en raison du calcul des chaînes de déplacement et des modèles partiels supplémentaires ainsi que de leur traitement. Une population synthétique a été établie pour la Suisse (Bodenmann et al., 2019) et peut être utilisée, sous réserve des limitations relatives à la protection des données figurant dans le catalogue et à l'exception des régions limitrophes avec l'étranger. Les temps de calcul sont plus longs pour le MTBA Bâle, même avec une estimation sur la base des toutes derniers développements permettant une accélération des calculs dans MATSim ; il convient toutefois de souligner ici les différences en termes d'efforts de calcul (thématique de la « boucle de rétroaction »). On peut toutefois s'attendre à une charge de calcul raisonnable pour la plupart des applications de modèles. Selon l'application et les scénarios, les possibilités d'évaluation supplémentaires offertes par le MTBA peuvent compenser le temps de calcul.

En termes de logiciels disponibles, l'avantage va au MGT, car ce modèle est intégralement mis en œuvre dans TransCAD. Le MTBA Bâle utilise le logiciel *open source* MATSim pour la simulation, génère la demande principalement dans R CRAN ainsi que dans des bases de données standardisées et fait également usage de calculs réalisés en SQL. Ce procédé requiert un grand effort de programmation lorsqu'il s'agit d'élaborer le modèle ; Pour les domaines d'utilisation standards, des connaissances (informatiques) de base suffisent pour la programmation, car de nos jours le MBA n'est que partiellement pris en charge par des logiciels standards ; par ailleurs, les licences disparaissent. La visualisation intervient via un SIG et peut être élargie avec un outil de visualisation pour MATSim. À l'avenir, le calcul de la demande pourra également être réalisé dans un logiciel MBA (cf. ci-dessous). L'Abb. 5 affiche un aperçu des différents composants dans le cadre de la comparaison des modèles ainsi qu'une évaluation qualitative de l'élaboration et de l'utilisation des modèles. Les différences principales résident dans le temps de calcul et la disponibilité du logiciel, tous deux sont optimisés au niveau du MGT, tandis que le MTBA affiche un certain retard. Par ailleurs, l'effort investi pour la création d'un modèle est plus élevé pour le MTBA. En revanche, ce dernier modèle peut, d'une part, calculer des scénarios plus importants pour lesquels la variation temporelle des plans quotidiens joue notamment un rôle essentiel et, d'autre part, évaluer les agents ainsi que l'enchaînement de leurs activités sur la base de caractéristiques au choix. Les tests de réalité et de sensibilité ont été menés à titre d'exemple sur des applications tests et des caractéristiques sélectionnées.

	MGT région de Bâle					MTBA Bâle				
	Bases de données	Estimation de la charge	Méthodologie, fonctionnalité	Temps de calcul	Disponibilité logicielle	Bases de données	Estimation de la charge	Méthodologie, fonctionnalité	Temps de calcul	Disponibilité logicielle
1) Données d'entrées du modèle	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Irréalizable / non disponible	Irréalizable / non disponible	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable
2) Calcul de la demande	Disponible / justifiable	Irréalizable / non disponible	Irréalizable / non disponible	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Irréalizable / non disponible	Disponible / justifiable	Irréalizable / non disponible	Irréalizable / non disponible
3) Répartition et simulation	Disponible / justifiable	Irréalizable / non disponible	Disponible / justifiable	Irréalizable / non disponible	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Irréalizable / non disponible	Disponible / justifiable	Irréalizable / non disponible	Irréalizable / non disponible
4) Tests de sensibilité réalisés	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Irréalizable / non disponible	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Irréalizable / non disponible	Irréalizable / non disponible	Disponible / justifiable
5) Tests de réalité effectués	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Irréalizable / non disponible	Disponible / justifiable
6) Scénarios réalisés	Disponible / justifiable	Irréalizable / non disponible	Irréalizable / non disponible	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Disponible / justifiable	Irréalizable / non disponible	Disponible / justifiable

Échelle : Disponible / justifiable Irréalizable / non disponible Irréalizable / non disponible

Abb. 5 Disponibilité et possibilités de réalisation des composants de modèles et des applications, analysées pour le MGT région de Bâle et le MTBA Bâle.

Synthèse et recommandations

Les entretiens d'experts et l'étude bibliographique en question ainsi que les applications du modèle à Bâle ont révélé que les modèles agrégés de demande de transports et les MBA sont tous deux des approches hautement complexes liées à des exigences élevées en termes d'élaboration, et ce, en raison des attentes accrues concernant les possibilités d'expliquer les modèles de transport. Le niveau de difficulté diminue fortement lorsqu'un modèle est créé sur mesure pour un seul cas d'application.

Les modèles agrégés de demande de transports sont bien plus faciles à réaliser lorsqu'il s'agit d'applications standards pour lesquelles non seulement les approches mais aussi les paramètres requis ont déjà été suffisamment validés par des enquêtes. Ceci concerne en particulier les modèles de transport utilisés pour évaluer les mesures d'infrastructure, telles que les replanifications de l'infrastructure routière, les analyses coûts-utilité de l'infrastructure de transport ou les analyses portant sur l'aménagement du territoire. Les avantages particuliers d'un MBA, tels que le choix de destinations secondaires (pour faire des achats, régler différents points et s'adonner à ses loisirs) en fonction des destinations primaires (domicile, lieu de travail et de formation) ou la disponibilité des équipements de mobilité sur toute la chaîne de déplacement, ne ressortent quasiment pas dans ces applications standards. La flexibilité accrue d'un MBA demande toutefois des efforts supplémentaires considérables pour la création et le calibrage du modèle (jusqu'à 50 % en plus), qui ne sont pas appréciés à leur juste valeur dans les applications standards (cas d'application 1a, 2a, 5, 8 dans le tableau 2).

Les avantages d'un MBA apparaissent dès qu'un comportement personnel différent contribue de manière décisive à la pertinence du modèle. Ceci s'applique aussi bien aux planifications détaillées des transports publics (TP) qu'aux analyses en matière de mobilité et de télétravail. Étant donné la modélisation complète des chaînes d'activités dans le contexte du ménage, des décisions portant sur le choix du mode de transport sont prises pour des chaînes de déplacement complètes d'une personne, si bien que la représentation des trajets intermodaux (p. ex., parcs relais ou covoiturage) est plus fidèle que dans le modèle

agrégé de demande. Par rapport aux modèles agrégés de demande de transports (dont l'échelle est moins précise), les MBA à très haute résolution impliquant une population synthétique sont également mieux adaptés pour les trajets courts, comme c'est généralement le cas pour les déplacements à pied et à vélo.

Lorsqu'il est conjugué à un modèle de fluidité du trafic au lieu d'un simple modèle de répartition pour un choix simultané du mode de transport, des heures de départ et de l'itinéraire et que le choix du moment de la journée est bien calibré, un MBA présente un avantage par rapport à un modèle agrégé pour toutes les questions où l'heure de la demande joue un rôle essentiel (p. ex., planifications des réseaux de lignes dans les TP). La répartition en fonction du moment de la journée est également importante en ce qui concerne le *mobility pricing*. Toutefois, que l'on utilise un MBA ou un modèle agrégé, le calage de l'élasticité des prix constitue le plus grand défi pour le *mobility pricing*.

Tab. 2 Comparaison entre les champs d'application des MBA et des modèles de demande agrégés

Capacité de modélisation de la demande	<input type="checkbox"/> difficile ou impossible à représenter <input checked="" type="checkbox"/> possibilité de représentation limitée ou moyennant des efforts considérables <input checked="" type="checkbox"/> facile à représenter			
Importance pour la planification des transports en Europe centrale	+ grande importance, application régulière 0 importance moyenne, application pratique occasionnelle - importance faible, application pratique rare			
N°	Développements et mesures	MBA	Modèle agrégé	Importance
Projets avec adaptation de l'offre				
1a	Étude de la circulation pour une nouvelle construction ou augmentation des capacités d'axes routiers importants (modèle des jours ouvrés)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	+
1b	Nouvelle construction ou augmentation des capacités d'axes routiers importants avec analyse de l'efficacité (modèle des heures de pointe)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
2a	Planification des réseaux de lignes dans les TP	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	+
2b	Études TP avec mesure de l'utilisation de véhicules	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
2c	Planification des réseaux de lignes dans les TP en tenant compte de différents modèles tarifaires	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Projets impliquant une adaptation de l'offre				
3	Construction de parcs relais	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
4	Construction d'infrastructure destinée au trafic pour les déplacements à vélo et à pied	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Études de rentabilité				
5	Analyse coûts-utilité (actuelle)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	+
6	Analyses coûts-utilité différenciées selon les groupes de personnes	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-
7	<i>Mobility pricing</i>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Projets avec adaptation de la demande				
8	Aménagement du territoire et développement de l'urbanisation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	+
9	Télétravail	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Thématiques d'avenir				
10	Partage de véhicules	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
11	Covoiturage	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-
12	Mobilité électrique	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-

Avant d'opter pour un modèle, il convient de déterminer l'ampleur du développement de logiciel propriétaire requis pour l'application en question. Pour les MBA, il n'existe pas encore de modèles disposant d'une interface complète et nécessitant uniquement un calibrage des paramètres spécifique pour le périmètre concerné, tel que c'est déjà le cas pour de nombreuses applications à l'aide de logiciels commerciaux de planification des transports impliquant des modèles de demande agrégés. Aux États-Unis, un groupe d'utilisateurs (*Association of Metropolitan Planning Organizations*, 2019) pilote les développements *open source* de MBA pour permettre une utilisation multiple et transmissible de modèles de demande. Des logiciels commerciaux de planification des transports, tels que PTV Visum, promeuvent désormais eux aussi le développement de MBA propres grâce à des scripts entièrement documentés dans le code source. Le degré de maturité des logiciels n'est toutefois pas encore comparable au modèle de demande agrégé. Par conséquent, un modélisateur des transports et une personne bénéficiant d'une expérience pratique dans la programmation sont requises lors de la création d'un MBA complexe et des applications.

Une méthodologie pour le choix de l'itinéraire doit également être déterminée au début de la procédure, en aval d'un MBA. Aux États-Unis, on opte généralement pour l'approche classique où des matrices portant sur la demande de transports résultent du MBA. Celles-ci sont ensuite réparties à travers les réseaux de transport via des logiciels commerciaux de planification des transports. Dans de nombreux MBA en Europe (p. ex., modèles suisses de l'EPFZ et des CFF, modèle viennois de l'AIT, modèle de Bologne et de Hasselt dans le projet européen iScape), la génération de trafic, le choix de la destination et le calcul des chaînes de déplacement sont connectés à la simulation de trafic MATSim pour représenter le choix de l'heure de départ et du mode de transport ainsi que la simulation du choix de l'itinéraire dans la simulation basée sur les agents (cf. Abb. 6). La simulation MATSim présente les avantages d'une rétroaction dynamique temporelle au détriment d'une convergence récurrente stable des résultats. Contrairement à l'affectation du trafic à partir des matrices issues la demande, qui ne peuvent contenir des chiffres non entiers, le choix de l'itinéraire lié à des agents doit nécessairement contenir des chiffres entiers ce qui requiert des itérations de calcul chronophages avant d'atteindre une charge de trafic stable.

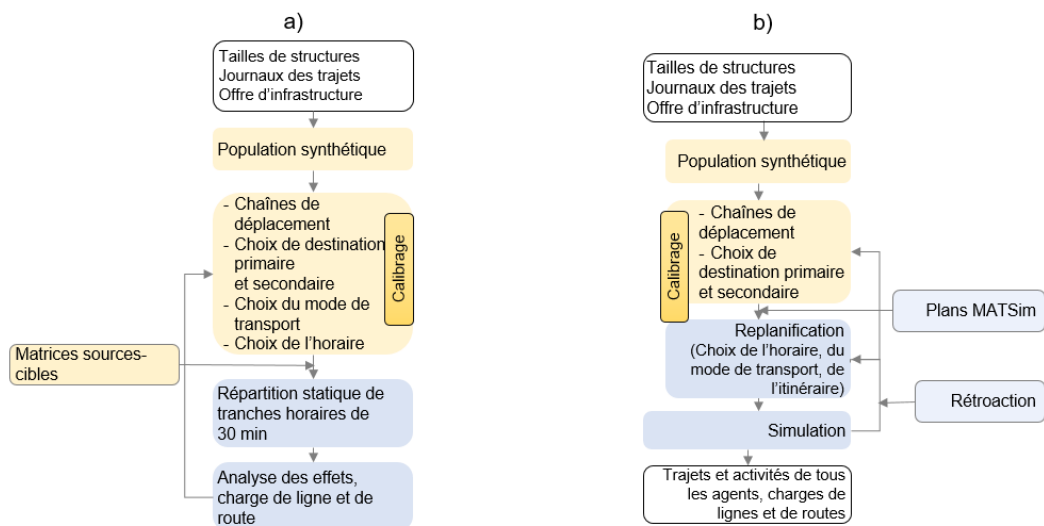


Abb. 6 MBA conjugué à des modèles de répartition (a) ou à une simulation de trafic telle que MATSim (b) ; l'approche (b) a été choisie pour le MTBA Bâle.

Des tests de réalité en lien avec le MTBA Bâle ont permis de démontrer comment les applications de MBA pouvaient être réalisées en Suisse. Toutefois, il est nécessaire de réaliser des approfondissements ultérieurs sur les modèles décisionnels et l'amélioration du niveau de décalage afin que le potentiel des MBA puisse être complètement exploité. Des études parallèles aux projets de planification standards sont recommandées pour encourager les possibilités d'utilisation d'un MBA en Suisse. L'échange d'expériences entre les

développeurs de logiciels et de modèles ainsi que les utilisateurs pourrait être promue sous l'égide d'une seule organisation, telle que l'Association suisse des ingénieurs et experts en transports (SVI). Une procédure par étapes est conseillée pour les applications futures où les MBA devront également jouer un rôle. Dans un premier temps, il s'agirait de récolter les expériences réalisées avec une population synthétique en lieu et place de l'utilisation traditionnelle des données structurelles spécifiques aux cellules, et ce, avant de compléter un modèle de demande basé sur les activités pour en faire un MBA. Enfin, on passera d'un modèle d'affectation basé sur des matrices de demande à un modèle dynamique du trafic impliquant le choix de l'itinéraire basé sur les agents.

Pour ce qui est du développement des modèles de demande de transports, il faudrait à l'avenir accorder davantage d'importance à l'effet des variables temporelles, indépendamment de la méthodologie choisie, et ce, en vue de pouvoir mieux représenter les influences telles que l'accessibilité à pied et les accessibilités multimodales. Jusqu'ici, il n'existe pas d'études empiriques permettant d'évaluer les modèles de comportement en matière de choix de la destination, du mode de transport et de l'itinéraire, et ce, non seulement en termes agrégés mais aussi en fonction des personnes. En tenant compte des chaînes de déplacements au lieu de trajets individuels, les paramètres relatifs au choix du mode de transport ne doivent pas être définis sur la base du motif du déplacement mais de la chaîne complète de déplacements réalisés. Qui plus est, il faut vérifier la disponibilité des véhicules dans le contexte des ménages pour éviter de devoir utiliser des valeurs moyennes pour estimer cette valeur.

Summary

Introduction, objectives and methods

In Switzerland and Europe, almost exclusively trip-based macroscopic travel demand models are used in practice today. In such models, trips are classified by origin-destination pairs, defined by the activities made at the origin and destination. Activity-based models (ABM) differ substantially from trip-based models. ABMs are based on activity chains. Individual mobility behaviour is considered as the activities depend on personal properties. ABM models a trip between a pair of activities including mode of transport and departure time. The activity chain is modelled as a whole considering individual properties of the particular person.

Currently, ABM-based traffic models are mainly used in the USA. Usually, travel demand matrices are generated based on ABM outcome and standard assignment methods are applied to generate traffic flows. A feedback loop between the ABM and the assignment supplemented by resistance (impedance) matrices guarantees an equilibrium state.

Agent-based simulation models allow to load a traffic network dynamically and at a disaggregated level of individual persons (agents). Therefore, person-specific attributes are also available to conduct route choice. The open source software MATSim which was co-developed at ETH Zurich and is often used in Swiss research, includes such functionalities. In addition, it integrates route choice, mode choice and departure time choice by means of an iterative learning procedure. Coupled with a microscopic simulation, ABMs have the ability to map trips with fine temporal resolution over the entire course of the day

ABM is seen as having the potential to complement and, in the long term, replace the classic path-based macroscopic traffic models. The finer temporal and spatial granularity of the model and the traceability of individual persons over the entire course of the day make it possible to address traffic issues in greater detail than aggregated models. In principle, aggregated models and ABM both require empirical data bases to develop suitable decision models. In the case of ABM, there is still a need for further development of the existing approaches and the calibration methods.

There are several reasons that make the use of ABM difficult in practice. Most of the reasons are a consequence of the complexity of ABM, especially when coupled with microsimulation. As complexity increases, so do the demands on resources (data, software, computing capacity, personnel expertise, etc.). Nevertheless, ABMs have been successfully used in practical transport planning in some metropolitan regions of the USA for several years (e.g. SoundCast¹⁷, SF-Champ¹⁸, Travel Model One¹⁹, Activity Based Modeling der Atlanta Regional Commission²⁰, Sandag²¹). These ABMs are applied in combination with aggregated assignment models. They are used for the evaluation of short-term transport planning measures as well as strategic issues (see e.g. Erhardt et al. (2012) and Sall (2012)). User groups have also emerged that further develop the modelling, software and implementation at a practical level (e.g. www.activitysim.org, www.zephyrtransport.org).

This study aims to create a decision support for operators of traffic models. Benefits, prerequisites, advantages and disadvantages of the use of activity-based models (ABM) are presented. Firstly, expert interviews are carried out. Secondly, a comparison of an ABM with a classical macroscopic model was conducted using a practical case study. The activity-based traffic model Basel (ABVM Basel) used for this purpose. The model was developed as applied research project and is used for corresponding questions. The aggregated and route-based general travel demand model for the Basel region was updated in 2019 and is used by the authorities as a planning tool for practical applications.

¹⁷ <https://www.psrc.org/activity-based-travel-model-soundcast>

¹⁸ <https://www.sfcta.org/sf-champ-modeling>

¹⁹ <https://github.com/BayAreaMetro/modeling-website/wiki/TravelModel>

²⁰ <https://atlantaregional.org/transportation-mobility/modeling/modeling/>

²¹ <https://www.sandag.org/index.asp?subclassid=120&fuseaction=home.subclasshome>

Expert interviews

In 13 expert interviews, the first step was to clarify the requirements placed on traffic models today and their application in the planning process, regardless of the model approach. In further steps, opinions were obtained on the potentials and challenges of using activity-based traffic models in practice. In addition, experts who already work with ABM's expressed the hurdles encountered in the development and introduction of ABM's as well as its benefits for practical applications.

The experts were selected to ensure that both experts with and without experience of ABM were considered and that model operators, model developers and software developers were considered and research. This ensured a balanced representation of expertise on practical experience in travel demand models to adequately identify obstacles when introducing an ABM.

For current applications the classic aggregated travel demand models are well suited. Due to tight time frames and financial constraints, the full potential of present trip-based models is not always exploited in practice. In addition, not too many practical applications were identified yet, in which the benefits of an ABM were crucial. Thus, it is concluded that the use of activity-based models only makes sense if a) new measures become more relevant where activity-based models offer practical advantages, b) operators are willing to provide more resources for model development and application, and c) the handling of ABM becomes more accessible and efficient (e.g. due to the availability of appropriate software).

In the USA, ABMs have been developed for various metropolitan regions and are used for real applications. In Switzerland, the SBB has built up its own ABM over the last few years, which is now also being used continuously to support planning and operational applications including microsimulation. In addition, there is an ABM for the Basel region which is being created as an applied research project.

The experiences in the USA as well as by SBB in Switzerland show that the sub-models of an ABM can be flexibly calibrated and thus meet the practical requirements with respect to model accuracy. ABMs respond more sensitive to measures, since the sub-models can represent behavioural reactions in a more differentiated way. However, activity-based models developed in academic institutions for research purposes are rarely calibrated in such a way that they can be used for practical travel demand applications.

Experience with ABM in practice (e.g. Atlanta Regional Commission, 2019) shows that an ABM can potentially model more complex behavioural responses in comparison to an aggregated model. However, suitable decision models are required and have to be calibrated by empirical data sets. Some respondents without practical ABM experience indicated doubts on the possibility to calibrate an ABM and availability of plausible decision models. This statement is at odds with documented practice in the US. Therefore, it is deduced that there is a need for clarification on the current status of the use of ABM in practice.

These advantages are especially relevant in applications which examine new mobility measures such as new transport modes and travel demand management measures. The experts interviewed admit that these questions become more relevant in the future. However, improved behavioural models are also needed to make these potentials of ABM usable in practice.

Compared to aggregated models, the development and application of activity-based models require higher technical skills from the model operators. With the release of PTV Visum 2020, however, there are now software tools available with a graphical user interface that simplify the application of activity-based models. Likewise, TransCAD supports the application of ABM, but the models itself must be defined by the model developer. These developments are considered very positive by operators and model developers in practice. Nevertheless, programming skills are currently necessary for the implementation and application of an ABM. Furthermore, it has been shown that close and trusting cooperation between operator and developer is also an important element for success in the development of an ABM.

Not using an agent-based simulation will reduce the technical skills when applying an ABM. This has been done in various applications in the USA to limit the complexity in the transition from aggregated to activity-based models.

The expert interviews clearly identified the need of well-trained personal when moving from aggregated to activity-based models. Training and the continuous exchange of knowledge is necessary if an ABM will be applied successfully in practical applications. The well-functioning exchange between operators as well as research and start-up companies in Switzerland forms a good basis to establish administrative structures of such knowledge exchange. The provision of a nationwide synthetic population and the experience gained in setting up the activity-based traffic model at the SBB in Switzerland provide a source for activity-based models in the future.

Model comparison

The methods of an ABM as well as an aggregated model are compared with each other in an exemplary manner for the model region of Basel. The Basel model region was chosen for two reasons: On the one hand, an aggregated model as well as an ABM model is available for the same survey area. On the other hand, the aggregated travel demand model is unique in Switzerland with regard to its high spatial resolution (zoning by the hectare). This allows an analysis in which the advantage of a potentially higher model accuracy, which is possible with a spatially and temporally discrete agent-based approach, can also be achieved with a trip-based, but high spatial resolution. Any additional evaluation with a spatial aggregation and thus with fewer traffic zones allows to compare an aggregated cantonal model with zone granularity common in practice with the activity-based model with a fine resolution.

Comparison of models and methods with regard to model components

Both modelling approaches are compared according to Abb. 7. The focus is on the demand calculation as well as the different calculation methods of traffic volumes. The evaluation is structured according to six criteria: Requirements of the data requirements, modelling effort, methodology and functionality, comparison of results and empirical data, computing effort and availability of suitable software. Each step within the comparison is shown in Abb. 7. The main comparison refers to the demand calculation (arrows 1a and 1b shown in the centre of Abb. 7), the route choice (assignment or simulation) and a sensitivity analysis (2a and 2b), the volume evaluation (3) and sample scenarios (4). The comparison refers to single core elements and does not claim to be complete.

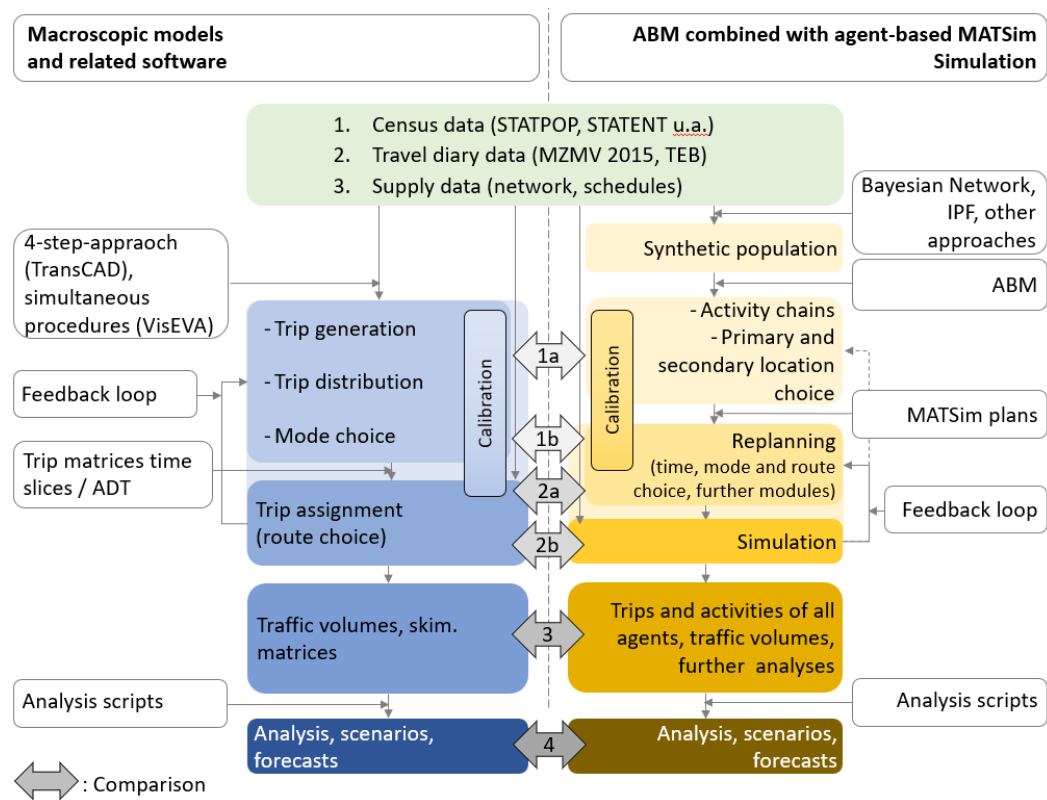


Abb. 7 Schema of items within this project

Results of the model comparison GVM Basel and ABVM Basel

The destination choice and the creation of trip chains are the main differences in the methodology of the demand calculation. Furthermore, behaviourally homogeneous groups are not required in an ABM as individuals are substituted by agents and their characteristics are consistently available as information. The ABVM Basel divides the destination choice into a primary (commuting and educational trips) and secondary destination choice (remaining trip purposes). It replicates the properties of each trip chain (trip definition, sequence of activities and duration). In contrast, the four-step approach of the GVM Basel does not consider primary and secondary activities and temporal aspects are only handled statically. The advantage of the complete information about the agents in the ABM increases the flexibility in the decision models within the demand calculation; the reference to behaviourally homogeneous groups as in the GVM is omitted. The categorisation and the parameters of the behavioural models were adopted for the GVM Basel for the behaviourally homogeneous groups as collected by the ARE. In the ABVM, new models were estimated in some cases and in others existing parameter sets were used. Due to the different categorisation of the existing behavioural models, new models were estimated to a limited extent (strategic decision when creating the model). The categorisation should be reconsidered for future applications.

The simulation in ABVM Basel includes a MATSim simulation with different modules. It differs significantly from the traffic assignment in the aggregated model. The MATSim simulation includes a car following model, and models for departure time choice, route choice and mode choice. Discrete agents are modelled stochastically, so that the simulation results vary within a range. An assignment itself only contains route choice. A MATSim calculation contains departure time choice, route choice and mode choice, which leads to differences in the feedback loop ("big loop") and longer computation times. The destination choice can also be iteratively recalculated in an external loop. The GVM Basel has a sequential calculation of the mode choice and destination choice outside the assignment; the departure time choice is thereby derived from empirical data.

Conclusions of the model comparison

From a methodological point of view, neither the aggregated nor the agent-based demand model has a clear advantage over the other. The same holds for the traditional assignment model versus simulation of traffic flow. The model decision has to be based on the functionalities required by the anticipated applications. Often, it will not be a clear decision of one or the other, but rather a combination of the different methods, which then result in the optimal solution for the respective model application.

It has been shown that a concrete model comparison is very complex. Different methods are used in the modelling steps, which only allow for a limited model comparison. Additionally, the model purposes differ between the models, they are made with different motivations and aims. The comparison of the model applications carried out for the Basel model region is summarised below:

Both models, the ABVM Basel as well as the GVM Basel have a working methodology. The ABVM is fully based on activity and trip-chains. The GVM Basel has a complete travel demand model based on trips of behaviourally homogeneous groups. Both models respect the totals of columns and rows of origin-destination matrices; the GVM implements the gravitational approach and the ABVM the balancing method (Vitins & Erath, 2019). Travel demand estimation is more established in the GVM Basel, while the "triple convergence" (simultaneous mode, route and departure time choice) is better modelled in the ABVM. Creating the ABVM was more complex than the GVM Basel, but adapts more flexibly to local conditions such as cross-border flows and totals of columns and rows in the destination choice decision model. The GVM is more efficient for common applications, but the ABVM methodology is better suited for more complex scenarios especially scenarios which require temporal constraints of activities. However, since models with temporal constraints of activities are rarely calibrated yet, they lack advantages of practical applications. In terms of model quality, both demand models are comparable at the level of aggregated overall statistics. The ABVM Basel was not calibrated against area-wide vehicle counts like the GVM Basel. The GVM Basel is slightly better due to the additional resources devoted to model development. The GVM was also improved and recalibrated in an update step on the basis of experience in practical application. Due to stochasticity, a variance can be observed in the MATSim simulation at low traffic loads. In the case of the GVM Basel, differences in the link volumes may occur due to the zonal connectors at particular points every 100m and not continuously along a link.

The data base required for both models are very similar; the elementary data of the Microcensus Mobility and Traffic and the Stated-Preference Survey on transport mode and route choice behaviour are used by both models. The parameters of utility functions within the agent-based simulation of MATSim is less standardized than for the aggregated model. Some of the parameters are not fully available even for aggregated models; for example, the destination choice parameters have not been estimated in many previous applications. There is a need to catch up for both model approaches. A synthetic population and corresponding forecast are necessary for the ABVM (for example from existing synthetic population SynPop of the ARE). Continuous development of the Synpop is not yet clarified as well as the use of synthetic populations within aggregated models.

The ABVM Basel requires about 50% more effort to create a model which compares to an aggregated model. Among others, the calculation of calibrated trip chains and additional sub models requires additional effort. A synthetic population was created for Switzerland (Bodenmann et al., 2019) and can be used for applications subject to data protection restrictions. The synthetic population cannot be used for regions next to neighbouring countries. The computation times are higher for the ABVM Basel, even with the latest accelerations within the MATSim simulation. However, the "big" feedback loop is responsible to some extent of the additional computational effort. Nevertheless, most model applications can be simulated within reasonable computation durations. The additional evaluation possibilities of the ABVM can compensate the calculation time depending on the application and scenarios.

Since the GVM is completely implemented in TransCAD it has an advantage on software quality. The ABVM Basel uses the open source software MATSim for the simulation. The demand model is implemented mainly in R-Cran with standardized databases accessing SQL spreadsheets. The usage of different open-source software requires a high programming effort for model creation. Common applications of the travel demand require basic

programming skills, because today's ABM is only partially supported by standard software. However, the ABVM Basel does not require software licence cost. Visualization is done in GIS and can be extended with visualization tools for MATSim. In the future, the demand calculation can also be implemented in commercial ABM software (see below).

An overview of the steps of the model comparison and qualitative assessment is given in Abb. 8. Both models differ mostly in the computation time and the software availability; the GVM is optimized for both of these criteria, so that the ABVM still needs to catch up. In addition, the ABVM needed more effort to set up the model. The ABVM offers advantages in calculating large scenarios, especially if the temporal variation of daily schedules is important including a variety of properties of each agent and their activity chains. The reality and sensitivity tests were carried out for selected test applications and characteristics.

	GVM Basel					ABVM Basel				
	Data requirements	Time and cost estimations	Method, functionality	Calculation time	Software availability	Data requirements	Time and cost estimations	Method, functionality	Calculation time	Software availability
1) Input data	Available	Available	Available	Available	Available	Unfeasible	Unfeasible	Available	Available	Available
2) Demand calculation	Available	Unfeasible	Unfeasible	Available	Available	Available	Unfeasible	Available	Unfeasible	Available
3) Assignment and simulation	Available	Unfeasible	Available	Unfeasible	Available	Available	Unfeasible	Available	Unfeasible	Available
4) Conducted sensitivity tests	Available	Available	Available	Unfeasible	Available	Available	Available	Unfeasible	Unfeasible	Available
5) Conducted reality tests	Available	Available	Available	Available	Available	Available	Available	Available	Unfeasible	Available
6) Conducted scenario calculations	Available	Unfeasible	Unfeasible	Available	Available	Available	Available	Available	Unfeasible	Available

Scale: Available / feasible (green) | Unfeasible / unavailable (red)

Abb. 8 Availability and feasibility of the model components and applications, examined for the GVM Basel and ABVM Basel

Synthesis and recommendations

Both the expert interviews together with the literature research and the model applications in Basel have shown that both aggregated transport demand models and ABMs are highly complex models due to increased expectations of transport planners to transport model. High expectations imply intensive model development. The degree of complexity decreases significantly if a model is only created for exactly one application.

Aggregated transport demand models are particularly easy to create if they are standard applications for which not only the model approaches but also the required model parameters from surveys have been sufficiently tested. This applies in particular to transport models that are used for the assessment of infrastructure measures such as replanning of road infrastructure, cost-benefit analyses of the transport infrastructure or spatial planning. In these standard applications, the particular strengths of an ABM, such as the choice of secondary destinations for shopping, errands and leisure depending on the primary destinations of housing, work and education, or the availability of mobility tools along the entire trip chain, are hardly used. However, the greater model flexibility of an ABM requires considerable additional effort in model development and calibration (up to approx. 50%), which is not appropriately recognised in the standard applications (use cases 1a, 2a, 5, 8 in Tab. 3).

ABM offers advantages as soon as the variety of properties of individual persons are relevant to the results. This applies to detailed public transport planning as well as to studies on mobility and home office. Due to the continuous modelling of activity chains in the household context, transport mode decisions are made for entire trip chains of a person, so that intermodal trips such as Park&Ride or Ride-Sharing are modelled more naturally than in the aggregated demand model. High resolution activity-based models with a synthetic population are also better suited for trips with short travel distances, as is common in pedestrian and bicycle traffic, than aggregated travel demand models which are scaled in a lower detail.

If an ABM simulates mode choice, departure time choice and route choice simultaneously with a traffic flow model in a well calibrated manner rather than assigning trips only, it has an advantage over an aggregated model, such as route network planning in public transport. The time of day distribution is also important for mobility pricing. However, in mobility pricing, the adjustment of price elasticity is the biggest challenge regardless of whether an ABM or an aggregated model is used.

Before a model decision is made, it must be determined how much proprietary software development must be undertaken for the respective model application. Fully implemented ABM models are not currently available. While standard 4-step travel demand models mainly require parameter adaption of existing models, ABMs must be scripted. In the US, a group of municipal users (Association of Metropolitan Planning Organizations, 2019) supports open-source developments of ABMs to enable transferable multiple uses of demand models. Commercial transport planning packages such as PTV Visum also encourage the development of activity-based models through fully documented scripts in the source code. However, the maturity of the software is not yet comparable to that of aggregated demand models. The development of a complex ABM and its application requires not only a traffic modeller but also a person with practical programming experience.

Starting with an ABM, a methodology for route choice must be defined. In the USA, the classical approach is usually chosen, in which traffic demand matrices are generated as a result of an ABM. The ODs are assigned using commercial transport planning software. In numerous European ABMs (e.g. Switzerland models of ETHZ and SBB, Vienna model of AIT, Bologna and Hasselt model in the EU project iSCAPE), traffic generation, trip destination and calculation of trip chains are coupled with the traffic flow simulation MATSim to simulate departure time choice, mode choice and route choice within the agent-based simulation (see Abb. 9). The MATSim simulation offers the advantages of time-dynamic feedback at the expense of stability and robustness of the results. The route choice of integer agents requires computationally intensive iterations before stable traffic volumes are achieved, in contrast to the traffic assignment of demand matrices, which can also contain non-integer trips.

Tab. 3 Areas of application of ABM and aggregated travel demand models

Modelling capabilities within the demand model	<input type="checkbox"/> impossible or very limited possibilities to model that item <input type="checkbox"/> limited or difficult to model that item <input type="checkbox"/> item suitable to be modelled
Importance for practical applications in Central Europe	+ very important with frequent applications 0 fairly important with reasonable number of applications - unimportant with rare number of applications

No	Application area and measures	ABM	Aggregated model	Importance
Applications which adapt the supply side (infrastructures)				
1a	Travel studies on new road designs or capacity increase of road segments (average working days)	□	■	+
1b	Capacity analysis of new road designs or capacity increase of road segments (peak hour models)	□	□	0
2a	Line planning of public transport	■	■	+
2b	Public transport studies including vehicle scheduling	■	□	0
2c	Line planning of public transport including fare systems	□	□	0
3	Park & Ride systems	□	□	0
4	Road infrastructure for cyclists and pedestrians	■	□	0
Economic appraisals				
5	Cost-benefit analysis	□	■	+
6	Cost-benefit analysis differentiated by user classes	■	□	-
7	Mobility Pricing	□	□	0
Applications including travel demand management				
8	Spatial and land-use planning	□	■	+
9	Home office	■	□	0
Future applications				
10	Vehicle Sharing	□	□	0
11	Ridesharing	■	□	-
12	Electro mobility	□	□	-

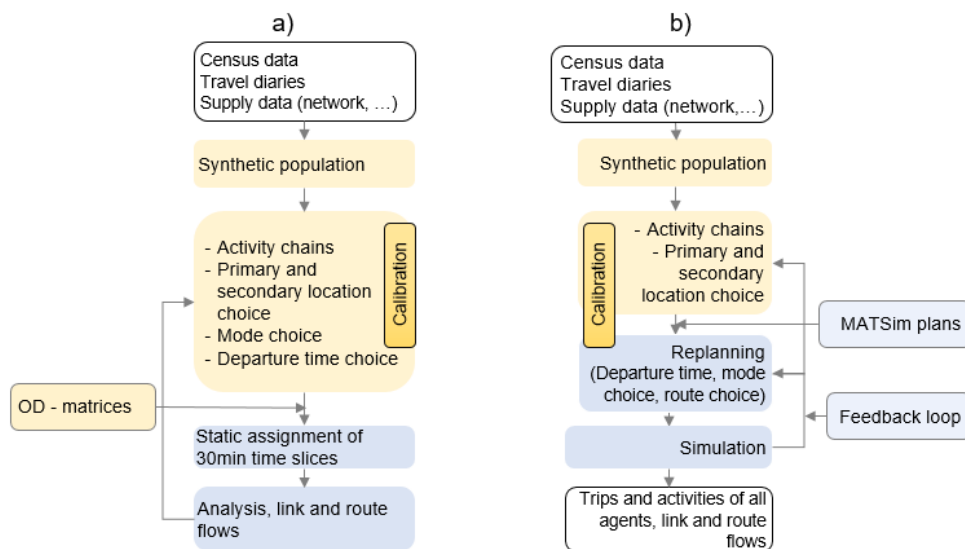


Abb. 9 ABM with an assignment model (a) or with traffic simulation such as MATSim (b); in the ABVM Basel, the model approach (b) was chosen.

The reality tests with ABVM Basel demonstrated the application of an ABM in Switzerland. However, there is still a need to deepen suitable decision models and calibration methods for ABM among modellers to be able to use the full potentials of an ABM. Accompanying studies on standard planning projects are recommended to promote the use of an ABM in Switzerland. Under the umbrella of an organisation such as the SVI, an exchange of experience between software developers, model developers and model users could be promoted. For future applications in which ABM should also play a role, a step-by-step approach is recommended. First, experience should be gained with a synthetic population instead of the traditional use of cell-specific structural data before an activity-based demand model is completed into an ABM. Finally, the step from an assignment model based on demand matrices to a traffic flow model with agent-based route choice can be taken.

In the further development of travel demand models, more attention should be paid to the effect of spatial variables in the future, regardless of the methodology chosen, in order to be able to better represent influences such as walking and multimodal accessibility. There is also a lack of empirical studies so far to be able to estimate the behavioural models for destination, mode and route choice not only on an aggregated level, but also person related. Considering tours rather than individual trips, the parameters for the mode choice must not be made per trip, but per tour. Vehicle availability should also be checked in the household context instead of having to operate with average values of car availability.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Verkehrsmodellierung hat eine lange, fortlaufende Entwicklungszeit, und beginnt um 1950 mit den ersten Nachfrage- und Umlegungsmodellen, sowie Verkehrssimulationen. Die ersten aggregierten Nachfragemodelle und Verkehrsumlegungsmodelle (Frank & Wolfe, 1956) entstanden in den 50-iger Jahren. Über die diskreten Nutzen- und Entscheidungswahlmodelle seit Ende der 70-iger Jahre bis hin zu aktuellen grossräumigen Modellen und Simulationen zeigt sich ein aktives Forschungsfeld, das auch mit etwas Zeitverzögerung von den wichtigen kommerziellen Softwareanbietern (e.g. Inro, PTV, Caliper, Citilabs u.a.) in ihren Produkten (Emme, Visum, TransCAD bzw. Cube) aufgegriffen wird. Zentral und konstant bleiben die Unterteilungen zwischen aggregierter und diskreter, agentenbasierter Nachfrageberechnung, sowie zwischen aggregierter Umlegung und diskreter Mikrosimulationen. Die Bedeutung wird im Folgenden zusammengefasst.

Die Nachfrageberechnungen von aggregierten Modellen basieren entweder auf Wegen in aggregierter Form (Anzahl Fahrten) oder auf Wegeketten unter Einbezug von Aktivitäten und Dauer. Die Verkehrsnachfrage zwischen Verkehrszellen wird als Nachfragematrizen für einen festzulegenden Zeitraum berechnet, mit Unterscheidung zwischen aggregierten und disaggregierten Ansätzen. Letztere erlauben eine gruppenspezifische Ziel- und Verkehrsmittelwahl. Abhängig vom Alter, dem Grad der Erwerbstätigkeit, der Pkw-Verfügbarkeit und ggf. weiterer gruppenspezifischer Merkmale ergeben sich unterschiedliche Häufigkeiten von Fahrtzwecken und Fahrtweiten. Durch Addition aller Fahrtrelationen werden verkehrsmittelspezifische Nachfragematrizen berechnet, die anschließend auf die Wegernetze der unterschiedlichen Verkehrsmittel umgelegt werden. Trotz der detaillierten Nachfrageberechnung fassen alle makroskopischen Modellansätze Gruppen von Personen in räumlichen Einheiten (Verkehrszellen) zusammen und bestimmen Fahrtenhäufigkeiten für einen bestimmten Zeitraum zwischen diesen Zellen. Zum Beispiel werden sowohl beim Ansatz von Quelle-Ziel-Paaren nach Lohse (Produkt EVA) als auch beim Wegeketten-basierten Ansatz von Visum mit verhaltenshomogenen Gruppen gemäß disaggregiertem Ansatz gearbeitet ohne jedoch das Prinzip von Verkehrszellen aufzugeben.

Diskrete Nachfragemodelle modellieren einzelne Personen oder Agenten und erlauben so während der gesamten Nachfrageberechnung eine fortlaufende Verbindung zu den diskreten Agenten und deren Eigenschaften. Während für reine Verkehrsanalysen die Wege entscheidend sind, fokussieren aktivitätenbasierte Modelle (ABM) auf umfassendere Berechnungen der einzelnen Person und modellieren jede Aktivität mit Ort und Dauer. Dies erlaubt weitreichende Auswertungen in Raum und Zeit, hinsichtlich Verkehr und Aktivitäten und deren Zusammenhänge, zum Beispiel für Mobility Pricing oder Ridesharing. Verkehrszellen im Sinne von makroskopischen Modellen sind nicht erforderlich, können aber aus Gründen der Auswertung und verkehrsplanerischen Praxis teilweise im Ergebnisschritt eingeführt werden. Die ersten ABM-Ansätze wurden in den USA in den 1990er Jahren entwickelt, um die Verkehrs- und Umweltwirkungen von nicht-infrastrukturbasierten Massnahmen wie Congestion Pricing, Telearbeit und Ridesharing besser abschätzen zu können. Durch die höhere räumliche und zeitliche Auflösung von ABM gegenüber makroskopischen Nachfragemodellen haben sie das Potential für verfeinerte modellgestützte Berechnung von Schadstoffemissionen (inkl. Exposition). Einen guten Überblick über die Historie von ABM geben (Vovsha, Bradley, Bowman, et al., 2004) oder (Rasouli & Timmermans, 2013). Software Lösungen sind e.g. Tasha (Roorda et al., 2008), Albatross (Timmermans & Arentze, 2011), CEMDAP (Pinjari et al., 2008), Mobitopp (Mallig et al., 2013) oder ActivitySim (Association of Metropolitan Planning Organizations, 2019).

Umlegungsmodelle verwenden dis-/aggregierte Nachfragematrizen und ermöglichen die Berechnung der Routenwahl unter Berücksichtigung gewisser Randbedingungen. Neben dem Frank-and-Wolfe Algorithmus (Frank & Wolfe, 1956) sind schnelle Verfahren entstanden (Bar-Gera, 2002), die unter gewissen Rahmenbedingungen effizient speziell für grosse Modelle angewendet werden können. Im ÖV sind die Takt- und Fahrplan-basierten Modelle

verbreitet (WU et al., 1994). In den Umlegungsmodellen werden die Fahrten gemeinsam auf die Alternativrouten aufgeteilt, wobei eine nicht-ganzzahlige Fahrtenanzahl möglich ist.

Im Gegensatz dazu steht bei Verkehrsflussmodellen nicht die Routenwahl im Vordergrund, sondern ein möglichst realitätsnaher Verkehrsablauf des Einzelfahrzeugs. Mikrosimulationen des Verkehrsablaufs sind ebenfalls schon früh untersucht worden (Pipes, 1953), weiterentwickelt und der Praxis kommerziell verfügbar gemacht worden (VISSIM, AIMSUN). Die Verkehrsflusssimulation ermöglicht ein detaillierteres Abbild von Streckenkapazitäten (Fahrstreifen) und Knotensteuerungen als Umlegungsmodelle ohne jedoch die Routenwahl ähnlich recheneffizient wie Umlegungsmodelle durchführen zu können. Der Fokus vieler Anwendungen der Verkehrsflusssimulation war dabei oft die kleinräumige Auswertung und Planung des Verkehrs.

Aufgrund neuer rechnerischer Möglichkeiten entstanden gleichzeitig auch Software Programme mit denen auch grosse Verkehrsnetze effizient simuliert werden können. Ein zentrales Beispiel ist hier MATSim mit seinen vielen (inter-)nationalen Anwendungen (Horni et al., 2016). MATSim wurde ursprünglich an der ETH Zürich und der TU Berlin als open-source Projekt entwickelt. Es beinhaltet eine performante, ereignisbasierte Simulation für die Optimierung personenbezogener Tagespläne, z.B. Abfahrtszeitpunkt, Aktivitätendauer, Verkehrsmittelwahl oder Routenwahl. Die Simulation kann neben den klassischen verkehrlichen Fragestellungen auch für Fragestellungen wie Bike Sharing, Frachtverkehr, autonome Fahrzeuge oder Datenaufbereitungsmöglichkeiten verwendet werden, inkl. OeV (Scherr, Manser, et al., 2019). MATSim bietet jedoch standardmässig keine Module für die Generierung der Tagespläne und Wegeketten. Neben MATSIM gibt es andere Softwareimplementierungen für die agenten-basierte Simulation einer ABM-basierten Nachfrage wie z.B. SimMobility (Adnan et al., 2016).

Schweizer Anwendungen

Aufgrund der obigen, intensiven Entwicklungen sind verschiedene Methoden entstanden, welche in der Praxis oft und ausführlich angewendet wurden. Hinsichtlich der Schweizerischen Entwicklungen wurden vor allem die Methoden der aggregierten Verkehrsmodellierung weiträumig eingesetzt. Die heutige Schweizer Modelllandschaft für regionale oder nationale Modelle basiert auf den Grundkonzepten und aufbauenden Weiterentwicklungen des makroskopischen Ansatzes (4-Stufen-Modelle und Weiterentwicklungen, zum Beispiel EVA und Visem, inkl. Verfeinerungen der Zonen und Vergrösserungen der Perimeter). Zusätzlich steht in der Schweiz mit dem Nationalen Personenverkehrsmodell (NPVM) ein Werkzeug für verkehrs- und raumplanerische Fragestellungen mit überregionalem Charakter zur Verfügung. Über die Erstellung einer Synthetischen Population durch ARE und SBB (Bodenmann et al., 2019), wie auch die Verfeinerung des NPVM ergeben sich Verbesserungen in der Datenverfügbarkeit für andere regionale Modelle in der Schweiz. Vollständige, etablierte ABM Anwendungen in der Praxis sind neben dem ABVM Basel (Kapitel 5.2) zurzeit bei den SBB vorhanden (Kapitel 3.2.3).

1.2 Problembeschreibung

Traditionell und weit verbreitet werden in der Schweiz makroskopische Verkehrsmodelle in der Verkehrsplanungspraxis eingesetzt, in denen die Mobilität von Personen in räumliche Einheiten (Verkehrszellen) aggregiert wird. Aktivitätenbasierte Modelle (ABM), die in der Forschung bereits weit verbreitet sind, modellieren dagegen die Aktivitäten jeder Einzelperson im Tagesablauf. Die zwischen den Aktivitäten zurückzulegenden Wege sind das Resultat der Aktivitätenmodellierung an unterschiedlichen Orten. Die Standortfestlegung ist nicht wie bei den makroskopischen Modellen auf Schwerpunkte von Verkehrszellen beschränkt. Auch die zeitliche Auflösung ist durch die Modellierung von Tagesabläufen implizit gegeben. Dadurch können mit ABM potentiell Fragestellungen bearbeitet werden, die mit makroskopischen Modellen allenfalls indirekt behandelt werden können, wie zum Beispiel ride- und vehicle sharing Konzepte.

Aktivitätenbasierte Modelle (ABM) (Definition Kapitel 2.1.3) wird das Potenzial zugesprochen, die klassischen wege-basierten makroskopischen Verkehrsmodelle, wie sie heute in

der Schweiz im Einsatz sind, zur ergänzen und langfristig abzulösen. In der akademischen Verkehrsforschung sind Aktivitäten-orientierte Ansätze bereits sehr verbreitet. Im Ausland werden ABM bereits in der praktischen Verkehrsplanung verwendet (z. B. DaySim in den USA). Auch in der Schweiz gibt es inzwischen einige Anwendungen mit ABM, insbesondere das MATSim Framework der ETH, welches als open-source Software eine performante Simulationsumgebung mit verschiedenen Auswertungsmöglichkeiten zur Verfügung stellt.

Trotz der verschiedenen Vorteile der ABM Ansätze ist die Verbreitung der Ansätze mindestens in Europa eingeschränkt. Es gibt verschiedene Gründe, die den Wechsel von makroskopischen Wege-Modellen zu ABM in der Praxis erschweren, wie zum Beispiel die Komplexität der ABM, insbesondere auch die umfassende Nachfrageberechnung, sowie die Mikrosimulation. Mit der Komplexität steigen die Anforderungen an die Ressourcen (Daten, Rechenkapazität, Personal etc.).

Zurzeit mangelt es an unabhängigen Untersuchungen, in denen Performance und Güte der ABM mit klassischen makroskopischen Modellen verglichen werden. Ausserdem fehlt es an einer Entscheidungshilfe für Modell-Betreiber (z. B. Kantone), in der Potenzial und Nutzen des Einsatzes von ABM und die dazu notwendigen Voraussetzungen dargestellt werden.

1.3 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel dieser Studie ist die Erstellung einer Entscheidungshilfe für Betreiber von Verkehrsmodellen, die den Nutzen, die Voraussetzungen, sowie Vor- und Nachteile des Einsatzes aktivitätenbasierter Modelle (ABM) darstellt. Dazu soll ein praktischer Vergleich eines ABM mit einem klassischen makroskopischen Modell durchgeführt werden.

Das übergeordnete Ziel unterteilt sich in einzelne Teilziele. Innerhalb der Arbeit sollen die Inhalte eines ABM untersucht werden, insbesondere die synthetische Bevölkerung, die Erzeugung, Verteilung und Verkehrsmittelwahl, Tageszeit, Routenwahl, Umlegung, Simulation und Kalibrierung. Dazu sollen die Vor- und Nachteile zwischen ABM und dem traditionellen, makroskopischen Ansatz herausgearbeitet werden. Ein wichtiger Bestandteil ist auch die Erstellung von Realitätstests und Szenarien, mit welchen die unterschiedlichen Modellansätze und Resultate verglichen werden.

Mit dieser Forschungsarbeit soll auch untersucht werden, ob die ABM mittlerweile einen Reifegrad erreicht haben, um auch in der Planungspraxis verwendet werden zu können. Es soll eine Entscheidungshilfe für Entscheidungsträger geschaffen werden, mit der ohne detailliertes Modellwissen der am besten geeignete Modellansatz für eine bestimmte Fragestellung ermittelt werden kann.

1.4 Vorgehen und Arbeitsschritte

Das Vorgehen wird in vier Arbeitspakete unterteilt (Abb. 10). Im ersten Arbeitspaket werden die Grundlagen und Methoden erläutert und zusammengefasst, sowie der heutige Stand der Literatur aufgezeichnet. Danach werden im zweiten Arbeitspaket die methodischen Entwicklungen, Erfahrungen, Einsatzgebiete sowie die Anforderungen an Verkehrsmodelle in der Praxis abgeklärt. Dazu werden Experten im In- und Ausland mit einem standardisierten Fragebogen befragt; die Fragen werden ebenfalls standardisiert ausgewertet. Die Expertenmeinung unterstützt dann später die Synthese und fasst die Erkenntnisse verschiedener Entwicklungen zusammen. Zusätzlich können die spezifischen Resultate aus dem Modellvergleich mit der Expertenmeinung abgeglichen werden.

Im dritten Arbeitspaket werden die verschiedenen Modelle, Rechenmethoden und deren Eigenschaften verglichen. Der Hauptvergleich ist zwischen dem ABVM Basel und dem bestehenden, aggregierten GVM Region Basel. Zusätzlich erfolgt noch eine Aggregation des

GVM Region Basel ähnlich der Granularität des NPVM. Damit lassen sich die Unterschiede der Granularität der aggregierten Modelle auswerten, und mit der Auflösung des ABVM Basels vergleichen. Das abschliessende vierte Arbeitspaket umfasst neben einer Gegenüberstellung von Bedarf und Modelleigenschaften eine Entscheidungshilfe für ABM und makroskopische Nachfragemodelle sowie die Referenzen zu den aktuellen Software-Produkten.

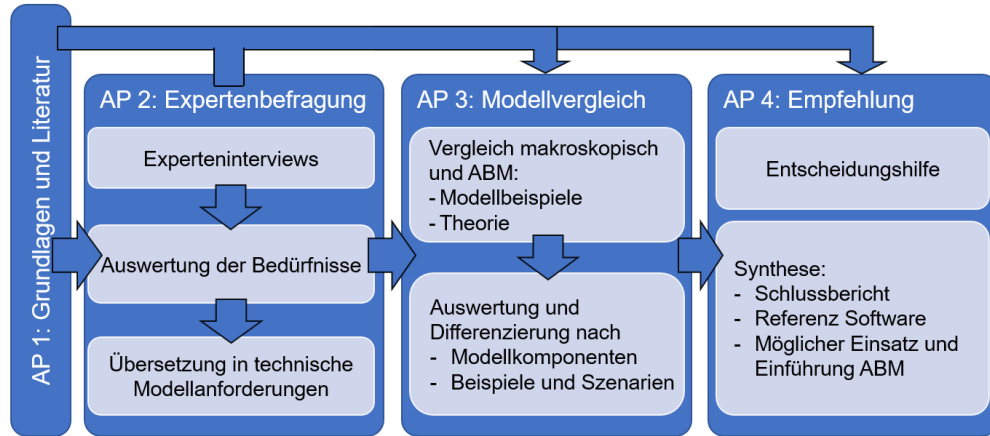


Abb. 10 Übersicht der Arbeitsschritte innerhalb dieses Forschungsprojektes.

1.5 Aufbau des Berichts

Der Aufbau des Berichtes folgt den nachfolgenden Arbeitsschritten (Kapitel 1.4):

- Nach der Einleitung folgt vorab eine Zusammenfassung der Grundlagen und verschiedenen Methoden, und es werden Terminologie und Eigenschaften beschrieben (Kapitel 2).
- Die Literatur umfasst die wichtigsten Beiträge aller Aspekte der ABM inklusive Simulation und Hinweise zu den Auswertungsmöglichkeiten (Kapitel 0).
- Die Expertenbefragung sowie deren Auswertung werden in Kapitel 4 ausgeführt.
- Die verwendeten Modelle sind in Kapitel 5 beschrieben, hinsichtlich Nachfrageberechnungen, Simulation respektive Umlegung und Einsatzbereich.
- Der Modellvergleich und der Vergleich der einzelnen Modellschritte werden in Kapitel 6 aufgeführt; Szenarien werden in Kapitel 0 beschrieben.
- Als Abschluss folgen die Synthese (Kapitel 0) und Empfehlungen und die Entscheidungshilfe in Kapitel 7.6.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden grundlegende Funktionsweisen von Personenverkehrsmodellen einander gegenübergestellt. In der Literatur und Praxis als relevant erkannten Vor- und Nachteile von aktivitätenbasierten Modellansätzen werden in kurzer Form dargestellt. Dies erlaubt es im Fazit abzuleiten für welche verkehrsplanerischen Fragestellungen sich der Einsatz von aktivitätenbasierten Verkehrsmodellen empfiehlt sowie welche Anforderungen und Herausforderungen bei der Implementierung zu erwarten sind. Diese Einsichten bilden die Basis für die zielgerichtete Auswertung der Literatur (Kapitel 0) sowie die Ableitung der zentralen Fragestellungen, welche in den Stakeholder-Interviews beantwortet werden sollen (Kapitel 4).

2.1 Vorstellung der Modellansätze

2.1.1 Wegbasierte Modelle

In konventionellen Personenverkehrsmodellen basiert die Beschreibung der Verkehrsnachfrage auf einzelnen Wegen zwischen zwei Orten. Abb. 11 zeigt beispielhaft die Abbildung der Verkehrsnachfrage einer Person in einem wegbasierten Modell. Die Person soll an einem Tag vier Orte aufsuchen, um dort Aktivitäten durchzuführen.

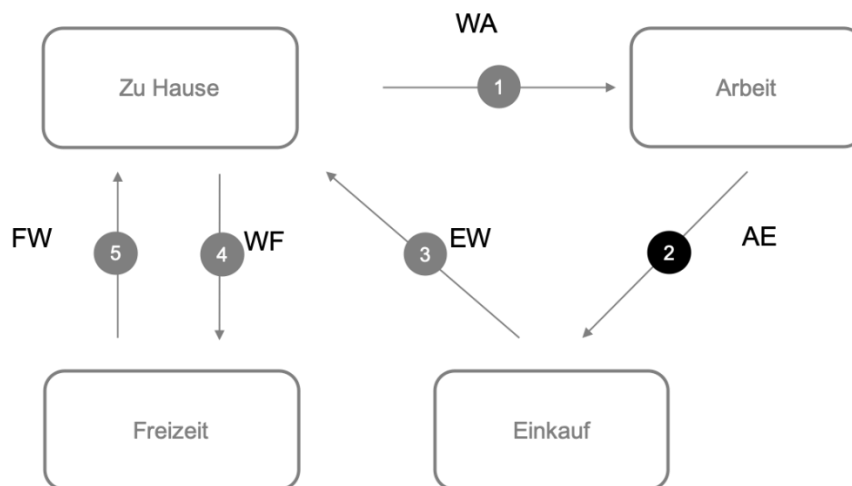


Abb. 11 Beispiel der Repräsentation der Verkehrsnachfrage in wegbasierten Modellen

In einem wegbasierten Modell werden die Verkehrsströme aufgrund der Aktivitäten am jeweiligen Start- und Zielort klassifiziert und in sogenannte Quell-/Zielgruppen unterteilt. Für die einzelnen Quell-/Zielgruppen werden in den verschiedenen Modellschritten (Verkehrsgenerierung und -anziehung, Verkehrsverteilung, Verkehrsmittelwahl und Routenwahl) unterschiedliche Annahmen zu den relevanten Eingangsgrößen und Parametern des Verkehrsverhalten verwendet.

Wegbasierte Modelle lassen sich bezüglich der zu Grunde liegenden Verhaltensmodellen verfeinern, indem die Gesamtbevölkerung in verhaltenshomogene Gruppen unterteilt wird. Abhängig von Altersklasse, Erwerbsstatus und weiteren soziodemografischen Eigenschaften werden einzelne Aktivitäten gruppenspezifisch häufiger oder seltener ausgeführt. Je nach Art der Aktivitätsorte wird zwischen zwei Quell-/Zielgruppen unterschieden:

- Typ 1 (*homebased*): Wohnort ist Start- und/oder Zielort eines Wegs (im Beispiel Wege 1, 3, 4 und 5)

- Typ 2 (*non-homebased*): Wohnort ist weder Start- noch Zielort eines Weges (im Beispiel Weg 2)

Mit dieser Modellarchitektur werden bei einem wegebasierten Modell zwei Vereinfachungen gegenüber der Realität in Kauf genommen. Einerseits werden die einzelnen Wege voneinander unabhängig abgebildet. In der Realität bestehen jedoch Abhängigkeiten zwischen einzelnen Wegen und der Verkehrsmittelwahl. In Abb. 11 beeinflusst zum Beispiel das für Weg 1 gewählte Verkehrsmittel die Verkehrsmittelwahl für die Wege 2 und 3. Ebenso gibt es bezüglich der Zielwahl und der Abfahrtszeit Abhängigkeiten. Im Beispiel von Abb. 11 ist anzunehmen, dass der Einkaufsort in Abhängigkeit vom Wohn- und Arbeitsort gewählt wird und die Abfahrtszeit für den Weg zum Einkaufen von der Dauer der Arbeitsaktivität abhängt.

Weiter können nur für Wege des Typs 1 soziodemographische Variablen, wie zum Beispiel der Auto- und ÖV-Abobesitz, bei den Verhaltensmodellen berücksichtigt werden. Für Wege des Typs 2 stehen solche Informationen nur als Mittelwerte der Quell- und Zielzone zur Verfügung, die aber keinen direkten Bezug zur Person haben, welche den Weg ausführt. Bei nicht-heimbasierten Wegen erfolgt daher in wegebasierten Modellen keine gruppenspezifische Beschreibung des Verkehrsverhaltens, sondern lediglich eine Zuordnung über Mittelwerte.

Wegbasierte Modelle beschreiben Hin- und Rückwege zwischen dem Wohnort und verschiedenen Zielort recht gut. Bei Wegeketten mit mehr als zwei Wegen wird ein Informationsverlust akzeptiert. Gemäss einer Auswertung des Mikrozensus betrifft dies in der Schweiz mit 27% rund ein Viertel aller Wege (Abb. 18).

2.1.2 Tourbasierte Modelle

Abb. 12 zeigt die gleichen fünf Wege aus Abb. 11, die zu zwei Touren zusammengefasst werden. Beide Touren starten und enden jeweils am Wohnort. In tourbasierten Modellen erfolgt die Modellierung auf Ebene solcher Touren. Dabei wird jeder Tour eine Hauptaktivität zugeordnet. In diesem Fall handelt es sich um eine Arbeits- und eine Freizeittour. In Abhängigkeit des Wohnorts und des Verkehrsangebots wird jeder Hauptaktivität ein Zielort zugewiesen. Die Zuweisung von Orten weiterer Aktivitäten erfolgt aufgrund der Orte der Hauptaktivitäten.

Die Gruppierung der Wege in Touren ermöglicht, dass in tourbasierten Modellen der Informationsverlust für die Beschreibung des Verkehrsverhaltens einzelner Wege deutlich geringer ausfällt als bei wegebasierten Modellen. Für alle Wege stehen Informationen zur Soziodemographie der Reisenden sowie zum Kontext des Wegs zur Verfügung.

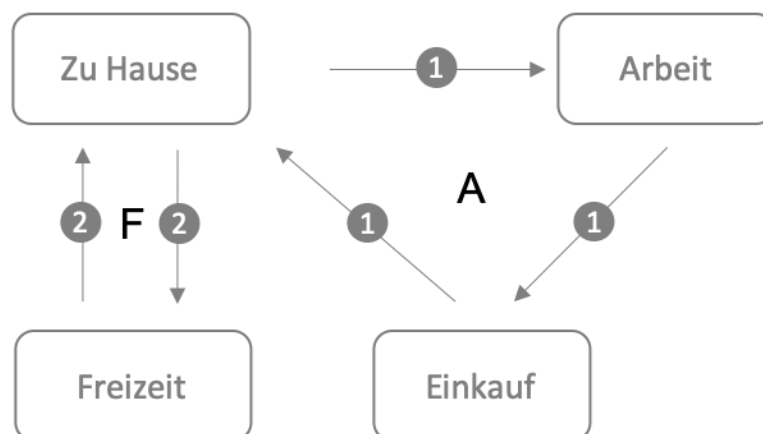


Abb. 12 Beispiel der Repräsentation der Verkehrsnachfrage in tourbasierten Modellen

Für die Verkehrsmittelwahl wird zwischen wechselbaren (zu Fuss, ÖV, MIV als Mitfahrer) und nicht-wechselbaren Verkehrsmitteln (Velo, Auto, Motorrad) unterschieden (Fellendorf et al., 1997). Im Modell wird dabei jeweils für den ersten Weg einer Tour das Verkehrsmittel bestimmt. Wird für diesen ersten Weg ein nicht-wechselbares Verkehrsmittel zugewiesen, so wird dieses Verkehrsmittel auch allen weiteren Wegen einer Tour zugeordnet. Umgekehrt wird bei Wahl eines wechselbaren Verkehrsmittels für den ersten Weg die Verkehrsmittelwahl für alle weiteren Wege einer Tour wegspezifisch bestimmt.

2.1.3 Aktivitätenbasierte Modelle

Aktivitätenbasierte Modelle gehen einen Schritt weiter und leiten die Verkehrsnachfrage vom Bedürfnis ab, dass gewisse Aktivitäten innerhalb eines Tages durchgeführt werden sollen. Dabei können die Anzahl, Dauer und Folge der Aktivitäten endogen durch das Modell bestimmt werden. Dazu wird in der Regel zwischen primären und sekundären Aktivitäten unterschieden. Primäre Aktivitäten umfassen Arbeit und Ausbildung, während Einkaufen, Freizeit und sonstiges als sekundäre Aktivitäten bezeichnet werden.

Bei der der Generierung der Aktivitätenketten werden zunächst die Anzahl und die Orte der Primäraktivitäten bestimmt. Die Anzahl weiterer Aktivitäten sowie deren Abfolge und Standorte wird in weiteren Modellschritten bestimmt, nachdem die Informationen über die primären Aktivitäten zur Verfügung stehen. So kann zum Beispiel aufgrund der Reisedauer zwischen Wohn- und Arbeitsort und der Arbeitsdauer die Häufigkeit und Dauer weiterer sekundärer Aktivitäten festgelegt werden.

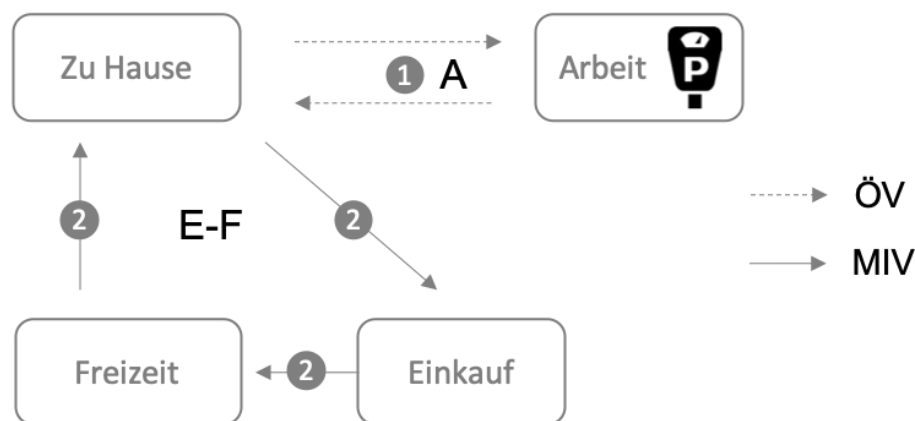


Abb. 13 Beispiel der Repräsentation der Verkehrsnachfrage in aktivitätenbasierten Modellen

Im Vergleich zu weg- und tourbasierten Modellansätzen, ermöglichen aktivitätenbasierte Modelle die Abbildung komplexerer Verhaltensreaktionen. Das Beispiel in Abb. 13 zeigt, dass eine Person als Reaktion auf die Einführung von Parkgebühren am Arbeitsort entscheidet, den Arbeitsort mit dem ÖV zu erreichen. Da für den Einkauf aber bevorzugt das Auto genutzt wird, kombiniert diese Person nun den Einkauf mit der Freizeitaktivität, die mit dem zu Hause bereitstehenden Fahrzeug erreicht werden. In aktivitätenbasierten Modellen können somit Verhaltensweisen modelliert werden, die dazu führen, dass die einzelnen Aktivitäten in unterschiedlichen Touren aufgesucht werden. Somit können komplexere Verhaltensreaktion auf Änderungen des Verkehrsangebots und der Siedlungsstruktur abgebildet werden.

Aktivitätenbasierte Modelle ermöglichen auch die Zeit als zusätzliche Dimension bei der Modellierung der Verkehrsnachfrage explizit zu berücksichtigen. Aufgrund der Startzeit und der Dauer der einzelnen Aktivitäten liegt für jeden Weg die Anfangszeit fest. Somit besteht auch die Möglichkeit die Wahl der Abfahrtszeit endogen und massnahmensensitiv zu modellieren.

2.2 Vergleich der Modellansätze

2.2.1 Modellkomponenten

Als weitere Grundlage für das Verständnis der hauptsächlichlichen Unterschiede zwischen aggregierten (weg- und tourbasiert) und aktivitätenbasierten Modellen wird in diesem Unterkapitel deren Modellstruktur veranschaulicht und verglichen.

Aggregierte Modelle

Abb. 14 zeigt die allgemeine Modellstruktur eines aggregierten Verkehrsmodells. Aufgrund von Strukturdaten mit Angaben zur Bevölkerung, Arbeitsplätzen und weiteren Kenngrößen je Verkehrszelle (z.B. Schulen, Verkaufsflächen) werden in drei Schritten die Verkehrsbeziehungen als Anzahl der Wege je Verkehrsmittel zwischen den Verkehrszellen bestimmt. Die Kopplung mit dem Angebotsmodell erfolgt im vierten Modellschritt, in dem die Verkehrsbeziehungen auf einzelne Verkehrsverbindungen und Wege verteilt (umgelegt) werden. In der Verkehrsnachfrage werden auch Zellbinnenverkehre modelliert, also Wege mit gleicher Start- und Zielzelle. In dem vierten Schritt, der Verkehrsumlegung, erfolgt keine Verteilung der Zellbinnenverkehre mehr, da Start- und Zielzelle mit gleichem Schwerpunkt identisch sind.

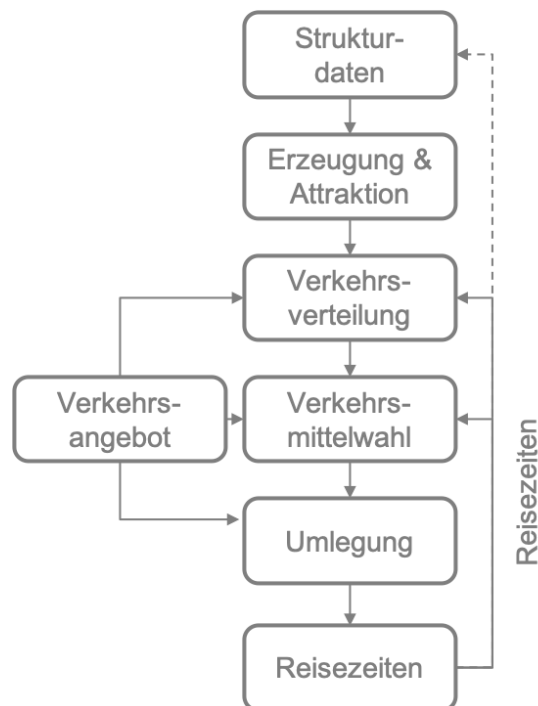


Abb. 14 Allgemeine Modellstruktur eines aggregierten, wegbasierten Verkehrsmodells

Die Berechnung der Verkehrserzeugung und -attraktion erfolgt aufgrund der Strukturdaten und aus Verkehrstagebuchbefragungen abgeleitetem Erzeugungsraten. Unterschiede bei der Verkehrserzeugung nach soziodemographischen Attributen werden über verhaltenshomogene Gruppen abgebildet. So unterscheidet das Nationale Verkehrsmodell zum Beispiel hierfür 26 Quell-/Zielgruppen sowie die Bevölkerung nach sechs Altersklassen und dem Besitz von Mobilitätswerkzeugen (Vrtic et al., 2020). Attraktionsraten werden für den Einkaufs- und Freizeitverkehr in der Regel zusätzlich aufgrund von beobachteten mittleren Erzeugungsraten je Verkaufsfläche oder Freizeitanlage abgeleitet. Um sicher zu stellen, dass je Verkehrszelle die Quellverkehrssumme der Zielverkehrssumme entspricht, werden die Erzeugungs- und Attraktionsraten nachträglich kalibriert und die Verkehrsmengen in einem Ausgleichsverfahren angepasst.

Die Berechnung der Verkehrsnachfrage zwischen den Verkehrszellen erfolgt typischer Weise mit einem Gravitationsmodell. Aufgrund des Verkehrsangebots werden Kenngrössenmatrizen berechnet, die Reisedauer, Distanz oder weitere Kenngrössen zwischen zwei Verkehrszellen enthalten.

Die Aufteilung der so berechneten Verkehrsströme erfolgt aufgrund von Verkehrsmittelwahlmodellen, die ebenfalls auf verkehrsmittelspezifischen Kenngrössenmatrizen basieren. Alternative Verfahren, wie zum Beispiel EVA erlauben auch eine simultane Berechnung der Verkehrsverteilung und Verkehrsmittelwahl.

Zur Berechnung der tageszeitabhängigen Nachfrage werden die verkehrsmittelfeinen Verkehrsströme in der Praxis meistens aufgrund fixer Faktoren in stundenfeine Matrizen unterteilt. Diese Faktoren werden aus Verkehrstagebuchbefragungen abgeleitet und können auch weitere Kriterien wie Raumtyp und Distanzklasse umfassen (Vrtic et al., 2016). In der europäischen und US-amerikanischen Praxis gibt es einige Wege-basierte Modelle, die ein Tageszeitwahlmodell verwenden und damit die Tageszeit angebotssensitiv abbilden.

Die Kopplung mit dem Angebotsmodell erfolgt im letzten Schritt mit der Umlegung. Dabei werden die Verkehrsströme aufgrund der Berechnung von Routen mit den geringsten generalisierten Kosten den einzelnen Routen im Strassennetz (MIV) respektive den ÖV-Verbindungen zugewiesen. Dabei können für jede Quellzielgruppe spezifische Routenwahlparameter verwendet werden. In der Praxis beschränkt sich die Differenzierung in der Regel aber auf einzelne Verkehrszwecke. Da sich im Strassennetz die generalisierten Kosten aufgrund der Streckenbelastungen und Auslastungsgrade ergeben, erfolgt die Umlegung iterativ. Im ÖV gibt es meist mehrere mögliche Verbindungen zwischen zwei Verkehrszellen. In diesem Fall erfolgt die Aufteilung aufgrund eines Routenwahlmodells, für welches auch die Überlappung der verschiedenen Verbindung berücksichtigt werden kann. Hingegen wird die Auslastung (und somit auch Überlastung) von ÖV-Verbindungen erst seit kurzem als Routenwahlkriterium einbezogen (Gentile et al., 2016). Im praktischen Beispiel des NPVM wird die Auslastung des ÖV in die Ziel- und Verkehrsmittelwahl rückgekoppelt. Dies ist verbunden mit zusätzlicher Rechenzeit für ÖV-Umlegungen und Ermittlung der Auslastungsmatrix (Transoptima et al., 2020).

Aktivitätenbasierte Modelle

Abb. 15 zeigt eine allgemeine Modellstruktur eines aktivitätenbasierten Modells. Anders als bei aggregierten, wegbasierten Modellen, welche die Verkehrsnachfrage auf Ebene von Verkehrszellen beschreiben, setzen aktivitätenbasierte Modelle eine auf Personenebene disaggregierte Beschreibung der Bevölkerung voraus. Mit einer Populationssynthese wird aufgrund von Einzeldaten zur Personen- und Haushaltsstruktur (z.B. aus einer Wegtagebuchbefragung) ein künstliches Abbild der Bevölkerung generiert.

Ziel dabei ist es, dass die synthetische Population einerseits bezüglich der Korrelationsstruktur verschiedener soziodemographischer Variablen so gut wie möglich der tatsächlichen Bevölkerungsstruktur entspricht. Andererseits wird durch Fitting der synthetischen Bevölkerung auf räumlich differenzierte Randsummen, dafür gesorgt, dass die richtige Anzahl an (synthetischen) Personen mit bestimmten Merkmalen repräsentativ gemäss der tatsächlichen Bevölkerungsverteilung verortet werden.

Die langfristigen Entscheidungen umfassen Modelle zur Beschreibung der Art und des Orts der Hauptaktivität sowie des Mobilitätswerkzeugbesitzes. Dabei wird zunächst für jede Person der synthetischen Population bestimmt, ob und welcher Hauptaktivität diese nachgeht. In einem zweiten Schritt wird aufgrund eines Zielwahlmodells jeder Person, die entweder erwerbstätig ist oder sich in einer Ausbildung befindet ein Zielort zugewiesen. Über Schattenpreise können dabei bei der Zielwahl die Anzahl an einem bestimmten Ort verfügbaren Arbeits- oder Ausbildungsplätze als harte Randsummenbedingungen berücksichtigt werden (Vitins et al., 2016).

In nachfolgenden Modellen wird dann auf Personenebene der ÖV-Abonnementbesitz beschrieben. Die Verfügbarkeit von Autos wird hingegen in der Regel auf Haushaltsebene

modelliert. Diese Modelle erlauben, dass der Mobilitätswerkzeugbesitz sensitiv auf Massnahmen bezüglich des Verkehrsangebots oder Veränderungen der Raumstruktur reagieren. Diese Abhängigkeiten werden üblicherweise über verkehrsmittelspezifische Erreichbarkeiten erfasst.

In einem nächsten Schritt werden die Anzahl und Art der an einem Tag durchgeführten Aktivitäten bestimmt und wie diese zu Touren kombiniert. Hier unterscheiden sich aktivitätenbasierte Modelle hinsichtlich der Granularität der Verkehrserzeugungsmodelle deutlich von aggregierten Ansätzen. Bei aggregierten Modellen werden typischerweise Verkehrserzeugungsraten nur nach Altersklasse und Quell-/Zielgruppe differenziert. Der aktivitätenbasierte Ansatz hingegen ermöglicht, dass alle in der synthetischen Population verfügbaren soziodemographischen Variablen bei der Modellierung der Verkehrsnachfrage berücksichtigt werden können. In ABM besteht die Möglichkeit, Informationen zur Raumstruktur zu berücksichtigen, wie es z.B. für das ABM der SBB (Hillel et al.2020). oder das ARC TravelDemand Model von Atlanta (Atlanta Regional Commission, 2019) realisiert wurde. Allerdings ist dies heute in vielen ABM und MATSim-Modellen noch nicht implementiert.

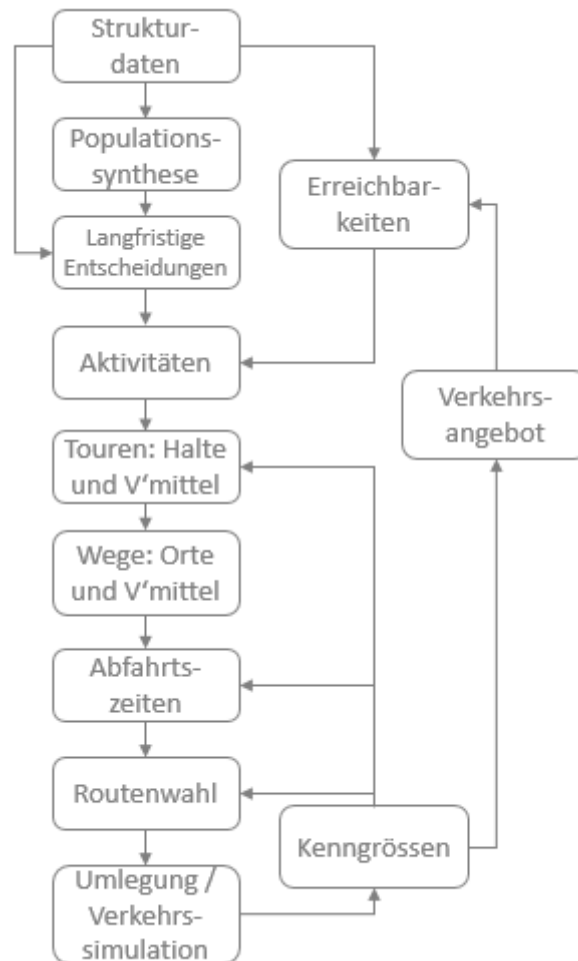


Abb. 15 Allgemeine Modellstruktur eines aktivitätenbasierten Verkehrsmodells

Der disaggregierte Modellansatz ermöglicht es auch bei der Beschreibung der Aktivitäten mögliche Abhängigkeiten innerhalb eines Haushalts zur berücksichtigen. Somit ist es zum Beispiel möglich Begleitwege oder gemeinsam wahrgenommene Aktivitäten explizit zu beschreiben.

Im nächsten Modellschritt werden für die einzelnen Touren mit weiteren Informationen angereichert. Zunächst wird für die Hauptaktivität jeder Tour ein Zielort zugewiesen. Handelt es sich dabei um eine Arbeits- oder Ausbildungsaktivität wird dabei auf die Ergebnisse der langfristigen Entscheidungsmodelle zurückgegriffen. Für alle anderen Aktivitätstypen wird ein Zielwahlmodell formuliert, welches neben der Attraktivität möglicher Ziele auch Reisezeiten mit verschiedenen Modi berücksichtigt. In einem weiteren Schritt werden für jede Tour die Zeitpunkte der Abfahrt und Rückkehr definiert. Abschliessend wird für die ganze Tour aufgrund der Verbindungsqualität zwischen den Hauptaktivitäten das gewählte Verkehrsmittel festgelegt.

Die einzelnen Wege jeder Tour werden im nächsten Modellschritt weiter spezifiziert. Dabei werden zunächst in Abhängigkeit der Standorte der Hauptaktivitäten die Standorte weiterer Aktivitäten einer Tour bestimmt. Die Wahl der Verkehrsmittel für die einzelnen Wege erfolgt konsistent mit dem der Tour zugewiesenen Verkehrsmittel aufgrund des Konzepts wechselbarer und nicht-wechselbarer Modi. Ebenso wird für jeden Weg aufgrund der modellierten Dauer der einzelnen Aktivitäten eine Abfahrtszeit zugewiesen.

Das Resultat dieser sequentiellen Teilmodelle ist eine räumlich und zeitlich verortete Liste von Aktivitäten sowie der Verkehrsmittel für die Wege dazwischen. Die Zielwahlmodelle werden in der Regel gleich wie bei den wegbasierten Modellen räumlich aggregiert auf der Ebene von Verkehrszellen spezifiziert. Dies erlaubt es aus aktivitätenbasierten Modellen direkt auch Quell-/Zielmatrizen abzuleiten. Diese Matrizen können sowohl wegzweckspezifisch, aber auch nach weiteren, z.B. soziodemographischen Variablen differenziert ausgeschrieben werden. Ebenso ist es möglich beim Ausschreiben der Matrizen den Typ der Tour zu berücksichtigen. Zudem wird anders als bei wegbasierten Modellen für die Spezifizierung von tageszeitabhängigen Matrizen kein zusätzlicher Modellschritt oder die Verwendung stundenfeiner Erzeugungsraten benötigt.

2.2.2 Kopplung mit Angebotsmodell

Verkehrsumlegung

Die Verkehrsumlegung beschreibt den letzten Modellschritt von aggregierten Modellen bei dem die Verkehrsströme auf das Verkehrsnetz umgelegt werden. Dabei werden für alle Quell-/Zielbeziehungen mögliche Routen im Verkehrsnetz berechnet und entsprechend der Nachfrage belastet. Die Ergebnisse der Umlegung umfassen einerseits Streckenbelastungen und Kenngrössenmatrizen, welche die Raumüberwindungskosten im belasteten Netz zwischen allen Quellen und Zielen beschreiben. Zusätzlich ist es aufgrund der gespeicherten Routen möglich die Verkehrsflüsse, die über einzelne Strecken und Knoten führen, darzustellen.

In der Regel werden in einem vorlaufenden Prozess für jedes Verkehrsmittel die nach Quell-/Zielgruppen differenzierten Nachfragematrizen aufsummiert. Dadurch reduziert sich der Speicherplatzbedarf für die Umlegung, gleichzeitig wird dadurch aber auch verhindert, dass Quell-/Zielgruppenspezifische Routenwahlparameter berücksichtigt werden können. Dies beschränkt die Prognosemöglichkeiten.

Da die Geschwindigkeiten in belasteten Netzen von der Auslastung abhängig sind, erfolgt die Umlegung iterativ. Dabei werden die Geschwindigkeiten im Netz nach jeder Iteration neu berechnet und die Nachfrage in der folgenden Iteration aufgrund der aktualisierten Geschwindigkeiten neu geroutet. Dieses iterative Verfahren wird abgebrochen wenn zwischen nachfolgenden Iterationen nur noch sehr geringe Reisezeitunterschiede je Route und somit kleine Änderungen der Belastungen auftreten.

Die Umlegung erfolgt in der Regel als durchschnittlicher Wochentagsverkehr (DWV), also als über den ganzen Tag summierter Verkehrsfluss. Liegt die Nachfrage in Zeitscheiben vor, kann mittels dynamischer Umlegungsverfahren auch den Verlauf der Streckenbelastungen über den Tagesverlauf modelliert werden. In der Regel wird dabei mit Zeitscheiben von 1h Dauer gearbeitet. Dabei steigt der Speicherplatzbedarf und die Rechenzeit linear mit der Anzahl der berücksichtigten Zeitscheiben und im Quadrat der

Anzahl Verkehrszellen und -modi an. Insbesondere bei Modellen die den ganzen Tag abdecken und auch die ÖV-Nachfrage umlegen ergeben sich so oft Rechenzeiten und einen Speicherbedarf, die eine Verwendung in der Praxis erschweren oder gar verunmöglichen. So betrug zum Beispiel die Rechenzeit für eine dynamische ÖV-Umlegung mit dem alten Nationalen Personenverkehrsmodell (NPVM) 13h, wobei die Anzahl der Iterationen aus arbeitsökonomischen Gründen auf vier Iterationen beschränkt wurde und nicht aufgrund eines Konvergenzkriteriums (Vrtic et al., 2016). Wie sich dies mit dem neuen NPVM und neuer Rechnertechnik verhält, muss sich erst noch zeigen.

Umlegungsmodelle können auch bei ABM eingesetzt werden. Dazu wird die auf Personenebene disaggregierte Nachfrage in zellen-, verkehrsmittel- und falls gewünscht auch zeitscheibenspezifische Nachfragematrizen ausgeschrieben. Dabei gehen aber weitere Informationen zur Person verloren, die dann für die Routenwahlsuche sowie die Rückkopplung zu vorlaufenden Modellschritten nicht mehr zu Verfügung stehen.

Sowohl bei der statischen als auch der dynamischen Umlegung werden belastungsabhängige Verzögerungen für jede Kante im Netzwerk unabhängig aufgrund sogenannter *capacity restraint* Funktionen berechnet. Stau-bedingte Reisezeitverzögerungen werden somit in der gängigen Praxis vereinfacht dargestellt. Rückstaueffekte werden vereinfacht. Für die Masse der Verkehrsuntersuchungen ist dies ausreichend. Die meisten kommerziellen Software-Lösungen für aggregierte Modelle bieten auch komplexere Methoden wie Rückstau-Berechnung an, die nach der klassischen Umlegung ausgeführt werden. Darüber hinaus werden auch bei aggregierten Modellen vereinzelt simulationsbasierte Ansätze (mesoscopic Dynamic Traffic Assignment) eingesetzt..

Dynamic Traffic Assignment

Dynamic Traffic Assignment (DTA) Modelle verwenden ebenfalls Quell-/Zielmatrizen aus aggregierten Modellen als Verkehrsnachfrage und stellen bezüglich der Datenspezifikationen des Strassennetzes einen ähnlichen Detaillierungsgrad wie Umlegungsmodelle voraus. Die Berechnung der Routenwahl und der resultierenden Belastungen erfolgt aber mit einer deutlich feineren zeitlichen Auflösung in drei iterativen Schritten.

Im ersten Schritt wird die über die Analyseperiode erwartete Quell-/Zielnachfrage in zeitlich kürzere Intervalle (in der Regel wenige Minuten) aufgeteilt. Mit einer zeitabhängigen Kurzwegsuche werden die kürzesten Routen für jedes Zeitintervall berechnet. Dabei kommen entweder analytische oder simulationsbasierte Verfahren zum Einsatz. Beiden Methoden ist aber gemeinsam, dass die Verbreitung der Verkehrsnachfrage im Netz dynamisch modelliert wird. Dabei wird der Verkehrsfluss in einer zeitlichen Auflösung von wenigen Sekunden abgebildet wobei die Weiterfahrt auf das nächste Streckenstück nur möglich ist, wenn dort genügend Kapazität vorhanden ist. Im letzten Schritt einer Iteration werde die Verkehrsmengen aufgrund der aktualisierten Reisezeiten aus Schritt 2 aktualisiert.

Diese Modellstruktur ermöglicht es mit DTA-Ansätzen zumindest die Einschränkungen beim Abbilden des Verkehrsflusses zu überwinden denen die Umlegungsmodellen unterliegen (siehe oben) und dies ohne, dass die als Quell-/Zielmatrizen vorliegenden Nachfrage auf Personenebene diskretisiert werden muss. Je nach Art der Verkehrsflussmodells ist auch die Berücksichtigung von Lichtsignalgesteuerten Knoten und Rampenbewirtschaftungsansätzen möglich.

Gleichzeitig reagiert das Modell auch sensitiver auf mögliche Fehler bei der Kodierung des Netzwerkes (z.B. künstlichen Kapazitätsengpässen) und ist bezüglich des Speicherplatzbedarfs und der Rechenzeiten anspruchsvoller als dynamische Umlegungsverfahren. Daher beschränken sich die Anwendungen in der Regel auf Fragestellungen der Routenwahl. Zum Abbilden von Effekten auf die Verkehrsmittel- und Zielwahl durch entsprechende Rückkopplungen hingegen werden DTA-Ansätze kaum verwendet.

DTA-Ansätze beschränken sich in der Regel auf die Verkehrsflusssimulation des motorisierten Individualverkehrs. Die Berücksichtigung des öffentlichen Verkehrs mit DTA-Ansätzen steckt jedoch noch in den Kinderschuhen (Wang et al., 2018).

Mikrosimulationsmodelle

Derzeit existieren zwei Ansätze, welche eine mikroskopische Netzsimulation der Verkehrsnachfrage für grosse Gebiete erlauben: MATSim (Horni et al., 2016) und TRANSIMS (FHWA, 2013).

Die Verkehrssimulation in MATSim ist als Warteschlangenmodell implementiert. Jedes Netzelement wird dabei als Warteschlange modelliert. Sobald ein Fahrzeug von einem auf ein anderes Netzelement wechselt, wird dieses einer Warteschlange zugefügt. Dort verbleibt das Fahrzeug für die Dauer, die benötigt wird um das Netzelement im freien Verkehrsfluss zu durchfahren und bis es auf das nächste Netzelement einfahren kann. Aufgrund von definierten Parametern wird für jedes Netzelement definiert, wie viele Fahrzeuge maximal gleichzeitig in der Warteschlange aufgenommen und wie viele pro Zeiteinheit weitergeleitet werden können. Dieser Ansatz ist bezüglich des Rechenaufwands sehr effizient und erlaubt es auch Rückstauereffekte abzubilden. Allerdings werden dabei keine weiteren Interaktionen zwischen einzelnen Fahrzeugen modelliert (Spurwechsel, Geschwindigkeitswahl im Folgeverkehr etc.). Abbiegerestriktionen werden dabei über das Netzmodell definiert, die spezifische Abbildung von Widerständen und Kapazitätswiderständen an Knoten wird hingegen nicht standardmässig umgesetzt.

Transims setzt bei der Netzsimulation auf ein Cellular Automata Modell, welches die Interaktionen zwischen einzelnen Fahrzeugen abbildet und somit bezüglich des Verkehrsflusses eine höhere Auflösung bietet als MATSims Warteschlangenmodell. Da in für Transsims Mikrosimulation der Zustand aller Fahrzeuge für jeden Simulationsschritt von einer Sekunde Dauer aktualisiert werden muss, ist die Mikrosimulation von Transims rechenintensiver als diejenige von MATSim

Ähnlich wie bei der Verkehrsumlegung in aggregierten Modellen werden auch bei diesen mikroskopischen Simulationsmodellen die Routensuche und die Berechnung der Reisezeiten gekoppelt, um den Effekt von Reisezeitverzögerungen auf die Routenwahl und somit die Netzbelastung abzubilden. Mit MATSim ist es zusätzlich auch möglich die Verkehrsmittelwahl und die Wahl der Abfahrtszeit als weitere Verhaltensdimensionen innerhalb einer solchen Rückkopplung zu berücksichtigen. Dabei erfolgt die Verkehrsmittelwahl auf der Ebene von Touren und Subtours (Tour starten und endet an einem Ort, der aber nicht dem Wohnort entspricht), so dass Beschränkungen hinsichtlich der Verfügbarkeit des eigenen Fahrzeugs konsistent abgebildet werden können.

Beiden Ansätzen ist aber gemeinsam, dass die Nachfrage nicht als Matrizen, sondern auf Personenebene und zeitlich dynamisch verarbeitet wird. Somit stehen für das Routing und im Falle von MATSim auch für Wahl des Verkehrsmittels und der Abfahrtszeit alle soziodemographischen Attribute und die Informationen zum Kontext des Wegs innerhalb einer Tour und des Tagesverlaufs zur Verfügung. Somit fügen sich diese beiden Simulationsmodelle ideal in das Konzept der aktivitätenbasierten Nachfragemodellierung ein.

In MATSim erfolgt die Rückkopplung aufgrund der Simulationsergebnisse für einzelne Agenten (Personen). Dazu behalten alle Agenten die Ergebnisse der letzten Simulationssiterationen im Speicher und erproben gemäss einer definierten Strategie aber immer wieder andere Routen, Verkehrsmittel und Abfahrtszeiten. In einem iterativen Lernverfahren werden dabei diejenigen Aktivitätenpläne, die vergleichsweise schlechter bewertet werden, durch bessere ersetzt. Aufgrund dieser Bewertungen wird auch das Konvergenzkriterium festgelegt, das besagt, dass durch die weitere Veränderung der Aktivitätenpläne im Mittel keine besser bewerteten Pläne mehr gefunden werden können.

In der Standardarchitektur von MATSim und Transims sind jedoch keine Rückkopplungen bezüglich der Generierung von Aktivitäten, Wege und Touren vorgesehen. Somit wird eine Rückkopplung dieser Elemente der Verkehrsnachfrage aufgrund der Ergebnisse der Verkehrssimulation ausgeschlossen. In jüngerer Zeit wurden solche Rückkopplungen aber

über das Ausschreiben von Kenngrössenmatrizen auf Ebene Verkehrszelle ermöglicht, wie sie bereits bei der initialen Generierung der Aktivitäten, Touren und Wege verwendet werden.

2.2.3 Datenbedarf

Strukturdaten, Daten aus Verkehrstagebuchbefragungen sowie Daten und Verhaltensparameter aus *revealed* und *stated preference* Befragungen bilden sowohl für aggregierte als auch aktivitätenbasierte Modelle die Datengrundlage zur Beschreibung der Verkehrsnachfrage. Grundsätzlich unterscheiden sich beide Modellansätze bezüglich des Umfangs und der benötigten Granularität der Daten nicht gross.

Aktivitätenbasierte Modelle bieten aber den Vorteil, dass sie bei der Beschreibung der Verkehrsnachfrage in der Regel eine höhere räumliche Auflösung erlauben. Je feiner aufgelöst die räumlichen Daten für ein Untersuchungsgebiet vorliegen, z.B. auf Ebene Hektarraster, umso geringer wird der dadurch entstehende *aggregation bias*. Das Beispiel des Gesamtverkehrsmodells der Region Basel zeigt aber, dass auch aggregierte Modelle eine hohe räumliche Auflösung aufweisen können, obschon dadurch aufgrund der grossen Matrizen der Speicherbedarf erheblich ansteigt.

Angebotsseitig benötigen beide Modellansätze Daten zu den Verkehrsnetzen und ÖV-Fahrplänen. Erfolgt die Verkehrssimulation agenten-basiert oder als *Dynamic Traffic Assignment* stellen sich bezüglich der Korrektheit der Streckenattributierung höhere Anforderungen. Da diese Modelle Rückstau abbilden können, kann eine falsch attribuierte Strecke aber auch grosse Auswirkungen auf die Verkehrssimulation haben und stellen daher höhere Anforderungen an die Datenqualität. Weist zum Beispiel eine Strecke eine zu geringe Kapazität aus, so bildet die Simulation einen Engpass samt Rückstau ab, den es in Realität gar nicht gibt. Daher reagieren diese Modelle bezüglich der Routenwahl sehr sensitiv und die Bereinigung der Inputdaten ist in der Regel arbeitsintensiver als bei den aggregierten Modellen.

Bei der Erstellung von ABM und aggregierten Modellen können sich die Anwender entscheiden, ob sie fahrplanfein oder taktfein vorgehen. In letzterem Fall ist die Datenversorgung des ÖV Modell und die Prognose einfacher. Die meisten schweizerischen Verkehrsmodelle sind fahrplanfein. Es sei darauf hingewiesen, dass für agenten-basierte Modelle mit MATSim die aufwendigere, fahrplanfeine ÖV Modellierung notwendig ist.

Bezüglich der für die Validation verwendeten Daten unterscheiden sich die beiden Modellansätze insofern, dass die zeitliche Dimension bei den aktivitätsbasierten Modellen einen höheren Stellenwert hat und insofern höhere Anforderungen an die Daten für die Validation stellt. Da Zähldaten zum Strassenverkehr und ÖV-Fahrgasterhebungen aber in der Regel sowieso eine zeitliche Dimension umfassen, gibt bezüglich der Datenanforderungen keine praxisrelevanten Unterschiede.

Die höhere Granularität der Resultate von aktivitätsbasierten Modellen einen zusätzlichen Vergleich mit Kennzahlen aus Verkehrstagebucherhebungen auf Ebene von Aktivitätsplänen und Wegeketten. Allerdings ist ein solcher Vergleich von ABM-Resultaten nur in gewissen Aggregaten sinnvoll.

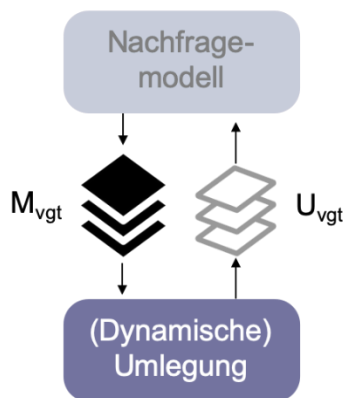
2.3 Vergleich der Modellarchitektur

2.3.1 Datenstruktur zur Beschreibung der Verkehrsnachfrage

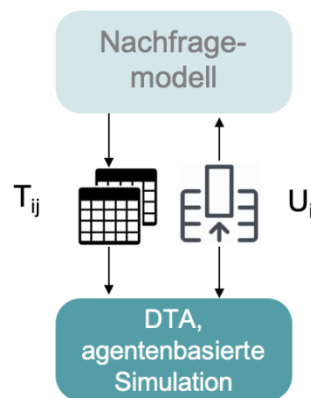
Abb. 16 zeigt wie die Datenstrukturen von aggregierten und aktivitätenbasierten Verkehrsmodellen grundsätzlich aufgebaut sind. Die für die Modellierung von weg- und tourbasierten (aggregierten) Modellen geeignete Datenstruktur unterscheidet sich grundlegend von aktivitätenbasierten Modellen.

Die Berechnung von Verkehrsmengen und der Verkehrsmittelwahl bei aggregierten Modellen erfolgt mit mathematischen Verfahren welche die Gesamtnachfrage aufgrund von Wahrscheinlichkeiten verteilt. Daraus resultieren Quell-/Zielmatrizen, welche die Verkehrsströme zwischen einzelnen räumlichen Gebieten beschreiben und deren Einträge durch Fließkommazahlen bestimmt sind. Die Dimensionen der Matrizen sind durch die Anzahl der Verkehrszellen gegeben, wobei für jede Quell-/Zielgruppe und jedes Verkehrsmittel separate Matrizen berechnet werden.

Aggregiertes Modell



Aktivitätenbasiertes Modell



Datenstruktur

M Nachfragematrizen
 U Kenngrößenmatrizen
 v Verkehrsmittel
 g Quell-/Zielgruppen
 t Zeitscheiben

T Tabellen
 i Haushalt/Person/Aktivität/
 Weg/Etappen (Zeilen)
 j Variable (Spalten)
 U_{ij} Kenngrößen je Etappe

Abb. 16 Allgemeine Datenstrukturen von aggregierten und aktivitätsbasierten Verkehrsmodellen

Aktivitätsbasierte Modelle beschreiben die Verkehrsnachfrage für jede Person (auch Agent genannt) einzeln. Das Datenformat gleicht dabei einer Verkehrstagebuchbefragung: Für jede Person werden die Orte aller Aktivitäten sowie die relevanten Informationen für die Wege zwischen den Aktivitäten beschrieben. Dies bedingt, dass die Nachfrage als Monte Carlo Simulation generiert wird. Bei der Anwendung der einzelnen Modelle werden die abhängigen Variablen jeweils aufgrund von Zufallszahlen zugewiesen. Wird für eine Person beispielsweise erwartet, dass diese zu einer Wahrscheinlichkeit von 75% eine Arbeitsaktivität durchführt, wird aufgrund einer uniform verteilten Zufallszahl zwischen 0 und 1 bei Werten unter 0.75 eine Arbeitsaktivität zugewiesen, bei Werten darüber nicht.

Aufgrund dieser Unterschiede bezüglich der Datenstruktur ergeben sich grundlegende Unterschiede bezüglich des Speicherbedarfs, der Erweiterbarkeit der verschiedenen Modellansätze, der möglichen Datengranularität und somit Analysemöglichkeit sowie des Bedarfs die Modellresultate in sogenannten Ensembles-Runs mehrmals zu berechnen. Diese Unterschiede werden in den folgenden Unterkapiteln dargestellt.

2.3.2 Speicherbedarf

Bei aggregierten Modellen werden für alle Zellen aller Matrizen Gleitkommazahlen gespeichert. Im nationalen Verkehrsmodell des Bundesamts für Raumentwicklung werden die

Verkehrsströme zwischen rund 8'000 Zellen über 26 Quell-/Zielgruppen und vier Verkehrsmodi in 81 Matrizen beschrieben. Wenn jeder Eintrag als 4 Byte Gleitkommazahl definiert ist, ergibt sich ein Speicherbedarf von 20.7 Gigabyte.

Unter der Annahme einer Bevölkerung von 8 Millionen Personen und 4 Wegen pro Tag lässt sich dieselbe Information für ein aktivitätenbasierten Modell in 32 Millionen Einträgen mit einem Speicherbedarf von rund 640 Megabyte²² speichern.

In der Realität ist es aber so, dass bei den ABM der Speicherbedarf aufgrund der zahlreichen Teilmodelle und bei Verwendung von nutzergruppen-spezifischen (aggregierten) Umlegungsmodellen ebenfalls beträchtlich sein kann. Eine Kopplung eines ABM mit einem agenten-basierten Simulationsmodell bedingt einen Speicherbedarf, der deutlich höher liegt als bei aggregierten Umlegungsmodellen.

2.3.3 Rechenintensität

Aufgrund der zahlreichen Teilmodellen, die jeweils für einzelne Personen (und gegebenenfalls Haushalte) berechnet werden müssen, ergibt sich für die Berechnung der Verkehrsnachfrage von ABM eine grössere Rechenintensität als bei aggregierten Modellen. Zudem ist es bei ABM und Verwendung agenten-basierter Simulation je nach Fragestellung geboten die Resultate aufgrund von Ensemble-Runs zu ermitteln. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn die Wirkung von Massnahmen räumlich oder zeitlich hochaufgelöst ausgewertet werden soll (Guggisberg Bicudo, 2020). Die Rechenvorgänge der einzelnen Teilmodelle lassen sich aber – bei entsprechend vorhandenen Ressourcen – gut parallelisieren, wodurch die Wirkung der erhöhten Rechenintensität auf die Modelllaufzeiten reduziert werden kann, aber auch höher Kosten für die Bereitstellung oder Miete der entsprechenden Rechenserver entstehen.

2.3.4 Erweiterbarkeit

Aufgrund der in aktivitätenbasierten Modellen eingesetzten Datenstrukturen kann die Auswahl der für die Verkehrsmodellierung berücksichtigten Variablen vergleichsweise einfach erweitert werden. Dazu wird das bestehende Datenmodell um zusätzliche Spalte ergänzt. Bei aggregierten Modellen bedeutet die Verwendung zusätzlicher Variablen aber immer, dass die Matrizen weiter segmentiert werden müssen und somit der Speicherbedarf ansteigt.

Bei einer Berücksichtigung zweier weiteren Modi im oben aufgeführten Beispiel des NPVM sowie der Aufteilung in fünf Einkommensgruppen und vier Tageszeiten würde der Speicherbedarf aber auf 61.2 Gigabyte anwachsen.

Unter der Annahme einer Bevölkerung von 8 Millionen Personen und 4 Wegen pro Tag lässt sich dieselbe Information für ein aktivitätenbasierten Modell in 32 Millionen Zeilen mit 7 Spalten mit rund 832 Megabyte speichern. Bei Berücksichtigung weiterer Variablen skaliert das Modell linear mit der Anzahl Personen. Für zusätzliche Attribute bestehender Variablen bedarf es aber keines zusätzlichen Speicherplatzes.

Eine Erweiterung der in den Nachfrage- und Umlegungsmodellen verwendeten Variablen bedingt aber auch, dass entsprechende Verhaltensmodelle vorliegen, die erfolgreich mit empirischen Daten geschätzt werden könnten. Dies bedingt aber unabhängig von der Modellform Zusatzaufwände, die in der Regel deutlich höher liegen, als die tatsächliche Umsetzung im Modell.

Bestimmte Modellerweiterungen können aber bei den ABM auch ohne entsprechende Anpassung der Verhaltensmodelle implementiert werden. Zur Berücksichtigung einer Nummernschildbelegung als Massnahme zur Emissionsreduktion in städtischen Gebieten

²² Annahme: Pro Zeile sechs Spalten mit je 4 Byte für x- und y-Koordinaten der Start- und Zielorte sowie Verkehrsmittel

reicht es, wenn in der Personentabelle nur eine zusätzliche boolesche Variable angefügt werden, die beschreibt, ob diese Person Zugang zu einem Fahrzeug hat, welches die Nummernschildbelegung erfüllt. Eine methodisch ähnlich konsistente Umsetzung einer solchen Massnahme mit einem aggregierten Modell wäre hingegen nur mit grossem Aufwand umsetzbar. Zwar könnte man die entsprechenden Quell-/Zielverkehr entsprechend der Nummernschildbelegung reduzieren. Sekundäre Effekte, wie beispielsweise bei der Zielwahl, würden aber tieferegehende Anpassungen in der Modellstruktur nach sich ziehen.

2.3.5 Aggregation Bias

Aufgrund der grundlegend anderen Datenstruktur ohne Verkehrszellen kann die Beschreibung der Verkehrsnachfrage räumlich hochaufgelöst erfolgen. Dies erlaubt es räumlich hochaufgelöste Variablen bei der Beschreibung Verkehrsmittelbesitzes und der Verkehrsmittelwahl zu berücksichtigen. So kann zum Beispiel abgebildet werden, dass eine Person mit Wohnort direkt neben einem ÖV-Knotenpunkt aufgrund der lokal hohen ÖV-Erreichbarkeit eine höhere Wahrscheinlichkeit hat ein ÖV-Abo zu besitzen und Wege aufgrund der kurzen Zu- und Abgangszeiten zur Haltestelle eher mit dem ÖV zurücklegt.

In aggregierten Modellen können räumliche und soziodemographische Variablen jedoch nur je Verkehrszelle gemittelt angegeben werden. Dies hat zur Folge, dass in den jeweiligen Verhaltensmodellen nur Zonenmittelwerte verwendet werden. Da diese Besitzmodellen in der Regel als Entscheidungsmodelle mit nicht-linearen Response-Funktionen spezifiziert sind, wird die Wirkung solcher Veränderung aufgrund der Anwendung auf gemittelte Werte unterschätzt, wie Abb. 17 beispielhaft zeigt.

In Abb. 17 sind auf der x-Achse für die Personen a und b jeweils zwei Werte einer entscheidungsrelevanten Variablen aufgezeichnet. Gemäss der Logit-Funktion zeigen die schwarzen, gestrichelten Linien die zugehörigen Auswahlwahrscheinlichkeiten für die einzelnen Personen an. In einem aggregierten Modell kann aber statt des personenspezifischen Nutzens nur der entsprechende Mittelwert berücksichtigt werden. Wie die Grafik zeigt, ergibt sich aufgrund des Mittelwerts aber bezüglich der resultierenden Auswahlwahrscheinlichkeit gegenüber dem zunächst personenspezifischen berechneten und dann gemittelten Wert ein Unterschied. Diese Eigenschaft wird in der Literatur als *aggregation bias* bezeichnet.

Entscheidungsmodelle zur Verkehrsmittelwahl werden in der Regel aufgrund personenspezifisch erhobener Daten geschätzt. In aggregierten Modellen erfolgt die Anwendung dieser Modelle aber aufgrund von zonenspezifischen Mittelwerten der jeweiligen Personen- und Wegzweckgruppen. Dabei ist es so, dass das Ausmass des *aggregation bias* im Verhältnis zur Streuung der entscheidungsrelevanten Variablenwerte je Zone anwächst.

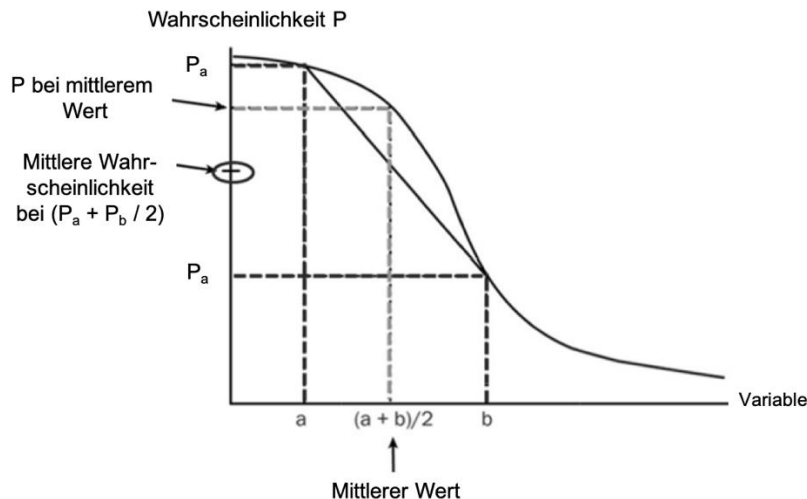


Abb. 17 Skizze zur Veranschaulichung des Aggregation Bias

In einem ABM-basierten können in den verschiedenen Nachfragemodellen Variablen, wie z.B. der Mobilitätswerkzeugbesitz oder das Einkommen personenspezifisch berücksichtigt werden und unterliegen daher keinem *aggregation bias*. Die vom Verkehrsgebot abhängigen Kenngrößenmatrizen werden allerdings in den meisten in der Praxis angewendeten ABM aufgrund von zonenspezifischen Mittelwerten berechnet. Wenn man das ABM jedoch adressscharf spezifiziert oder mit einer agentenbasierten Simulation verbindet, wird der *aggregation bias* auch bezüglich des Verkehrsangebots reduziert.

2.3.6 Analysemöglichkeiten

Bei weg- und tourbasierten Ansätzen erfolgt die Beschreibung der Nachfrage mit Quell-/Zielmatrizen, die weiter nach Verkehrsmitteln und verhaltenshomogenen Gruppen unterteilt werden können. Die dazu benötigte Datenstruktur beschränkt aber die Möglichkeiten die Nachfrage räumlich, zeitlich und bezüglich soziodemographischer Gruppen zu differenzieren.

Kernidee von aktivitätenbasierten Modellansätzen ist es, dass die Verkehrsnachfrage auf Ebenen einzelner Personen beschrieben und simuliert wird. Die Modellergebnisse liegen daher auch in dieser Auflösung vor. Einzelne Tabellen mit Querverweisen beschreiben dabei ähnliche wie bei Verkehrstagebuchbefragungen auf Ebene Haushalt, Person, Touren, Wegen und Etappen die simulierte Verkehrsnachfrage. Darauf basierend können Modellresultate je nach Bedarf der Fragestellung in vielfältiger Weise aufbereiten werden. So ist es zum Beispiel einfach Verhaltensreaktionen differenziert nach Einkommen, Alter, Reisezweck zu modellieren und auch gemäss Wohn- oder Arbeitsorten sowie verschiedenen Gemeinden oder Quartieren auszuwerten. Somit können zum Beispiel die Auswirkungen von Infrastrukturausbauten und Mobility Pricing Szenarien auch nach Einkommensgruppen und räumlichen Aspekten bewertet werden.

Die in weg- und tourbasierten Modellen verwendete räumliche Auflösung ist aufgrund der matrixbasierten Datenstruktur aus arbeitspraktischen Gründen auf mehrere tausend Zellen beschränkt. In aktivitätenbasierten Modellen kann diese Einschränkung aufgehoben werden. Zwar werden auch hier bei der Modellierung der Aktivitätenketten und der Zielwahl in der Regel zellenbasierte Ansätze eingesetzt, aber insbesondere bei der Verkehrs- und Routenwahl ergeben sich bezüglich der räumlichen Analyse der Ergebnisse keine Einschränkungen. Somit kann zum Beispiel abgebildet werden, dass Fahrten von und zu einem Gebäude in Bahnhofsnähe einen höheren ÖV-Anteil aufweisen als die für Gebäude weiter weg vom Bahnhof gelegen, aber noch immer derselben Verkehrszelle zugeordnet sind (M. Rieser, 2010). Das ist in der Praxis aber noch nicht überall der Fall. Viele ABM verwenden heute ebenfalls weiterhin zonen-basierte Daten.

2.4 Vergleich der Massnahmensensitivität

Ein gutes, praxistaugliches Verkehrsmodell zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Repliziert die Kenngrößen der Verkehrsnachfrage und Streckenbelastungen für den Referenzzustand.
- Reagiert sensitiv auf Massnahmen für welche die Modellarchitektur konzipiert wurde.
- Die beobachteten Sensitivitäten der Nachfragereaktionen sind logisch nachvollziehbar und begründbar.

Aktivitätenbasierte Modelle ermöglichen es, mehr Variablen in die Verhaltensmodelle einzubeziehen, was viele Vorteile bei Anwendung und Auswertung bringt. Allerdings muss man sich klar sein, dass zusätzliche Variablen die Modelle komplexer machen, so dass ABM schwieriger zu kalibrieren sind als aggregierte Modelle und auch in der Anwendung schwieriger zu beherrschen sind.

Basierend auf dem obigen Vergleich der Modellarchitekturen wird in diesem Teilkapitel aufgezeigt, wie sich diese Unterschiede hinsichtlich der Beantwortung verkehrsplanerischer Fragestellungen äussern und welche Relevanz diesen Unterschieden heute und in absehbarer Zukunft beigemessen wird.

2.4.1 Veränderung der Strukturdaten

Räumliche Verteilung der Personen- und Raumstruktur

Die Abschätzung der verkehrlichen Auswirkungen für Prognoseszenarien mit veränderten Strukturdaten der räumlichen Verteilung der Wohnbevölkerung und Arbeitsplätze gehört zu den Standardaufgaben eines Verkehrsmodells. Dabei unterscheiden sich aggregierte und aktivitätenbasierte Modellansätze bezüglich des Bedarfs und der Auflösung der dazu benötigten Inputdaten nur wenig. Beiden Ansätzen ist gemeinsam, dass die Veränderungen der Strukturdaten in derselben Auflösung wie im Referenzzustand vorliegen müssen. Bei den aktivitätenbasierten Modellen bedarf es aber zusätzlich einer Aktualisierung der synthetischen Population aufgrund der neudefinierten Randsummen. Falls dabei angenommen werden kann, dass die Abhängigkeitsverhältnisse (Korrelationsstruktur) einzelner Variablen und Attribute unverändert bleiben und sich nur die Randsummen (z.B. Anzahl Personen nach Altersklassen) ändern, hält der Aufwand für eine derartige Aktualisierung aber in Grenzen.

Mobilitätswerkzeuge

Ein weiterer Vorteil von aktivitätenbasierten Modellen zeigt sich aber in der differenzierteren Abbildung von Sensitivitäten bei Änderungen der Siedlungsstruktur und Erreichbarkeiten. Zum Beispiel kann der Effekt einer höheren Siedlungsdichte oder verbesserten ÖV-Erreichbarkeit auf den Mobilitätswerkzeugbesitz auf Ebene einzelner Personen und Haushalte beschrieben werden. Dies hat zur Folge, dass dabei kein «Aggregation Bias» auftritt: Die Anwendung der entsprechenden Besitzmodelle erfolgt nicht auf je Verkehrszone ermittelten Mittelwerten, sondern erfolgt für jede Person oder Haushalt einzeln. Dieser Vorteil relativiert sich, wenn aufgrund des Mobilitätswerkzeugbesitzes unterschiedliche verhaltenshomogene Gruppe verwendet werden.

Verkehrsnachfrage

Auswertungen von Verkehrstagebuchbefragungen zeigen, dass Personen die in dichtbesiedelten Gebieten wohnen, die durch eine hohe Heterogenität der Landnutzung charakterisiert sind, zwar in etwa gleichviele Wege pro Tag zurücklegen, die Gesamtverkehrsleistung aber deutlich geringer als im statistischen Mittel ausfällt (Bubenhofer et al., 2018). Umgekehrt zeigt sich, dass Personen in ländlichen Gebieten ihre Aktivitäten in komplexeren Touren organisieren und dabei längere Distanzen zurücklegen (Wallace et al., 2000).

Der Effekt, dass sich aufgrund der Siedlungsstruktur längere Wege ergeben, wird primär durch das Zielwahlmodell abgedeckt. In aggregierten und aktivitätenbasierten Modellen kommen dabei prinzipiell die gleichen Modellansätze zur Anwendung. Daher ergeben sich hier keine grossen Unterschiede zwischen den Modellformen bezüglich der resultierenden Verteilung der Wegdistanzen.

Bezüglich der Beschreibung der Anzahl Wege, die eine Person pro Tag zurücklegt werden, unterscheiden sich die Modellansätze darin, dass bei tour- und aktivitätenbasierten Modellen die Abhängigkeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Aktivitäten explizit berücksichtigt werden können. Somit kann zum Beispiel abgebildet werden, dass Personen die an einem zentral gelegenen Ort wohnen, tendenziell nach Aktivitäten ausser Haus eher wieder nach Hause zurückkehren, da die Aktivitätsorte mit geringerem zusätzlichen Wegaufwand erreichbar sind. Im *Modèle Multimodal Transfrontalier* des Kantons Genf wird zum Beispiel die Differenzierung der Tour-Komplexität nach Raumtyp abgebildet. Bei aggregierten Modellen werden solche Abhängigkeiten in der Regel mittels raumtypspezifischer Erzeugungsraten abgebildet. Das NPVM der Schweiz unterscheidet zum Beispiel beim spezifischen Verkehrsaufkommen zwischen städtischen, intermediären und ländlichen Gebieten.

2.4.2 Verkehrsverhalten

Berücksichtigung der Soziodemographie

Das für aktivitätenbasierten Ansätze verwendete Datenmodell ermöglicht es bei allen Verkehrsverhaltensmodellen (Verkehrsmittelwahl, Routenwahl, Wahl der Abfahrtszeit) auf das volle Set soziodemographischer Variablen der synthetischen Population zurückzugreifen. Dies ermöglicht eine flexiblere Formulierung der Verhaltensmodelle. Zum Beispiel können über die einzelnen Verhaltensmodelle unterschiedliche soziodemographische Variablen verwendet werden, ohne dass sich dies auf die Komplexität und den Speicherbedarf auswirken würde.

Der Einbezug verschiedener soziodemographischer Variablen erlaubt, dass die einzelnen Verhaltensmodelle differenzierter spezifiziert werden können. Somit kann zum Beispiel abgebildet werden, dass die Reaktion auf veränderte Mobilitätskosten einkommensabhängig modelliert wird und die Bewertung von Zeitkosten abhängig vom Alter oder der Anzahl und Dauer der geplanten Aktivitäten erfolgt.

Ein weiterer Vorteil bei aktivitätenbasierten Ansätzen ist, dass die Anwendung der Verhaltensmodelle keinem *Aggregation Bias* unterliegen, aufgrund derselben Mechanismen, wie sie bereits oben bei der Anwendung der Mobilitätswerkzeuge beschrieben wurden.

Berücksichtigung von Haushalten

Mobilitätsentscheidungen werden oft im Kontext von Haushalten gefällt. Beim Mobilitätswerkzeugbesitz ist die Komposition des Haushalts ein wichtiges Kriterium, das erklärt, ob und wie viele Fahrzeuge in einem Haushalt verfügbar sind. Wege mit mehreren Personen finden mehrheitlich im Kontext von Haushalten statt, insbesondere wenn es sich um Begleitwege handelt. Die Berücksichtigung solcher Abhängigkeiten beim Verkehrsverhalten innerhalb eines Haushaltes können nur mit aktivitätsbasierten Modellen direkt abgebildet werden. Die Koordination der Wege innerhalb eines Haushaltes erhöht die Komplexität eines ABM aber sehr stark und erschwert Kalibrierung und Beherrschbarkeit des Modells. Deshalb verzichtet heute die grosse Mehrheit der in der Praxis angewendete ABM darauf, die Interaktion von Haushaltsmitgliedern explizit abzubilden.

Wahl der Abfahrtszeit

Bei aggregierten Modellen erfolgt die Aufteilung der Nachfrage für den DWV in einzelne Zeitscheiben typischerweise aufgrund der nach Verkehrszweck differenzierten Verkehrsmengenanteile. Zwar wäre theoretisch auch ein differenzierter Ansatz möglich. Beschränkungen hinsichtlich Nachfragesegmentierung, die sich aufgrund der verwendeten Datenstruktur ergeben, erschweren dies aber.

Es ist anzunehmen, dass die Bereitschaft mit der Arbeit früher zu beginnen um Verkehrsüberlastungen auszuweichen unter anderem mit soziodemographischen Variablen sowie der Haushaltskomposition erklärt werden kann. Ebenso ist nachvollziehbar, dass Personen, die nicht erwerbstätig sind oder ein tiefes Einkommen haben, eher dazu bereit sind, eine Aktivität später zu planen, um von vergünstigten ÖV-Tarifen zu profitieren. Um solche Effekte abbilden zu können, müssten bei aggregierten Modellen alle Nachfragematrizen gemäss der für die Wahl der Abfahrtszeit relevanten Attribute differenziert werden, was zu einem beträchtlichen Anstieg des Speicherbedarfs führen würde und die Handhabbarkeit des Modells erschwert.

Aktivitätenbasierte Modelle sind auch bezüglich der Formulierung und Anwendbarkeit von Modellen zur Wahl der Abfahrtszeit flexibler.

Nicht-heimbasierte Wege

Die Auswertung der Daten des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015 (Bundesamt für Statistik BFS & Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2017) zeigt, dass bei 27% aller Wege weder Start- noch Zielort dem Wohnort entspricht (wohnotgebunden).²³ Der Anteil der auf diesen Wegen zurückgelegten Distanz umfasst 24% der Gesamtverkehrsleistung. Dabei zeigen sich aber auch deutliche Unterschiede bezüglich der Raumstruktur. Je nach Raumtyp des Startorts eines Wegs, beträgt der Anteil von nicht-wohnotgebundener Wege zwischen 20% (mehrfach ausgerichtete Gemeinde) und 33% (Kernstädte). Das heisst, dass in dichteren Siedlungsstrukturen komplexere Wegeketten häufiger sind.

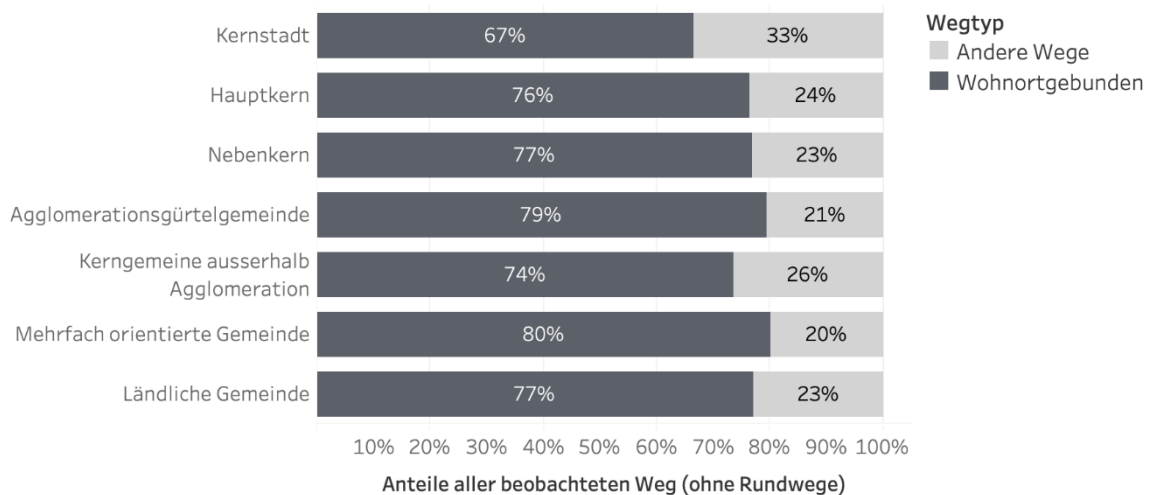


Abb. 18 Anteile von wohnortgebundenen Wegketten im Mikrozensus Verkehr 2015 je nach Raumtyp des Wohnorts

Aufgrund der Modellstruktur ist es nur bei tour- und aktivitätenbasierten Modellansätzen direkt möglich, bei den Verhaltensmodellen nicht-heimgebundener Wege auf soziodemographische Variablen sowie Informationen zum Kontext des Wegs innerhalb einer Tour zurückzugreifen. Dies betrifft sowohl die Ziel-, Verkehrsmittel- als auch Routenwahl für nicht-heimbasierte Wege. Da nicht-heimbasierte Wege besonders in dicht besiedelten Gebieten häufiger auftreten, erweisen sich tour- und aktivitätenbasierten Modellansätzen gegenüber weg-basierten Ansätzen für solche Gebiete bezüglich der Verhaltensmodellierung als vorteilhaft.

²³ Unter Berücksichtigung des Personengewichts, ohne Wege mit Start- oder Ziel im Ausland, ohne Rundwege

Verkehrsmittelwahl

Die in Abb. 11, Abb. 12, und Abb. 13 aufgeführten Beispiele zeigen auf, wie sich die einzelnen Modellansätze bezüglich der für die Verkehrsmittelwahl verfügbaren Informationen unterscheiden. Daraus wird klar, dass der Einsatz nicht-wechselbarer Verkehrsmittel das Verhalten auf der Ebene Tour (und nicht bezüglich einzelner Wege) beeinflusst. Daher bieten tour- und aktivitätenbasierte Ansätze bezüglich der Konsistenz der Verhaltensmodelle klare Vorteile gegenüber wegbasierten Ansätzen.

Untersuchungen zum Verhalten bei der Verkehrsmittelwahl zeigen, dass sich die Präferenzstrukturen deutlich hinsichtlich des Mobilitätswerkzeugbesitzes (und somit der wahrgenommenen Grenzkosten) sowie soziodemographischer Variablen unterscheidet. Die Berücksichtigung des Mobilitätswerkzeugbesitzes ist zumindest für heimbasierte Wege auch in aggregierten Modellen möglich, unterliegt aber wiederum dem *aggregation bias*. Die Berücksichtigung von soziodemographischen Variablen mit aggregierten Modellen ist wiederum aufgrund der verwendeten Datenstruktur beschränkt.

Die Anzahl der im Modell berücksichtigten Verkehrsmittel stellt für aggregierte Modelle eine weitere Einschränkung aufgrund der verwendeten Datenstruktur dar, insbesondere, wenn damit auch multimodale Wege abgebildet werden sollen. Neue Ansätze für die multimodale Routensuche, bei der einzelne Etappen nicht über Anbindungen abgebildet werden, könnten theoretisch auch in aggregierten Modellen eingesetzt werden. Bisher wurden solche Routingalgorithmen mit Ausnahme von «Park/Bike and Ride» aber nur innerhalb von aktivitätenbasierten Modellen eingesetzt. In jedem Fall führt aber die Berücksichtigung multimodaler Wege dazu, dass die Anzahl der für einen Weg zur Verfügung stehenden Modi ansteigt, was bei aggregierten Modellen dazu führt, dass die Nachfragematrizen weiter segmentiert müssen und die Speicherplatz- und Rechenintensität ansteigt.

Mobility Pricing sowie Verfügbarkeit und Kosten von Parkplätzen

Durch zeit- und ortsabhängige Erhebung von Strassengebühren im MIV und zeit- und streckenabhängige Preise im ÖV kann das Verkehrsverhalten beeinflusst werden. Solche Mobility Pricing Strategien zielen darauf ab zeitlich und örtliche beschränkte Nachfragespitzen zu glätten, Personenströme auf andere Verkehrsmittel zu lenken und so die Kapazitäten der vorhandenen Infrastruktur besser zu nutzen. Ebenso ist zu erwarten, dass aufgrund von Mobility Pricing für gewisse Aktivitäten wie Einkaufen oder Freizeit andere Ziele aufgesucht werden oder öfters Telearbeit nachgegangen wird.

Aktivitätenbasierte Verkehrsmodelle bieten bei der Abbildung der von Mobility Pricing hervorgerufenen Verhaltensreaktionen gegenüber den aggregierten Modellansätzen die im Folgenden dargelegte Vorteile. Diese beruhen primär darauf, dass bei aktivitätsbasierten Ansätzen die Verkehrsnachfrage für einzelne Personen statt mit Quell-/Zielmatrizen modelliert wird. Dies macht es deutlich einfacher personen- und haushaltsspezifische Verhaltensparameter zur berücksichtigen.

Zahlreiche Studien zum Verkehrsverhalten bei der Routen- und Verkehrsmittelwahl in der Schweiz (Hess et al., 2008) und im Ausland (z.B. Arup, Institute for Transport Studies, & Accent, 2015; Börjesson & Eliasson, 2014) zeigen, dass (neben dem Reisezweck) das Einkommen einen wichtigen Einfluss auf die Wahrnehmung der Wegkosten hat. Personen mit höheren Einkommen nehmen Treibstoffkosten, Billettpreise oder Strassenbenutzungsgebühren weniger stark wahr und werden daher von Mobility Pricing weniger stark in ihrem Verkehrsverhalten beeinflusst. Ebenso zeigt sich, dass auch weitere personen- und haushaltsspezifische Faktoren, wie zum Beispiel die Anzahl Kinder in einem Haushalt einen Einfluss auf die Verfügbarkeit von Zeit und somit die Zeitparameter haben (Börjesson & Eliasson, 2019).

Die Wahl der Abfahrtszeit ist eine wichtige Verhaltensreaktion bei der Modellierung von zeit- und auslastungsabhängigem Mobility Pricing. Grundsätzlich kann diese Entscheidungsdimension mit entsprechenden Modellen sowohl mit aggregierten und aktivitätsbasierten Modellansätzen abgebildet werden. Mit aktivitätenbasierten Modellen können dabei aber einfacher personenspezifische Attribute mitberücksichtigt werden. So ist zu erwarten,

dass die Möglichkeit die Abfahrtszeit anzupassen nicht nur vom Wegzweck, sondern auch von der Art der Arbeit abhängig ist, der eine Person nachgeht. Aktivitätsbasierte Ansätze machen es einfacher solche zusätzlichen Variablen, wie z.B. den Arbeitssektor (Dienstleistung, Industrie etc.) in den Verhaltensmodellen zu berücksichtigen. Zudem bieten aktivitätsbasierte Modelle den Vorteil, dass mögliche Sekundäreffekte ebenfalls berücksichtigt werden können. Zum Beispiel ist anzunehmen, dass Personen, die aufgrund einer früher gewählten Abfahrtszeit zur Arbeit ihre Arbeitsaktivität auch wieder früher beenden.

Wie im einführenden Beispiel gezeigt, ermöglichen tour- und aktivitätsbasierte Ansätze die Verkehrsmittelwahl auf Ebene einer Tour zu modellieren und dabei die Einschränkungen zu berücksichtigen, die sich bei der Wahl eines nicht-wechselbaren Verkehrsmittel für einen Weg auf der Tour auf die weiteren Wege ergeben. Somit lässt sich abbilden, dass der Einfluss von Mobility Pricing, welches sich bezüglich der zeitlichen Ausprägung vielleicht nur auf die Morgenstunden beschränkt, auch im weiteren Tagesverlauf Auswirkungen auf Verkehrsmittelwahlentscheide hat. Mit weg-basierten Ansätzen können solche Sekundäreffekte nicht abgebildet werden.

Grundsätzlich ist es aber so, dass bei der Simulation und Bewertung von Mobility Pricing ist die Einstellung der Preiselastizität die grösste Herausforderung ist, unabhängig davon, ob ein ABM oder ein aggregiertes Modell benutzt wird.

Verfügbarkeit und Kosten von Parkplätzen

Die Verfügbarkeit und Kosten von Parkplätzen beeinflussen das Verkehrsverhalten sehr ähnlich wie Mobility Pricing Massnahmen. Auch hier sind als Verhaltensreaktionen Änderungen bei der Verkehrsmittelwahl sowie auf die Abfolge und die gewählten Ziele von Aktivitäten zu erwarten. Bezüglich der Wahl der Abfahrtszeit sind Verhaltensänderungen hingegen nur dann zu erwarten, wenn Parkgebühren abhängig von der Tageszeit erhoben werden. Bezüglich dieser Dimensionen sind die Vorteile von aktivitätsbasierten Modellen gleich gelagert wie beim Mobility Pricing.

Parkgebühren werden fast immer in Abhängigkeit der Parkdauer berechnet und erhoben. Aufgrund der Information zur Dauer der Aktivitäten, ermöglichen aktivitätsbasierte Modellsätze es die Parkkosten als Funktion der Parkdauer zu berechnen. Bei aggregierten Modellen hingegen wäre man gezwungen je Quell-/Zielgruppe eine über alle Personen mittlere Aktivitätsdauer festzulegen.

Fuss- und Veloverkehr

Die in weg- und tourbasierten Modellen zur Verfügung stehende räumliche Auflösung genügt, um die für ÖV- und MIV-Wege relevanten Kenngrössen realitätsnah abzubilden. Die feinere räumliche Auflösung von aktivitätsbasierten Modellen bietet aber Vorteile bei der Modellierung des Velo- und insbesondere des Fussverkehrs. So wird aufgrund der vorwiegend kurzen Weglängen zum Beispiel eine Hektarfeine Zonierung empfohlen, um Fusswege in aggregierten Verkehrsmodellen realistisch abzubilden (Gasser et al., 2017)^{[10][10]} aber das einzige aggregierte Modell mit hektarrasterfeinen Verkehrszellen. Eine derart feine Zonierung führt aber zu einem deutlichen Anstieg der Anzahl Verkehrszellen und hat somit Implikationen bezüglich der Rechen- und Speicherintensität. Neben der feineren räumlichen Auflösung bieten aktivitätsbasierte bei kurzen Wegen eine hohe Aussagekraft. Aktivitätsbasierte Ansätze erlauben es solche und weitere personen-spezifische Variablen in den entsprechenden Modellen zu berücksichtigen. bei kurzen Wegen eine hohe Aussagekraft. Aktivitätsbasierte Ansätze erlauben es solche und weitere personen-spezifische Variablen in den entsprechenden Modellen zu berücksichtigen.

Multimodale Wege

Gemäss Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015 (Bundesamt für Statistik BFS & Bundesamt für Raumentwicklung ARE, 2017, Abb. G 3.3.1.5, S. 26) werden bei knapp 90% der ÖV-Wege die Zu- und Abgangsetappen zu Fuss zurückgelegt. Bei knapp 4% der ÖV-Wege wird mindestens die Zu- oder Abgangsetappe mit dem Velo zurückgelegt, und bei etwas über 6% mit dem MIV.

Zugangs- und Abgangsetappen, die über die jeweiligen Verkehrszellen am Start und Ziel einer Reise hinausgehen, können mit aggregierten Modellen zwar auch abgebildet werden, allerdings müssen dabei die Anbindungen zwischen Verkehrszellen und ÖV-Haltestellen in der Regel a priori definiert werden. Änderungen des Verkehrsangebots mit Auswirkungen auf diese Strecken sind somit nicht direkt massnahmensensitiv. Ebenso steigt die Anzahl der zu berücksichtigenden Modi an, da alle möglichen Kombinationen von Verkehrsmodi für Zu- und Abgangswege einzeln berücksichtigt werden müssen. Je nach Software beziehungsweise Modellaufbau können Zu- und Abgangswege aber auch über das Verkehrsnetz geroutet werden, wie dies zum Beispiel mit TransCAD im GVM Region Basel der Fall ist.

2.4.3 Emissionen

Weitere funktionelle Einschränkungen von Umlegungsmodellen gibt es bei der Simulation von Verkehrsemissionen. Die Emissionsmenge von fossilen Brennstoffen betriebenen Fahrzeugen ist zu Beginn einer Fahrt mit kaltem Motor beträchtlich höher. Da in den aggregierten Nachfragemodellen keine Zuordnung zusammengesetzter Wegeketten zu Einzelpersonen erfolgt, kann der Kaltstartanteil an Gesamtwegen nur pauschaliert ermittelt werden. Außerdem wird in aggregierten Modellen der Einfluss des Verkehrsflusses (freier, zähfließender, dichter, Stop+Go Verkehr) und Behinderungen durch Lichtsignalanlagen und Vorrangregelung im städtischen Verkehr über klassifizierte Schadstoffwerte (z.B.: HBEFA 3.3 oder COPERT) abgebildet. Für feiner granuliert mikroscopische Emissionsberechnungen wie PHEM oder EnViVer können aggregierte Nachfragemodelle nicht die geeigneten Eingangsdaten liefern.

Da aktivitätsbasierte Modell neben den Wegen einer Person auch das verwendete Verkehrsmittel und die Aktivitätendauern protokollieren, kann über den Fahrzeugtyp der Kaltstartanteil und die produzierten Emissionen in Abhängigkeit des Fahrtzustandes ermittelt werden (Hatzopoulou & Miller, 2010). Allerdings sind die dann verwendeten mikroscopischen Emissionsmodelle deutlich rechenintensiver als rein Datenbankorientierte Nachschlagverfahren wie HBEFA. Die mikroscopisch erzeugten Emissionen können allerdings zeitlich und räumlich disaggregiert ermittelt werden.

2.4.4 Zukünftige Mobilitätsformen

Mobility as a Service (MaaS)

Unter dem Überbegriff *Mobility as a Service* (MaaS) werden Mobilitätsdienstleistung zusammenfasst, welche Kunden die Nutzung individueller Verkehrsangebote ermöglichen ohne selbst ein Fahrzeug besitzen zu müssen. Dies bietet Reisenden eine grosse Flexibilität bei der Verkehrsmittelwahl, insbesondere auch bei multimodalen Wegen und Touren. Typische MaaS-Angebote sind *Car Sharing*, *Taxi* und *Ride Hailing* (Fahrtenvermittlung wie zum Beispiel von Uber angeboten), Velo- und eTrotinett-Teilsysteme aber auch Rufbusse.

Anders als bei konventionellen ÖV-Angeboten, die nach einem Fahrplan operieren, lässt sich die Servicequalität von MaaS-Angeboten nicht a priori beschreiben, da die räumliche und zeitliche Verfügbarkeit, Flottengrößen und die Preise direkt oder indirekt von der Nutzung abhängt. Um MaaS-Angebote in Verkehrsmodellen möglichst realitätsnah abbilden zu können, muss die zeitliche und räumliche Variation der Angebotsqualität beschrieben werden. In einer Verkehrssimulation müssen neben den Agenten auch geteilte Fahrzeuge als eigenständige Einheiten abgebildet werden, um die stochastische Variation und Angebots-Nachfrage-Rückkopplung abbilden zu können.

Grundsätzlich können MaaS-Angebote auch in aggregierten Verkehrsmodellen simuliert werden, wie das Beispiel des Softwareprodukts PTV MAAS Modeller²⁴ zeigt. Dabei werden aufgrund der Nachfragematrizen zeit- und ortsspezifische Fahrtwünsche abgeleitet. Die Software berechnet dann, wie gut diese Fahrtwünsche mit der a priori definierten Flotte

²⁴ <http://www.traffic-inside.com/tag/ptv-maas-modellern/>

an MaaS-Fahrzeugen bedient werden kann. Dabei gibt es aber keine Rückkopplung mit Routen-, Verkehrsmittel- oder Zielwahlentscheidungen und die Selektion der Fahrten, die über MaaS abgewickelt werden sowie deren zeitliche und räumliche Verortung erfolgt deterministisch.

Autonome Fahrzeuge

Die Modellierung des Einflusses selbstfahrender Fahrzeuge stellt in mehreren Dimensionen eine Herausforderung dar. Selbstfahrende Fahrzeuge haben das Potenzial die wahrgenommenen Raumüberwindungskosten deutlich zu reduzieren. Dieser Einfluss auf die Zielwahl kann sowohl mit aktivitätsbasierten und aggregierten Modellen durch Anpassung der Raumwiderstandsfunktion abgebildet werden.

Wie bei MaaS ist aber auch zu erwarten, dass die Verfügbarkeit von geteilten Flotten selbstfahrender Fahrzeuge eine höhere Flexibilität bei der Verkehrsmittelwahl bieten und daher multimodaler Wege und Touren deutlich häufiger auftreten als dies heute der Fall ist. Solche Wege und Touren lassen sich besser mit aktivitätsbasierten Ansätzen abbilden.

Gleich wie bei MaaS-Angeboten hängt die zeitlich und räumlich differenzierte Servicequalität, die geteilte selbstfahrende Fahrzeuge bieten, von der Flottengrösse und deren Preis und regulatorischen Aspekten (z.B. Einsatzgebiet, Abgaben etc.) ab. Es ist aber zu erwarten, dass solche Flotten selbstfahrende Fahrzeuge einen beträchtlich höheren Anteil der Verkehrsnachfrage bedienen als dies bei den heute verfügbaren MaaS-Angeboten der Fall ist. Daher erscheint es für die realitätsnahe Abbildung solcher Flotten unerlässlich, dass das Zusammenspiel zwischen Angebot und Nachfrage über eine Rückkopplung im Modell abgebildet wird. Dies bedingt aber, dass einerseits die Nachfrage räumlich und zeitlich disaggregiert beschrieben wird und einzelne Personenfahrten in der Verkehrssimulation nachverfolgbar sind. Ein aktivitäts- und agentenbasiertes Verkehrsmodell erfüllt beide Voraussetzungen.

Es wird davon ausgegangen, dass durch den Einsatz selbstfahrender Fahrzeuge aufgrund von kürzeren Fahrzeugfolgezeiten die Strassenkapazität ansteigt. Während einer Transitionsperiode werden konventionelle und selbstfahrende Fahrzeuge koexistieren. Während dieser Zeit ist der Kapazitätsgewinn abhängig vom Anteil selbstfahrender Fahrzeuge, die zu einem bestimmten Zeitpunkt einen bestimmten Streckenabschnitt befahren. Solche Effekte können aber nur mit einer agenten-basierten Verkehrssimulation abgebildet werden.

Der geringere Bedarf lateraler Bewegungsfreiheit kann zudem dazu führen, dass auf mehrspurigen Strassen eine zusätzliche Fahrspur vorgesehen werden kann, ohne dass die Strasse verbreitert werden muss. Solche Effekte können aber sowohl mit Umlegungsmodellen als auch agenten-basierter Verkehrssimulation erfasst werden.

3 Literatur

3.1 Aktivitätenbasierten Modelle in der Forschung

3.1.1 Entwicklungsgeschichte

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit kann die Entwicklungsgeschichte der aktivitätenbasierten Modellansätze nur in verkürzter Form beschrieben werden. LeserInnen, die tiefergehende Informationen dazu bedürfen, seien auf folgende Quellen verwiesen: Kapitel 6 in Buch von Boyce & Williams (2016) und der Artikel von Rasouli & Timmermans (2013) in der Zeitschrift *International Journal of Urban Sciences*.

Seit den 1970er Jahren sprachen sich immer mehr Wissenschaftler aus den Bereichen Geographie, Stadtplanung und Regionalwissenschaften für die Entwicklung von Verhaltensmodellen, die die aggregierten räumlichen Interaktionsmodelle ersetzen sollten, die seit den 1950er Jahren in der akademischen und angewandten Forschung dominieren.

Chapin argumentierte in zahlreichen Aufsätzen (Chapin, 1968, 1974; Chapin & Hightower, 1966), dass Bewegungen zwar die Schlüsselkomponente der Verkehrsplanung sind, aber Aktivitäten für die Raumordnung von grundlegender Bedeutung sind und das Bindeglied zwischen Stadt und Menschen darstellen. Die Untersuchung von Aktivitätsmustern, die in Zeit und Raum wiederholt werden, kann letztendlich zu besseren theoretischen Erklärungen für Wissenschaftler und verbesserten Werkzeugen für Planer führen.

Hägerstrand (1970) betonte die Notwendigkeit, das individuelle Verhalten im Gegensatz zum damals in den Regionalwissenschaften, Geographie und Stadtplanung vorherrschenden Fokus auf aggregierte Beziehungen zu berücksichtigen.

Basierend auf diesen Ideen entwickelten Jones, Dix, Clarke, & Heggie (1983) der Aktivitätsketten und Tagesplänen. Ihr Ausgangspunkt war, dass die verschiedenen physiologischen, psychologischen, wirtschaftlichen und sozialen Rollen und Bedürfnisse verschiedener Haushaltsmitglieder zu einer Reihe von Aktivitäten führen, die die Haushalte den ganzen Tag über planen. Da nicht alle Aktivitäten gleich wichtig sind, wurde zwischen obligatorischen und freien (*discretionary*) Aktivitäten unterschieden und argumentiert, dass die täglichen Abläufe eines Haushalts tendenziell auf den obligatorischen Aktivitäten seiner Mitglieder aufbauen.

3.1.2 Modellansätze

Populationssynthese

Aktivitätsbasierte Modellansätze erfordern eine vollständige Liste von Agenten mit detaillierten demographischen und sozioökonomischen Informationen. Darauf basierend wird in den nachfolgenden Modellschritten die Verkehrsnachfrage für die gesamte Population generiert.

Solche Bevölkerungsdaten sind aber in der Regel nicht verfügbar oder zumindest nicht zugänglich. Zudem muss es auch möglich sein, solche Listen für Prognosezustände zu generieren. Daher wurden verschiedene Verfahren entwickelt, die es erlauben aufgrund einer Stichprobe mit detaillierten soziodemographischen Informationen auf Personen- und Haushaltsebene sowie gebietsspezifischen Randsummen synthetische Populationen zu generieren.

Die erste solche Anwendung im Bereich der Verkehrsmodellierung wurde im Rahmen des TRANSIMS Projekt realisiert. Mittels *iterative proportional fitting* (IPF) wurde dabei aufgrund einer Stichprobe mit disaggregierten Bevölkerungsdaten passend auf öffentlich verfügbare, aggregierte Bevölkerungsdaten eine synthetische Bevölkerung generiert (Beckman et al., 1996). Guo & Bhat (2007) stellten ein verbessertes IPF-Verfahren vor,

welches erlaubte Attribute sowohl auf Personen- als auch auf Haushaltsebene zu berücksichtigen und dabei die entsprechenden Korrelationsstrukturen zu bewahren. Dieser Ansatz wurde in der Folge weiterentwickelt und zu hierarchischen, mehrstufigen IPF-Verfahren erweitert (Casati et al., 2015).

Ein Problem der IPF-basierten Ansätzen ist, dass die synthetische Population durch pure Replikation der zur Verfügung stehenden Einzeldaten generiert wird. Je nach Umfang der zur Verfügung stehenden Einzeldaten ist die synthetische Population daher bezüglich der Variabilität der vorhandenen Personenprofile eingeschränkt. Um dieses Problem anzugehen, haben (Farooq et al., 2013) gezeigt, wie diskrete Entscheidungsmodelle verwendet werden können, um die Korrelationsstruktur von Personenattributen in statistischen Modellen zu beschreiben und anschliessend mit Hilfe von Markov-Ketten als Datenerzeugungsmodell ein statistisch heterogeneres Datensample zu generieren. (Sun & Erath, 2015) verbesserten diesen Ansatz indem mehrere sequentiellen Entscheidungsmodellen aufgrund der Einzeldaten ein Bayesian Netzwerk trainiert wird, welches aufgrund einer gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsverteilung die probabilistischen Beziehungen zwischen den verschiedenen soziodemographischen Variablen abbildet und dabei auch die hierarchische Struktur von Personen und Haushalten berücksichtigt.

Verkehrsnachfrage

In ihrer Literaturanalyse zur Entwicklung aktivitätsbasierter Modelle identifizieren (Rasouli & Timmermans, 2014) drei Ansätzen, die bei der aktivitätsbasierten Verkehrsmodellierung verfolgt werden: Randbedingungs-basierte Modelle, Nutzenmaximierung, und sogenannte *computational process* Modelle.

Randbedingungs-basierte (*constraint-based*) Modelle zielen nicht direkt darauf ab, individuelle und haushaltsspezifische Aktivitätsreisemuster vorherzusagen, sondern vielmehr zu prüfen, ob eine bestimmte Aktivitätsagenda in einem spezifischen Raum-Zeit-Kontext machbar ist. Der Raum-Zeit-Kontext definiert sich in Bezug auf Orte, ihre Attribute, verfügbare Verkehrsmittel und Reisezeiten zwischen den Standorten verschiedener Aktivitäten. Die ersten randbedingungs-basierten Modelle wurde in den 70er und 80er Jahre entwickelt (Jones et al., 1983; Lenntorp, 1976) und legten die Basis für das Konzept eines Verhaltensmodells bei dem jeweils geprüft wird, ob die Aktivitätspläne aufgrund neuer Randbedingungen noch immer eingehalten werden können oder eine Anpassung nötig respektive opportun ist. Über die Jahre verbesserte sich aufgrund immer höher aufgelöster Daten und grösserer Rechenkapazität die räumliche und zeitliche Auflösung der Modelle (Kwan & Hong, 1998). Die letzten Entwicklungen im Bereich der randbedingungs-basierten Modelle betreffen die Bemühung die Aktivitätspläne mehrere Haushaltsmitglieder zeitlich und räumlich aufeinander abzustimmen (Soo et al., 2009), zusätzlich auch Erreichbarkeiten (Liao et al., 2013) sowie tageszeitabhängige Reisezeiten (Chen et al., 2013) bei der Modellierung zu berücksichtigen.

Die Grundidee der nutzenmaximierenden Modellansätze ist, dass Personen Aktivitäten aufgrund des dadurch erzielbaren Nutzens durchführen, dafür aber Wege zurücklegen müssen, die Kosten verursachen. Für die ersten solcher Modelle wurden Logit-Modell formuliert, um damit die Wahrscheinlichkeit vorherzusagen, dass eine Person sich für einen bestimmten Aktivitätsplan entscheidet (Adler & Ben-Akiva, 1979). Als Weiterentwicklung etablierten sich später komplexere Aktivitätsplanmodell die auf einem *nested logit* Ansatz basieren (Ben-Akiva & Bowman, 1998; Bowman, 1998). Dabei wird in einer geschachtelten Modellarchitektur beschrieben, ob eine Person eine oder mehrere ausser Haus Aktivitäten durchführt, wann und wo die Hauptaktivität stattfindet, mit welchem Verkehrsmittel diese Aktivität erreicht wird, ob und wo weitere Aktivitäten stattfinden und wie diese erreicht werden. Die daraus resultierenden Modelle erlauben es synthetische Aktivitätspläne zu generieren.

Im Gegensatz zu den randbedingungs-basierten Ansätzen, fanden die nutzenbasierten Ansätze rasch Anwendungen in der Planungspraxis. Dabei wurde in der Regel aufgrund der aktivitätenbasierten Modelle die Verkehrsnachfrage simuliert und dann zu Quell-/Zielmatrizen für die Umlegung mit dafür geeigneten, kommerziell verfügbaren Softwarepaketen

aggregiert. Bowman (2009a) gibt einen guten Überblick über die ersten Einsätze von nutzenmaximierenden Modellansätzen in der Praxis in den USA.

Das Portland Metro Modell (Bowman et al., 1999) war das erste derartige Modell, das in der Planungspraxis zur Anwendung kam. In der Folge wurde mit dem San Francisco County Model mit der gleichen Modellarchitektur entwickelt, zusätzlich auch kalibriert und für Planungsstudien eingesetzt. Für das Sacramento Modell (Bowman et al., 2006) wurde erstmalig ein aktivitätenbasiertes Modell auf räumlicher Ebene der Parzelle spezifiziert. Weitere Modellimplementationen über den Zeitraum 2001 bis 2009 für die Regionen Sacramento, Lake Tahoe, Oregon, Atlanta, Denver, San Francisco Bay und Seattle (Bowman 2009a) zeigen eindrücklich, dass sich der Modellansatz nach der Jahrtausendwende in der US-amerikanischen Praxis angekommen ist.

Gleichzeitig wurden auch die nutzenmaximierenden Modellansätze in der Forschung weiterentwickelt. So kombiniert das Modellsystem CEMDEP (Bhat et al., 2004) 30 ökonometrische Modelle verschiedener Ansätze (u.a. Logit, Regression, *ordered probit*) als Teil eines Simulationssystems, das Aktivitätspläne unter Berücksichtigung der Landnutzung, soziodemographischer Variablen und dem Verkehrsangebot generiert. Dieser Modellansatz fand später auch Verwendung im Rahmen des SimAGENT Modells (Goulias et al., 2011), das für die Modellierung des Treibstoffverbrauchs und Schadstoffemissionen entwickelt wurde.

Während die nutzenmaximierenden Modelle in der Planungspraxis relativ schnell zur Anwendung gekommen sind, wurde und wird in der Wissenschaft die strikte und zu einem gewissen Grad unrealistische Annahme eines nutzungsmaximierenden Verhaltens hinterfragt. Als Alternative wurde in der Wissenschaft an regelbasierten Modellansätzen geforscht. Diese Modelle wurden als daten-getriebenen, rechnergestützten Prozessmodellen (computational process model) formuliert, die den zugrundeliegenden Entscheidungsprozess nachahmen.

Gärling et al. (1989) leisteten hier mit der Entwicklung von SCHEDULER Pionierarbeit. Dieses Modellkonzept wurde daraufhin ausgerichtet, um den Prozess zu verstehen, mit dem Einzelpersonen ihre täglichen Aktivitäten organisieren. Dabei wird davon ausgegangen, dass Einzelpersonen und Haushalte Aktivitäten zur Erreichung bestimmter Ziele durchführen. Präferenzen bestimmen die Wahl der Teilnahme an Aktivitäten, zusammen mit früheren Verpflichtungen und Einschränkungen. Diese Aktivitäten müssen interaktiv mit anderen (Haushalts-)Personen geplant werden, um zu entscheiden, wer wann, wo, wie lange und wie lange an den Aktivitäten teilnimmt und wie man zwischen den Orten reist, an denen die Aktivitäten durchgeführt werden können. Zwar wurde der Modellansatz in der Folge konzeptionell weiterverfeinert (Gärling et al., 1999), es jedoch wurde nie eine vollständig funktionsfähige Version implementiert entwickelt.

Der Ansatz inspirierte aber weitere Forschende basierend auf rechnergestützten Prozessmodellen Software zu entwickeln, welche es erlaubt aktivitätsbasierte Verkehrsnachfragedaten zu generieren. Dabei gilt Albatross (Arentze et al., 2000; Arentze & Timmermans, 2004) als das umfassendste Modell. Das regelbasierte System beschreibt für die Erwachsenen eines Haushalts, welche Aktivitäten wo, wann, wie lange, mit wem und dem betreffenden Verkehrsmittel durchgeführt werden, unter Berücksichtigung einer Reihe von haushalts-spezifischen, räumlich-zeitlichen und institutionellen Einschränkungen. In der Folge wurde das Albatross-Modellsystem verbessert und so erweitert, dass damit auch die gesamten Daten des nationalen niederländischen Wegtagebuchbefragung verwendet werden kann (Timmermans & Arentze, 2011).

Ein methodischer Nachteil von Albatross ist, dass der Prozess wie Aktivitäten geplant werden auf bestimmten Annahmen beruhen. Andere rechnergestützten Prozessmodelle hingegen generieren Aktivitätspläne aufgrund empirischer Verteilungsfunktionen. Tasha (Miller & Roorda, 2003) ist ein Modell das einen solchen Ansatz verfolgt und dabei auch verschiedene Planungshorizonte berücksichtigt. Dabei beschreibt das Modell, dass gewisse Aktivitäten früher geplant werden als andere und beim Generieren der Aktivitätsketten daher eine höhere Priorität haben. ADAPTS (Auld & Mohammadian, 2012, 2009) ist ein weiteres, methodisch ähnlich gelagertes Modell wobei hier einige Entscheidungsregeln

durch ökonometrische Modellansätze ersetzt wurden, beispielsweise für die Zielwahl von Aktivitäten.

Im deutschsprachigen Raum wurde am Karlsruher Institut für Technologie mit mobiTopp ein weiteres aktivitäten-basiertes Nachfragemodell entwickelt (Mallig et al., 2013). In der Grundversion basiert die Nachfragemodellierung stark auf sampling-basierten Ansätzen. Für die Generierung der synthetischen Population werden Haushalte und Personen direkt aus den Daten der Wegtagebuchbefragungen verwendet und dabei auch gleich die Aktivitätsketten, sowie der Besitz von Mobilitätswerkzeugen mitgesampelt. Verhaltensmodelle werden hingegen für die Zielwahl und Verkehrsmittelwahl verwendet wofür Reisezeitmatrizen eines klassischen Verkehrsumlegungsmodells verwendet werden, wobei auch eine Rückkopplung vorgesehen ist.

Integration von Nachfrage und Angebot

Dynamische Umlegungsmodelle und agentenbasierte Verkehrssimulationsmodelle bieten im Gegensatz zu statischen Umlegungsmodellen die Möglichkeit, das Zusammenspiel von Nachfrage und Angebot dynamisch abzubilden. Die Hauptvorteile dieser Ansätze liegen einerseits darin, dass damit der Verkehrsfluss realitätsnäher beschrieben werden kann und somit auch Phänomene wie die Fortpflanzung von Rückstaus bei Engstellen stromaufwärts abgebildet werden können. Andererseits werden auslastungsabhängige Nutzungskosten dynamisch abgebildet und nicht über einen gewissen Zeitraum gemittelt, wie das bei aggregierten Modellansätzen der Fall ist. Somit kann die Wirkung von Verkehrsbeeinflussungsmassnahmen (z.B. Rampenbewirtschaftung zu gewissen Tageszeiten) im Modell abgebildet werden.

Agentenbasierte Verkehrssimulationsmodelle bieten darüber hinaus auch die Möglichkeit, dass beim Routing spezifische Informationen wie Daten zur Soziodemographie oder zum Wegzweck berücksichtigt werden können. Somit ist es zum Beispiel möglich bei Mobility Pricing Szenarien den Einfluss des Einkommens oder des Besetzungsgrad auf die Routenwahl und entstehenden Kosten zu modellieren.

Wie in Abb. 19 dargestellt, umfasst die Integration von Nachfrage und Angebot je nach Modellansatz in einem einzigen Teilmodell die Routenwahl (dynamische Umlegung, Transims) oder auch die Verkehrsmittelwahl und Wahl der Abfahrtszeit (MATSim). Bei allen Modellen ist aber je nach Anwendung auch eine weitere Rückkopplung zur Nachfragemodellierung vorzusehen, um sicherzustellen, dass auch der Mobilitätswerkzeugbesitz und die Anzahl, Art und Ziele der Aktivitäten aufgrund des Verkehrsangebots beeinflusst wird.

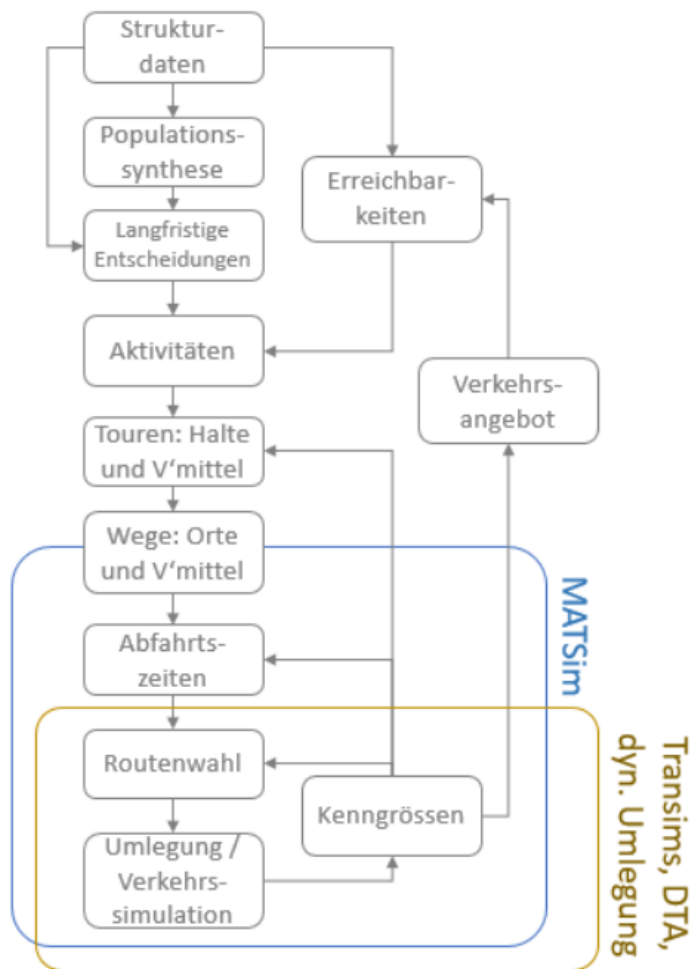


Abb. 19 Allgemeine Datenstrukturen von aggregierten und aktivitätenbasierten Verkehrsmodellen

Dynamische Umlegung

Der Bericht von Castiglione et al. (2014) fasst die Erfahrung von vier Projekten zusammen für die aktivitätenbasierte Nachfragemodelle zusammen mit dynamischen Umlegungsmodellen verwendet wurden. Im Rahmen des Strategic Highway Research Programms wurden aktivitätsbasierte Nachfragemodelle einerseits mit TRANSIMS und andererseits mit Dynus-T²⁵ (Dynamische Umlegung auf Strassennetz) und Fasttrips²⁶ (Dynamische Umlegung im ÖV) gekoppelt.

Da die aktivitätenbasierten Nachfragemodelle eine andere zeitliche Auflösung aufweisen (in diesen Fallstudien 30 Min) als die dynamische Umlegung (hier eine Sekunde) mussten zunächst Routinen geschrieben werden, um die Nachfrage zeitlich gemäss den Anforderungen der dynamischen Umlegung zu verteilen. Umgekehrt werden die Kenngrössenmatrizen als Resultate der dynamischen Umlegung für Zeitperioden von 30 Minuten aggregiert, damit diese mit dem aktivitätenbasierten Nachfragemodell rückgekoppelt werden können. Aufgrund der Rechenintensität wurde die Anzahl der Iterationsläufe im Voraus festgelegt und befolgt nicht ein bestimmtes Konvergenzkriterium.

Als Hauptvorteile wurden die zeitlich detailliertere Auflösung der Reisezeitmatrizen sowie die verbesserte Abbildung von Verkehrsüberlastungszuständen ausgemacht. Gleichzeitig

²⁵ <http://dynust.net/>

²⁶ <http://bayareametro.github.io/fast-trips/>

wurde klar, dass die Kalibration der dynamischen Umlegung sehr aufwendig ist, nicht zuletzt wegen der langen Rechenzeiten und der Tatsache, dass die Kopplung von Nachfragemodell und dynamischer Umlegung nicht vollautomatisiert umgesetzt werden konnte. sehr sensibel auf Änderungen der Netzwerkbeschreibung. Es wurde auch festgestellt, dass es weiterer Arbeiten und Erkenntnissen bezüglich der stochastischen Prozesse bedarf, um jeweils sicherstellen zu können, dass ein Konvergenz-Zustand erreicht wurde.

Agentenbasierte Mikrosimulation

In der Forschung haben sich historisch zwei Lager gebildet: das eine Lager hat sich auf die verhaltensorientierte Modellierung der Verkehrsnachfrage konzentriert, das andere auf agentenbasierte Simulation. Bei der Simulation haben sich über die Jahre zwei Open Source Softwares etabliert: TRANSIMS und MATSim.

TRANSIMS

Die Entwicklung von TRANSIMS (FHWA, 2013) startete in den 90er Jahren am Los Alamos National Laboratory und umfasst neben Modellen zur Nachfragegenerierung (synthetische Population, Aktivitäten und Zielwahl) vor allem einen neuen Ansatz zur Simulation der Verkehrsnachfrage auf dem Strassen- und ÖV-Netz. Dieser umfasst ein Fahrzeugfolgmodell das auf dem Prinzip eines zellulären Automaten basiert und dabei auch verschiedene Fahrspuren berücksichtigt. Aufgrund dieser Eigenschaft muss der Zustand alle Fahrzeuge im Simulationsintervall von 1 Sekunde aktualisiert werden, was eine hohe Rechenintensität nach sich zieht. Die Rückkopplung zum Nachfragemodell erfolgt über Feedbackschleifen wobei jeweils für einen bestimmten Teil der synthetischen Population Anpassungen bezüglich des Aktivitätsplan sowie der Verkehrsmittel- und der Routenwahl gemacht werden. Aufgrund der hohen Rechenzeit, insbesondere bei grossen Szenarien konnte sich TRANSIMS aber langfristig nicht durchsetzen und wird heute weder in Forschung noch Praxis wirklich benutzt.

MATSim

MATSim (Horni et al., 2016) ähnelt TRANSIMS bezüglich der übergeordneten Modellarchitektur, beschränkt sich primär aber auf die Simulation einer ausserhalb der Software generierten aktivitätenbasierten Verkehrsnachfrage. Dies hat zur Folge, dass die Rückkopplung «nur» Anpassungen bezüglich der Wahl der Reisezeit, des Verkehrsmittels sowie Routen umfasst, aber die Anzahl, Abfolge und Ziele der Aktivitäten nicht verändert wird. Zwar wurden in der Vergangenheit immer wieder Versuche solche Entscheidungsdimensionen ebenfalls als Teil der Rückkopplung zu berücksichtigen (Horni, 2013; Meister et al., 2006), da dadurch aber jeweils die Rechenintensität deutlich angestiegen ist und die Resultate nicht immer befriedigend waren, beschränkt sich die heutige Anwendungspraxis auf die drei oben genannten Verhaltensdimensionen. Anders als bei TRANSIMS erfolgt die Verkehrssimulation als Warteschlangenmodell mit vergleichsweise geringerer Rechenintensität.

Die Entwicklung von MATSim startete um 2004 an der ETH in Zürich (Raney & Nagel, 2004) und wurde in der Folge an der TU Berlin und weiteren Universitäten vorangetrieben. Dabei wurden immer wieder neue Funktionalitäten hinzugefügt, die explizit die Vorteile eines aktivitäts- und agentenbasierten Simulationsmodell sich zu Nutze machten. So erlaubt MATSim heute beispielsweise die Simulation von Flotten geteilter Fahrzeuge wobei die einzelnen Agenten die Verkehrsmittelwahlentscheide aufgrund des kontinuierlich simulierten, räumlich und zeitlich variablen Angebots an Fahrzeugen fällen (Balac et al., 2015). Dank weiteren Softwareentwicklungen ist heute auch die Simulation geteilter Flotten autonomer Taxis möglich, wobei auch hier die Wahl des Verkehrsmittels sich nach der zeitlich und räumlich differenzierten Angebotsqualität richtet und somit sensitiv auf die Grösse der Flotte und deren Einsatzgebiet reagiert (Hörl, 2017; Hörl, Becker, et al., 2018a).

Obwohl oder gerade weil sich die MATSim Entwickler stark auf die Erweiterung der Funktionalität respektive die Verbesserung der Performance konzentriert haben, wurden der Definition von Verhaltensmodellen und der Generierung der aktivitätsbasierten Nachfrage

relativ wenig Aufmerksamkeit geschenkt. So gibt es zum Beispiel erst seit kurzem Bestrebungen die Verkehrsmittelwahl basierend auf Entscheidungsmodellen umzusetzen, welche zuvor nur über eine Bewertung der ganzen Tagespläne erfolgt ist (Hörl, Balac, et al., 2018).

Aufgrund der Ausrichtung der Forschungsprojekte wurde in der Vergangenheit der Vorteil des integrierten, agenten-basierten Modellansatzes bezüglich der möglichen Differenzierung der Verhaltensmodelle und Analyse der Resultate nach soziodemographischen Merkmalen auch wenig umgesetzt. Ebenso wurde die aktivitätsbasierte Nachfrage oft nur durch einfaches kopieren von passenden Aktivitätsketten einer Verkehrstagebuchbefragung generiert.

Bei neuen, praxisorientierten Anwendungen von MATSim kommen nun auch nutzenmaximierende Nachfragemodelle zum Einsatz (siehe Abschnitt 3.2). Zusätzlich wird dabei beim Scoring der Pläne nun auch nach soziodemographischen Variablen unterschieden, um den Einfluss der Mobilitätswerkzeuge auf die Verkehrsmittelwahl abzubilden (Scherr, Manser, et al., 2019).

Die Kalibrierung von MATSim-Modellen auf Zählwerte stellt eine Herausforderung dar, der sich die Forschung bisher nur in beschränktem Rahmen angenommen hat. Einerseits reagieren das Warteschlangenmodell sehr sensitiv auf die (möglicherweise fehlerhafte) Attribuierung des Strassennetzes, andererseits gibt es bisher wenige Grundlagen zum Entscheidungsverhalten bei der tourbasierten Verkehrsmittelwahl. Um die Nachfrage bezüglich vorliegender Zählwerten anzupassen bestehen Kalibrierungsmethoden Optyds und Cadyts (Flötteröd, 2017). Cadyts modifiziert die MATSim Pläne in einer Weise, dass die Zählwerte möglichst gut getroffen werden. Im Gegensatz dazu werden in Optyds definierte Verhaltensparameter innerhalb einer gewissen Bandbreite angepasst, um die Zählwerte zu treffen, dies erlaubt dann auch eine vollständigere Prognose- resp. Szenarienberechnung.

3.2 Stand der aktivitätenbasierten Modelle in der Praxis

3.2.1 USA

Zum Stand und den bei der praktischen Verwendung von aktivitätenbasierten Verkehrsmodellen in den USA gemachten Erfahrungen wurden von Bundesbehörden in der Vergangenheit verschiedene Berichte in Auftrag gegeben (Castiglione et al., 2015; Donnelly et al., 2010), die auch wichtige Erkenntnisse über die Erfolgsfaktoren bezüglich der Projektorganisation und der praktischen Umsetzung beschreiben. In den folgenden Abschnitten werden nur die wichtigsten Eckpunkte der Entwicklungsgeschichte sowie die wichtigsten dabei gemachten Erfahrungen dargestellt. Für vertiefte Information zu diesen Themen wird jedoch die Lektüre der öffentlich verfügbaren Projektberichte empfohlen.

Portland

Das Portland Metro Modell (Bowman et al., 1999) gilt als das erste aktivitätenbasierte Verkehrsnachfragemodell das in der Praxis implementiert wurde. Es basierte auf den Forschungsarbeiten am MIT und verwendete einen auf einen nutzenmaximierenden Modellansatz um ganztägige Aktivitätsketten zu generieren. Aufgrund der daraus abgeleitete MIV- und ÖV-Nachfrage wurden mit statischen Umlegungsmodellen die Verkehrsnetze belastet. Die Rückkopplung zum Nachfragemodell ist durch die Berücksichtigung aufgrund der resultierenden Netzbelastungen aktualisierten Kenngrößenmatrizen gewährleistet.

Während sich die Resultate bezüglich der Sensitivitäten der Verhaltensmodelle als sehr zufriedenstellend herausgestellt hatte, stellte sich aber die Kalibration aufgrund der langen Rechenzeiten als herausfordernd dar. Aufgrund mangelnder Folgefinanzierung konnte das Modell aber nicht weiterverfolgt und -entwickelt werden.

San Francisco

Das Modell San Francisco County wurde vom gleichen Team entwickelt wie das Portland Metro Modell und verwendete dabei das gleiche Grunddesign. Das Modell wurde 2001 in Betrieb genommen, in dutzenden praktischen Anwendungen eingesetzt und fortlaufende erweitert. So wurden beispielsweise Funktionalitäten für die Modellierung von Road Pricing ergänzt und der Modellperimeter erweitert.

Die Entwicklung des Modelles erfolgte in mehreren Phasen. So wurde zum Beispiel in einer ersten Phase nur ein Teil des gesamten Modellgebiets gemäss dem aktivitätenbasierten Ansatz modelliert, was den Aufwand für die Kalibration und Validierung in einem machbaren Rahmen hielt. Ebenso wurde in der ersten Entwicklungsphase, die 2 Jahre dauerte, auf die Abbildung von Abhängigkeiten innerhalb eines Haushaltes verzichtet, um die Nachfragegenerierung nicht zu komplex zu gestalten.

In der Folge wurde die Funktionalität des Modells für die jeweils aktuell anliegenden Fragestellungen Schritt für Schritt erweitert, beispielsweise um zeitabhängige Strassengebühren abbilden zu können. Dazu wurde das bestehende Zeitwahlmodell mit einem kombinierten, tour-basierten Verkehrsmittel- und Tageszeitwahlmodell ergänzt, welches die Verwendung von personenspezifischen Variablen erlaubt.

Im Einsatz an praktischen Anwendungen zeigte sich, dass das Modell für verschiedene Fragestellungen jeweils vernünftige Resultate generierte. Die Modellierer stellte auch fest, dass die Modellergebnisse innerhalb der Planungsbehörden und im Austausch mit der Öffentlichkeit einfach zu kommunizieren waren. Dies hatte unter anderem damit zu tun, dass sich solche Diskussionen immer weniger um Verkehrsmengen auf Autobahnen, sondern mehr um die Wirkung von finanziellen Anreizen, Verkehrsberuhigung und Verbesserung des öffentlichen Verkehrs drehten.

Rückblickend wurde festgestellt, dass es für den Erfolg des Modells wichtig war auf Seite des Modellbetreibers eine Person zu haben, welche das Modell im Detail kannte und eigenständig für planerische Fragestellungen einsetzen konnte. So konnte das Modell innerhalb der Behörde gut etabliert werden.

In den letzten Jahren wurde das Modell kontinuierlich weiterentwickelt. So konnte beispielsweise das Velo als zusätzliches Verkehrsmittel hinzugefügt werden, wobei die Verhaltensmodelle auch streckenspezifische Informationen wie z.B. die gefühlte Sicherheit und Steigungen berücksichtigten (Zorn et al., 2012). Im Rahmen des Projekts «DTA Anyway» wurde für ein Teilgebiet das Umlegungsmodell durch eine dynamische Umlegung ersetzt. Dazu musste unter anderem auch die Nachfrage in feinere Zeitscheiben unterteilt werden. Es zeigte sich, dass das Modell sehr sensitiv auf die Parametrisierung des DTA reagierte und aufgrund der strikteren Kapazitätsgrenzen im Vergleich zur statischen Umlegung weitere Umfahrungseffekte verzeichnet wurden (Parsons Brinkerhoff & San Francisco County Transportation Authority, 2012).

Sacramento

Um die verkehrliche Wirkung neuer Planungsansätze wie gemischt-genutzte Entwicklungsgebiete, einen besseren Öffentlichen Verkehr und zeitabhängige Strassennutzungsgebühren abbilden zu können, beschloss das Sacramento Area Council Of Governments ein aktivitätenbasierten Verkehrsnachfragemodell zu entwickeln.

Mit der Modellentwicklung wurden dieselben Berater beauftragt, die bereits das aktivitätenbasierte Modell für San Francisco entwickelt haben. Da die Strukturen der Modelle sich sehr gleichen, konnte SACSIM innerhalb von zwei Jahren implementiert und 2007 in Betrieb genommen werden (Bradley et al., 2010). Bezüglich Modellinnovationen war man bewusst zurückhaltend und beschränkte sich primär darauf eine deutlich feinere räumliche Auflösung zu berücksichtigen, da diese für Analyse der Wirkung dichter und gemischt genutzter Entwicklungsgebiete als wichtig erachtet wurde. Dank dem Modell konnten alle Wege von Personen mit Wohn- oder Arbeitsort in neuen Entwicklungsgebieten separat analysiert werden und dabei gezeigt werden, dass für diese Gebiete unterdurchschnittliche MIV-Fahrleistungen erwartet werden.

Die Möglichkeit solcher Analysen war insbesondere für die Immobilienbranche von Nutzen, das so gezeigt werden konnte, dass Projekte zur inneren Verdichtung die Strassen weniger mit Neuverkehr belasten als bei der konventionellen Immobilienentwicklung in der Fläche.

New York

Eine der Hauptmotivationen der Entwickler des ersten aktivitätenbasierten Verkehrsmodells für die Region New York war, dass der Ansatz es erlaubt komplexe Verhaltensmodelle zu formulieren, welche Korrelationsstrukturen entlang der Dimensionen Einkommen, PW-Verfügbarkeit, Haushaltgrösse und gemeinsam durchgeführte Aktivitäten, Aktivitätstypen und Zeitpunkt der Aktivitäten abzubilden (Vovsha et al., 2002). Da die Verkehrsnachfrage auf Personen- und Haushaltsebene generiert wird und auch die Verkehrsmittelwahl auf dieser Ebene modelliert wird, können so *aggregation-bias*-Effekte vermieden werden.

Das dabei verwendete Nachfragemodell lässt sich in drei grobe Schritte unterteilen. Zunächst werden Anzahl und Art der Aktivitäten festgelegt. Für das Zielwahlmodell im zweiten Schritt wurden neben den Kenngrössenmatrizen auch Variablen zum Einkommen und zur Verfügbarkeit von Mobilitätswerkzeugen verwendet. Somit konnte zum Beispiel abgebildet werden, dass Personen mit geringem Einkommen in Schnitt weniger lange Arbeitswege aufweisen. Das Verkehrsmittelwahlmodell im dritten Schritt berücksichtigt neben den verkehrsmittelspezifischen Kenngrössen auch den Mobilitätswerkzeugbesitz. Anschliessend erfolgt die Belastung der Verkehrsnetze mit konventionellen Umlegungsverfahren und Rückkopplung der Kenngrössenmatrizen für die Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodelle.

Weitere Modelle

Nachdem sich in der Praxis gezeigt hat, dass aktivitätenbasierte Modelle innerhalb nützlicher Frist und mit einem vernünftigen Budget realisiert, kalibriert und validiert werden können und diese bezüglich der Analysemöglichkeiten gegenüber aggregierten Modellen wesentliche Vorteile aufweisen, haben weitere Planungsbehörden in den USA die Entwicklung solcher Modelle in Auftrag gegeben. Heute stehen aktivitäten-basierte Modellansätze in weiteren Metropolregionen im Einsatz wie z.B. Seattle/Puget Sound (Puget Sound Regional Council, 2013/2019), San Francisco Bay Area (Erhardt et al., 2012), Denver (Denver Regional Council of Governments, 2019). Dies zeigt, dass aktivitätenbasierte Verkehrsnachfragemodelle in den USA heute eine *best practice* darstellen und die Implementierung von verschiedenen Firmen angeboten wird.

Diese Modelle haben gemeinsam, dass sie sich auf die Generierung der Verkehrsnachfrage beschränken. Die Verkehrsumlegung erfolgt jeweils mit anderen, kommerziellen Softwarepaketen. Der Softwarecode einiger der oben aufgelisteten Modelle ist als Open Source Software öffentlich verfügbar. Nachfolgende funktionale Ergänzungen durch weitere Institutionen ermöglichen auch, dass ähnliche Modellimplementierungen auf andere Regionen übertragen werden und dabei auf den bisherigen Entwicklungsstand aufbauen können.

Die Software von in Forschung und in der Praxis eingesetzten ABM-Modelle wurde in der Regel ad hoc von programmiererfahrenen Modellierern geschrieben, jedoch mit beschränktem Wissen über Softwarearchitektur für optimale Wartung und Erweiterbarkeit. Über die Jahre kamen einige Behörden, die aktivitätsbasierte Modelle betreiben, zur Ansicht, dass es dauerhaft sinnvoller wäre, eine gemeinsame Modellsoftware zu entwickeln. Daher schlossen sich 9 Behörden zusammen und organisierten das Projekt ActivitySim²⁷ (Association of Metropolitan Planning Organizations, 2019). Ziel des Projekts ist es eine fortschrittliche, Open-Source- Software zur aktivitätenbasierten Modellierung der Verkehrsnachfrage zu entwickeln und zu pflegen, die auf den bewährten Praktiken der Softwareentwicklung basiert und kostenlos öffentlich verfügbar ist.

²⁷ <https://activitiesim.github.io>

Derzeit ist das ActivitySim-Projekt in seiner fünften Phase und umfasst Funktionen wie Populationssynthese, Methoden zum Schätzen und anwenden komplexer Verhaltensmodelle, Berechnung von Erreichbarkeiten, effizienter Umgang mit grossen Kenngrössenmatrizen, Modelle zur Abstimmung des Reiseverhaltens innerhalb eines Haushalts und hierarchische Zonensysteme. Auch bei ActivitySim ist es so, dass die Berechnung der kürzesten Wege und die Umlegung mit anderen Softwarepaketen erfolgt.

3.2.2 Europa

mobiTopp

mobiTopp ist ein agenten- und aktivitätsbasiertes Verkehrsnachfragemodell, das am Institut für Verkehrswesen des KIT entwickelt wurde und für verschiedene Forschungsprojekte eingesetzt wird. mobiTopp unterscheidet zwischen einem sogenannten «Setup-Modul» und einem Simulationsmodul (Mallig et al., 2013).

Das Setup-Modul umfasst die gesamte Generierung der Verkehrsnachfrage. Dabei erfolgt die Populationssynthese sampling-basiert für 12 verschiedene Haushaltstypen, wobei diese nach Anzahl Personen und PW-Verfügbarkeit unterschieden werden. In einem weiteren Schritt wird die Population gemäss der für einzelnen Verkehrszonen vorliegenden Verteilungen zu Alter und Hauptbeschäftigung umgewichtet. Die Zuweisung des Mobilitätswerkzeugbesitzes und der Aktivitätsketten samt Informationen zur Distanz zum Arbeits- oder Ausbildungsort erfolgt per *Fingerprinting*, also aufgrund eines *Matchings* der soziodemographischen Attribute in der synthetischen Population und der Daten einer Verkehrstaugbuchbefragung.

Bei der Zielwahl wird zwischen fixierten und flexiblen Aktivitätsorten unterschieden. Während die Orte für Arbeits- und Ausbildungsaktivitäten zunächst aufgrund von Pendlermatrizen zugewiesen wurden, erlaubt eine Weiterentwicklung des Modells heute auch die kombinierte Ziel- und Verkehrsmittelwahl (Heilig et al., 2017). Flexible Aktivitätsorte werden im Rahmen des Simulationsmoduls aufgrund eines Gravitationsmodells festgelegt, welches die generalisierten Kosten von und zu den die Aktivität umgebenden fixen Aktivitätsorten berücksichtigt.

Neben der Zuweisung der flexiblen Aktivitätsorte umfasst das Simulationsmodul auch ein Verkehrsmittelwahlmodell. Dabei erfolgt die Verkehrsmittelwahl Tour-basiert. Während für den ersten Weg vom Wohnort noch alle Verkehrsmittel berücksichtigt werden, stehen für die weiteren Wege einer Aktivitätskette bis zur Rückkehr an den Wohnort die Verkehrsmittel Auto oder Velo nur dann zur Verfügung, wenn der erste Weg mit einem dieser Verkehrsmittel zurückgelegt wurde.

Die Routenwahl ist nicht Teil von mobiTopp und wird mit einem Umlegungsmodell umgesetzt. Dazu werden aus mobiTopp stundenfeine Nachfragematrizen ausgeschrieben und mit einer geeigneten Software auf das Verkehrsangebot umgelegt. Die resultierenden Reisezeitmatrizen werden wiederum in mobiTopp eingelesen und so eine Rückkopplung mit dem Simulationsmodul von mobiTopp gewährleistet.

mobitopp wurde bisher ausschliesslich für Forschungsanwendungen angewendet und dabei für Gebiet im Grossraum Stuttgart sowie Rhein-Neckar eingesetzt. Die Modellarchitektur bei der ein aktivitätenbasierten Nachfragemodell mit einem dynamischen Umlegungsmodell kombiniert wird folgt dabei den in der US-amerikanischen Planungspraxis umgesetzten Ansätzen. Aufgrund der stark sampling-basierten Implementierung beim Setup-Modul beschränkt sich die Sensitivität von mobiTopp allerdings auf die Zielwahl flexibler Aktivitätsorte sowie die Verkehrsmittel- und Routenwahl. Abfahrtszeiten, Mobilitätswerkzeugbesitz, Arbeits- und Ausbildungsorten sowie die Anzahl und Art durchgeführter Aktivitäten werden hingegen direkt aufgrund bestehender Daten zugewiesen und sind daher nicht massnahmensensitiv.

3.2.3 Schweiz

MATSim Schweiz

Für die Verwendung in Forschungsprojekten und Weiterentwicklung der MATSim Software werden am Institut für Verkehrsplanung und Transport Systeme (IVT) der ETH Zürich aktivitätsbasierten Nachfragemodelle entwickelt und nach Bedarf aktualisiert. Die Basis für das derzeit aktuelle, schweizweite Modell legten Bösch, Müller, & Ciari (2016). Die synthetische Population wurde direkt aus den Daten der Registererhebung der Schweizer Bevölkerung 2012 abgeleitet, welche grundlegende soziodemographische Charakteristiken auf Personen- und Haushalteben umfasst. Die Hochrechnung der Bevölkerung für das Jahr 2015 erfolgte durch *generalised raking* auf die für dieses Jahr vorliegenden Randsummen. Somit handelt es sich bei der für dieses Modelle verwendeten synthetischen Population, um eine Generalisierung von Registerdaten und keine generisch erzeugte Population wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben.

Weitere für die Modellierung relevante soziodemographische Attribute, welche nicht in der Registererhebung aufgeführt sind, wurden mittels *hot-deck statistical matching* der synthetischen Population hinzugefügt. Dabei werden in der synthetischen Population fehlende Attribute aufgrund von Beobachtungen in einem anderen Datensatz, hier der Mikrozensus Verkehr 2015, ergänzt. Basierend auf den in beiden Datensätzen vorhandenen Attributen wird ein Distanzmass berechnet und die fehlenden Attribute so zugeordnet, dass einerseits das Distanzmass minimiert wird und andererseits die multivariaten Verteilungen erhalten bleiben. Mit diesem Verfahren wurden verschiedene Attribute des Mobilitätswerkzeugbesitzes (Führerausweis, PW-Verfügbarkeit, ÖV-Abonnementsbesitz, Anz. Velos und Autos im Haushalt), Beschäftigungsstatus sowie Information zum Haushalteinkommen hinzugefügt.

Die Generierung der Nachfrage erfolgte ebenfalls per *hot-deck statistical matching* und umfasst die Zuweisung von Aktivitätsketten inkl. der Dauer von Aktivitäten, das für die initiale Nachfrage verwendete Verkehrsmittel sowie die Distanz zwischen dem Wohnort und dem Arbeitsort. Die Zuweisung des Arbeitsorts auf Ebene Gemeinde/Stadtteil erfolgte sampling-basiert aufgrund der BFS Strukturhebung 2010-2012. Die Zuweisung der Ausbildungsstandorte erfolgte regelbasiert: Für Kindergarten und Primarschule wird jeweils der zum Wohnort nächstgelegene Standort ausgesucht, für höher Schulen jeweils mehrere der nächstgelegenen Standorte ausgewählt und zufällig zugewiesen. Im Rahmen einer Modelerweiterung (Hörl, Becker, et al., 2018a) wurde ein sampling-basiertes Zielwahlmodell für die Wahl von Standorten für Einkauf-, Freizeit und weiteren Aktivitäten ergänzt. Dieses Verfahren wählt diese Standorte so aus, dass dabei die beobachteten Luft-Distanzverteilung differenziert nach Aktivitätstyp vor und nach der betreffenden Aktivität eingehalten werden.

Dieses Verfahren zur Generierung der synthetischen Population und der Verkehrsnachfrage ist darauf ausgerichtet, die in den verschiedenen Grundlagendaten vorhandenen Daten optimal miteinander zu kombinieren und somit die Verkehrsnachfrage für ein bestimmtes Jahr zu reproduzieren. Aufgrund der verschiedenen, sampling-basierten Ansätzen ist dabei aber die Prognosefähigkeit eingeschränkt. So können zum Beispiel Veränderungen der Bevölkerungsstruktur (demographischer Wandel) und der Verfügbarkeit von Mobilitätswerkzeugen (z.B. aufgrund Veränderung der Siedlungsstruktur) nur beschränkt abgebildet werden. Die Wirkung von Veränderungen des Verkehrsangebotes auf Mobilitätswerkzeuge und die Zielwahl ist mit der gegebenen Modellstruktur nicht möglich und kann daher nicht massnahmensensitiv erfolgen. Dazu müssten zusätzlich Modelle zum Mobilitätswerkzeugbesitz sowie zur Zielwahl definiert, geschätzt und implementiert werden.

Auf Basis der so erstellten, aktivitätsbasierten Nachfrage erfolgt die Wahl der Abfahrtszeiten, Verkehrsmittel und Routen innerhalb von MATSim. Dabei wird bezüglich der Abfahrtszeiten werden für jeden Aktivitätsplan jeweils mehrere mögliche typische Aktivitätsdauer vorgegeben. Somit wird einerseits genügend Freiraum für Anpassungen der Abfahrtszeiten gewährt, andererseits aber auch gewährleistet, dass die typischen Nachfrageganglinien bewahrt werden.

Die Bewertung verschiedener Reisezeitelemente erfolgt für alle Agenten gleich und basiert auf bestehenden Verkehrsmittelwahlmodellen. Es werden also keine Unterschiede bezüglich verschiedener verhaltenshomogener Gruppen gemacht. Die Kalibration erfolgte aufgrund eines Vergleichs der Verkehrsmittelwahlanteile über verschiedene Distanzgruppen durch Anpassung der alternativen-spezifischen Konstanten sowie weiterer Verhaltensparameter. Mit diesem Vorgehen konnte eine gute Übereinstimmung mit den Daten des MZMV 2015 erreicht werden, wobei aber aufgrund des zugrundeliegenden Modells keine Unterscheidung nach verschiedenen Personengruppen und Fahrzwecken gemacht wird (Hörl, Becker, et al., 2018a).

Der Code zur Erstellung des aktivitätenbasierten Verkehrsmodells MATSim Schweiz ist öffentlich verfügbar²⁸, allerdings sind nicht alle dabei verwendeten Daten als Open Data frei zugänglich. Zusätzlich ist bezüglich der Weiterverwendbarkeit zu beachten, dass das Modell primär für Forschungszwecke entwickelt wurde, wie zum Beispiel die Entwicklung von Algorithmen zur Simulation von autonomen Fahrzeugen. Obschon das Modell das bestehende Verkehrsverhalten angemessen reproduziert, ist zu beachten, dass weder eine detaillierte, z.B. nach Personengruppen differenzierte Kalibration vorgenommen wurde noch das Modell prognosefähig aufgesetzt wurde. Demgemäss erfüllt das Modell die Anforderungen bei Verwendung im Forschungsbereich zwar gut, eignet sich aber nicht für den Einsatz in der Planungspraxis.

ABVM Basel

Bei der Entwicklung von Verkehrsmodellen für Grenzregionen ergeben sich besondere Herausforderungen. Einerseits liegen die Grundlagendaten aufgrund verschiedener Erhebungsmethoden und Aktualisierungszyklen in verschiedenen Formaten, Detaillierung und Bezugsjahren vor. Andererseits ergeben sich aufgrund unterschiedlicher politischer Rahmenbedingungen und wirtschaftlicher Ausrichtung deutliche Unterschiede bezüglich des Verkehrsverhaltens sowie bei der Wahl des Arbeitsortes und bei der Zielwahl im Einkaufs- und Freizeitverkehr.

Im Rahmen einer Forschungszusammenarbeit zwischen den SBB, ETH Zürich und den Beratungsunternehmen ASE und Erveco wurde für die Dreilandregion Basel ein prognosefähiges, aktivitätenbasiertes Verkehrsmodell (ABVM Basel) entwickelt. Dieses Modell bildet die Basis für den Modellvergleich mit dem Gesamtverkehrsmodell Basel (GVM Region Basel), dem weg-basierten Verkehrsmodell, das derzeit in der Praxis für verkehrsplannerische Fragestellungen im Raum Basel eingesetzt wird. Während die technischen Details des ABVM Basel in Kapitel 5.2 beschrieben sind, wird hier auf die für die Verwendung in der Planungspraxis relevanten Modellinnovationen eingegangen.

Die synthetische Population des ABVM Basel basiert auf einem Bayesian Netzwerk Ansatz (Sun & Erath, 2015). Dabei wurde das für die Generierung des Populationspools verwendete Netzwerk mit Daten des MZMV 2015 und der speziell für den Trinationalen Eurodistrict Basel (TEB) durchgeführten Wegtagebuchbefragung trainiert. Dies erlaubte die Generierung einer repräsentativen synthetischen Population sowohl für den Ist-Zustand als auch für einen Prognosezustand. Für den Ist-Zustand wurden für jedes Land die aktuellsten Strukturdaten zusammengezogen und falls nötig räumlich auf Ebene Hektarraster (Kernzone) sowie Gemeinde (weitere Zonen) aufbereitet. Für den Prognosezustand wurden die auf Gemeinde- resp. Kantonsebene vorliegenden Bevölkerungsprognosen und Pläne der Siedlungsentwicklung mit einem IPF-Verfahren auf die einzelnen Hektarraster runtergebrochen. Die Generierung der Aktivitätenpläne erfolgte analog dem Verfahren von Bösch, Müller, & Ciari (2016) mittels *hot deck statistical matching*.

Eine weitere Modellinnovation wurden bei der Zielwahl von Arbeits- und Ausbildungsaktivitäten umgesetzt. Im Raum Basel stellt sich die Herausforderung, dass die grenzüberschreitenden Pendlerströme aufgrund der Verteilung der Arbeitsplätze und des Lohngefälles deutlich asymmetrisch sind. Dazu wurde ein bestehender Ansatz zur Berücksichtigung

²⁸ https://github.com/matsim-eth/baseline_scenario

von Kapazitätsbeschränkungen bei der Zielwahl (Vitins et al., 2016) so erweitert, dass damit auch Zielwerte bezüglich der grenzübergreifenden Pendelströmen miteinbezogen werden können. Dabei wird die räumliche Widerstandsfunktion um zusätzliche Parameter ergänzt, welche gemäss den beobachteten grenzüberschreitenden Strömen kalibriert werden und somit auch für Prognosemodelle eingesetzt werden können (Vitins & Erath, 2019). Das entwickelte Verfahren kann auch bei Kordonwiderständen und makroskopische Modell eingesetzt werden. Dies kann für Anwendungen bei geographischen oder politischen Grenzen interessieren, wo früher noch manuell kalibriert wurde. Die Zielwahl weiterer Aktivitäten (Einkauf, Freizeit, anderes) erfolgt ähnlich zum sampling-Verfahren von MATSim Schweiz, jedoch basierend auf den tatsächlich gerouteten Distanzen, um geographische Hindernisse und Netzeigenschaften besser abbilden zu können, in Basel zum Beispiel der Rhein mit den Rheinbrücken.

Die Simulation der aktivitätenbasierten Verkehrsnachfrage erfolgt mit MATSim, wobei das Strassennetz auf Open Street Map Daten und das Angebot im öffentlichen Verkehr auf öffentlich verfügbaren Fahrplandaten basiert. Die Kalibration der Parameter des Verkehrsmittelwahlmodells erfolgte separat für fünf verhaltenshomogene Gruppen, die aufgrund der Verfügbarkeit von Mobilitätswerkzeugen bestimmt wurden. Dabei zeigte sich, dass die je nach vorhandenem Mobilitätswerkzeug deutlich unterschiedlichen Kenngrössen des Modal-Split nach Distanzklasse gut vom Modell abgebildet werden können. Auf eine Kalibration nach verkehrszweck-spezifischen Parametern wurde jedoch verzichtet. Für die Wahl der Abfahrtszeit wurden Zeitfenster von 60 Minuten um die in der aktivitätenbasierten Verkehrsnachfrage definierten Aktivitätszeiten definiert. Somit wurde einerseits erreicht, dass die Nachfrage die beobachteten Ganglinien reproduziert. Andererseits können aufgrund dieser Modellform keine Anwendungsfälle simuliert werden, die Verhaltensreaktionen bezüglich der Abfahrtszeit bedingen, welche länger als 60 min variieren.

Synthetische Population des ARE

Eine synthetische Population bildet die Basis eines aktivitätenbasierten Verkehrsmodell und beschreibt als georeferenzierter Datensatz die Personen und Haushalte eines Untersuchungsgebiets bezüglich verschiedener demographischer und sozioökonomischer Attribute: z.B. Alter, Geschlecht, Bildungsstand, Nationalität, Einkommen und Verfügbarkeit von Mobilitätswerkzeugen (Personenwagen und ÖV-Abonnemente). Da in der Regel keine Daten verfügbar sind, die eine derart detaillierte Beschreibung der Bevölkerung umfasst, werden synthetische Populationen mit geeigneten statistischen Verfahren aufgrund von Stichproben und Randsummen generiert. In der Schweiz besteht eine gute Ausgangslage zur Erstellung einer synthetischen Population darin, dass das BFS eine georeferenzierte Datengrundlage der Personen und Haushalte (mit wenigen demographischen und sozioökonomischen Attributen) zur Verfügung stellt.

Für die Anwendung des agentenbasierten Flächennutzungsmodells FaLC sowie des aktivitätenbasierten Verkehrsmodells SIMBA MOBi der Schweizerischen Bundesbahnen wurde eine neue, schweizweite synthetische Population benötigt. Daher haben sich die beiden Organisationen zusammengetan, um eine für das Jahr 2017 repräsentative synthetische Population zu generieren (Bodenmann et al., 2019). Als Basis wurden verschiedene Originaldaten des Bundesamts für Statistik verwendet, welche geokodierte Personen, Haushalte und Arbeitsplätze inkl. der in diesen Datensätzen verfügbaren Attribute (Alter, Geschlecht, Haushaltgrösse, Anz. Arbeitsplätze und Vollzeitäquivalente) umfassen. Über Simulationsverfahren wurden weitere Informationen wie z.B. Ausbildungsstatus, Einkommen und Besitz von Mobilitätswerkzeugen angereichert. Durch gezieltes justieren der Parameter bei der Anwendung der Simulationsmodelle konnte erreicht werden, dass die synthetische Population verschiedene externe und für die Verkehrsmodellierung wichtige Vorgaben, z.B. zur Anzahl Personenwagen und ÖV-Abonnementen je Verkehrszone reproduziert werden.

Als Ergebnis liegt für die ganze Schweiz eine detaillierte synthetische Population vor. Aufgrund des direkten Aufbaus auf Originaldaten und der zahlreichen Anpassungen an externe Vorgaben ist diese synthetische Bevölkerung aber nur beschränkt prognosefähig. Daher bedarf es für die Prognose einer synthetischen Bevölkerung für zukünftige Zustände entweder die Entwicklung eines durchgehenden modellbasierten Ansatzes (z.B. (Farooq et al.,

2013; Sun & Erath, 2015) oder der Fortschreibung der vorhandenen synthetischen Population mit dem FaLC.

SIMBA MOBi

Unter dem Namen SIMBA MOBi hat die SBB ein aktivitätenbasiertes Nachfragemodell für die ganze Schweiz aufgebaut für die Simulation von multimodalen und intermodalen Simulationen von Verkehrskonzepten (Bützberger & Scherr, 2020). Die SBB verfolgt dabei das Ziel über ein Modell zu verfügen, das die gesamte Reisekette von Tür-zu-Tür abbildet und es erlaubt neue Fragestellungen und Geschäftsmodelle zu prüfen. Dabei können neben der demographischen Entwicklung und gesellschaftlichen Veränderungen auch die von neuen Verkehrsmitteln und technologischen Disruptionen ausgehenden Auswirkungen abgebildet werden.

SIMBA MOBi basiert auf der durch ARE und SBB erstellten synthetischen Population (Bodenmann et al., 2019) und umfasst zwei Modellkomponenten (siehe Abb. 20): MOBi.plans ist ein aktivitäts-basiertes, multimodales Verkehrsnachfragemodell. MOBi.Sim beschreibt das MATSim-basierte Simulationsmodell, welches das Verkehrsmittel-, Zeit- und Routenwahlverhalten abbildet. Die verschiedenen Modellkomponenten sind durch Rückkopplungen miteinander verbunden. So wird gewährleistet, dass die Wirkung von Anpassungen im Verkehrsangebot auf die Verfügbarkeit von Mobilitätswerkzeugen und die Zielwahl abgebildet werden kann (Scherr, Johsi, et al., 2019).

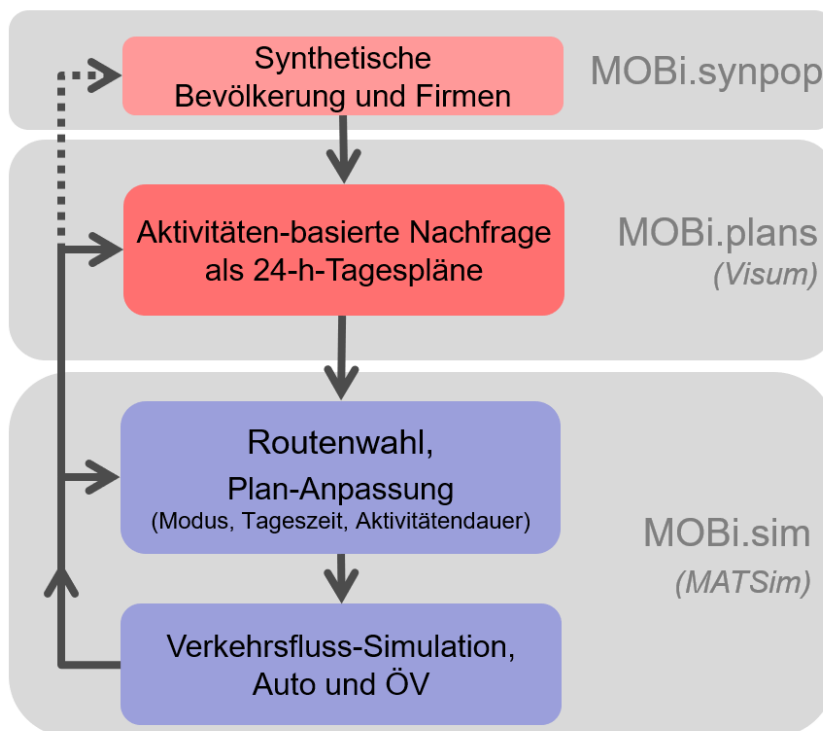


Abb. 20 Schematischer Ablauf der aktivitätenbasierten Nachfrageberechnung und multimodalen Verkehrssimulation in SIMBA MOBi, SBB (gestrichelte Rückkoppelung als langfristiges methodisches Ziel).

Das aktivitätenbasierte Modell MOBi.Plans modelliert für jede Person der synthetischen Bevölkerung aufgrund ihres Wohnorts, soziodemographischen Profils sowie des Verkehrsangebots und zonen-basierten Strukturdaten eine für einen Tag vollständige Aktivitätskette (Tagesplan). Die Grundlage dafür bilden Modelle zu den langfristigen Entscheidungen Mobilitätswerkzeugbesitz und Zielwahl von Arbeits- oder Ausbildungsaktivitäten. Darauf bauen

die Modelle auf, welche die Generierung der Tagespläne beschreiben: Anzahl Touren und Aktivitäten, Typ und Ziel der Aktivitäten, initiale Verkehrsmittelwahl, Startzeit und Dauer der Aktivitäten. Alle Teilmodelle wurden mit aktuellen Verhaltensdaten geschätzt und validiert. Mit Ausnahme des Modells zum Mobilitätswerkzeugbesitz (basierend auf (Danalet & Mathys, 2018)) wurden alle anderen Verhaltensmodell neu spezifiziert und einzeln validiert. Verschiedene Vergleiche zwischen den modellierten Resultaten mit Daten des Mikrozensus Verkehr 2015 und unabhängigen Zählwerten zeigen eine sehr gute Übereinstimmung ((Scherr et al., 2020).

Die aktivitätenbasierte Verkehrsnachfrage wird mit der Open Source Software MATSim simuliert. Das dabei verwendete Strassennetz basiert auf den Netzdaten des NPVM, wobei die Attribuierung aber für die Verwendung mit dem MATSim-typischen Warteschlagenmodell angepasst wurde. Für die Simulation des öffentlichen Verkehrs wurde die MATSim Software folgendermassen verbessert (M. Rieser et al., 2018; Scherr, Manser, et al., 2019):

- Der neue Router «SwissRailRaptor» ist nicht nur bezüglich Rechenzeiten und Speicherbedarf deutlich performanter als der bisherige Router, sondern bietet auch bezüglich der Nutzenfunktion der Routensuche eine bessere Funktionalität.
- Ein neue Simulationsengine (detPTSim) erlaubt, dass ÖV-Fahrzeuge strikt gemäss Fahrplan operieren.

Zudem wurden bei der Nutzenfunktion der Verkehrsmittelwahl Verbesserungen der Funktionalitäten umgesetzt. Diese erlauben einerseits, dass Zugangszeiten zum Fahrzeug in Abhängigkeit von räumlichen Variablen definiert werden können. Somit kann berücksichtigt werden, dass in dichten, städtischen Gebieten der Zugang zum Auto mit mehr Aufwand verbunden ist als in weniger dichten, ländlichen Gebieten. Andererseits wurde die Software erweitert, um Nutzenfunktionen zu verwenden, die sich für verschiedene verhaltenshomer Gruppen unterscheiden. So kann berücksichtigt werden, dass Personen je nach Verfügbarkeit von Mobilitätswerkzeugen anders auf von Reisezeit und Kosten reagieren. Dank diesen Verbesserungen konnte erreicht werden, dass die modellierten Verkehrsmittelwahlanteile nicht nur insgesamt sondern auch über einzelne Distanzklassen sehr gut mit den im Mikrozensus beobachteten Werten übereinstimmen (Scherr, Manser, et al., 2019).

Die SBB setzt als erste nicht-akademische Organisation in der Schweiz eine mikroskopische Nachfragesimulation ein. Das Modell wurde in enger Zusammenarbeit mit den Bundesämtern für Raumentwicklung und Statistik, diversen Hochschulen, der Open-Source-Community, dem Softwareanbieter PTV und Ingenieurbüros entwickelt. Gleichzeitig waren bei der SBB für die vollständige Entwicklung der ersten Modellversion über etwas mehr als zwei Jahre drei bis vier Mitarbeitende eingebunden. Dies zeigt, dass die Entwicklung eines solch detaillierten aktivitäten- und agentenbasierten Simulationsmodells für den Einsatz in der Planungspraxis im Rahmen eines solchen Pionierprojekts mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist.

Aus der Zusammenarbeit mit dem Softwareanbieter PTV ergab sich auch eine Erweiterung der Software Visum. Ab Version 2020 bietet diese Software auch die Möglichkeit, die synthetische Population und Nachfragedaten direkt aktivitätsbasiert zu verwalten und zu visualisieren. Für die Generierung der aktivitätenbasierten Nachfrage bietet PTV seit der Version 2021 auch eine Skriptlösung an.

3.3 Fazit

Gründe für die Umsetzung aktivitätsbasierter Verkehrsmodelle

Aktivitätenbasierte Verkehrsmodelle haben sich in den USA als *best-practice* etabliert. In der Literatur wird als Hauptgrund für diese Entwicklung die Veränderung der Fragestellungen, die mit Verkehrsmodellen beantwortet werden sollen, gesehen. Aufgrund der Modell-

struktur (siehe Abschnitt 2.1) erlauben aktivitätsbasierte gegenüber aggregierten Modellansätzen eine methodisch konsistentere Beschreibung der Verkehrsnachfrage und des Verkehrsverhaltens.

Bei aktivitätsbasierten Modellen kann in allen Modellschritten auf die gesamte Bandbreite an soziodemographischen Variablen zurückgegriffen werden. Bei aggregierten Modellen hingegen ist die Anzahl verhaltenshomogener Gruppen und Verkehrsmittel mit spezifischen Verhaltensmodelle sowie die räumliche Auflösung der Verkehrszellen aufgrund der Speicherplatzproblematik beschränkt. In der Praxis zeigt sich aber, dass diese Vorteile bei der Implementation aktivitätenbasierter Modelle bisher zwar für einzelne Modellschritte aber nicht vollumfänglich realisiert wurden:

- Bei den Modellen zur Generierung der Aktivitätsketten wird in der Regel unabhängig von verhaltenshomogenen Gruppen auf verschiedene soziodemographische Variablen zurückgegriffen. Somit kann zum Beispiel abgebildet werden, dass aufgrund von Zeitbudgetrestriktionen Personen mit längeren Pendelwegen weniger oft weitere Aktivitäten durchführen. In den bisherigen praktischen Anwendungen aktivitätenbasierter Modellansätze wurden diese Möglichkeiten aber nicht immer konsequent umgesetzt. Dies trifft insbesondere bei den für die Forschung entwickelten MATSim-Modellen zu.
- Bei der Verkehrsmittel- und Routenwahl ist es zumindest bei den MATSim-basierten Modellen so, dass die Parametrisierung zwar spezifisch für verhaltenshomogene Gruppen erfolgte, bis dato aber keine Unterscheidung nach Aktivitätstypen (resp. Wegzwecken) gemacht wurde. Dabei ist auch zu bemerken, dass Verkehrsmittelwahlmodelle für die Schweiz nur weg- aber nicht tour-spezifisch vorliegen und erst kürzlich in der Forschung der Bestrebung nachgegangen wird tour-basierte Verkehrsmittelwahlmodelle umzusetzen (Hörl, Balac, et al., 2018).

Gleichzeitig ist es aber auch so, dass aufgrund der grösser werdenden Speicherkapazität auch bei aggregierten Modellen eine höhere räumliche Auflösung angestrebt wird und immer mehr verhaltenshomogene Gruppen unterschieden werden. So umfasst das neue Nationale Personenverkehrsmodell über 8000 Zonen und basiert die Nachfragegenerierung auf 26 Quell-/Zielgruppen die in Kombination mit Mobilitätswerkzeugbesitz und Altersgruppe zu 81 verhaltenshomogene Gruppen erweitert werden (Transoptima et al., 2020). Die Verkehrsmittelwahlmodelle erfolgen spezifisch für 5 Wegzwecke und berücksichtigen dabei zonen-spezifische Mittelwerte zur Soziodemographie (Alter, Geschlecht, Mobilitätswerkzeuge). Die erhöhte Komplexität des Modells wirkt sich dabei aber auch auf die Laufzeiten und den Speicherplatzbedarf aus: Mit Berücksichtigung einer Rückkopplung des Verkehrsnachfragemodells entstehen Laufzeiten von mehreren Tagen und für die Modellläufe werden Rechner mit mehreren hundert Gigabyte Arbeitsspeicher benötigt.

Gemäss Vovsha, Bradley, & Bowman (2004) war die methodisch konsistente Berücksichtigung der Tageszeit als Entscheidungsdimension ein weiterer wichtiger Grund für die Einführung von aktivitätenbasierten Modellen in den USA. Die zentrale Motivation dabei war die Wirkung von tageszeitabhängigem Mobility Pricing sowie flexibler Arbeitszeitmodelle im Modell besser abbilden zu können. Typischerweise erfolgt die Wahl der Abfahrtszeit als Teilmodell der Nachfragegenerierung. Damit das Verkehrsmodell solche Wirkungen sinnvoll abbilden kann, bedarf es aber entsprechender Verhaltensmodelle, welche die Möglichkeiten und trade-offs zwischen einer Anpassung der Startzeit einer Aktivität und dem Wechsel auf ein anderes Verkehrsmittel beschreiben. Für die erste Verhaltensdimension fehlen zumindest für Anwendungen in der Schweiz noch Grundlagen zum möglichen Entscheidungsverhalten (siehe dazu auch S. 214 in Infrac, TransSol, Transoptima, & Ecoplan, (2019)).

Datengrundlagen

Der Ersatz von wegbasierten durch aktivitätsbasierte Modellansätzen stellt bezüglich des Datenbedarfs keine grundsätzlich anderen Anforderungen. Zwar muss zur Beschreibung der der Verkehrsnachfrage zunächst eine synthetische Population generiert werden. Diese

kann aber aufgrund der in Wegtagebuchbefragungen enthaltenen Daten zur Soziodemographie und dem Mobilitätswerkzeugbesitz erfolgen.

Die Modelle zur Generierung der Verkehrsnachfrage sind methodisch anspruchsvoller als bei den wegbasierten Modellen und umfassen eine grössere Anzahl an Teilmodellen, die aber wiederum alle basierend auf Wegtagebuchdaten geschätzt werden können. In der Praxis hat sich aber gezeigt, dass der Vorteil vielschichtiger Verhaltensmodelle nur dann zum Tragen kommt, wenn die Verkehrstagebuchbefragung eine genügend breite Stichprobe aufweist (Vovsha, Bradley, & Bowman, 2004). Hierbei ist zu bemerken, dass in den USA damals für die Erstellung von regionalen Verkehrsmodellen auf Befragungsdaten von nur 4'000 bis 5'000 Haushalten zurückgegriffen werden konnte.

Schrittweise Transformation

Die Transformation von wegbasierten zu aktivitätsbasierten Modellen kann graduell erfolgen, wie es in vielen ABM Modellen in der Praxis gemacht wurde. So verfolgen die in der Praxis eingesetzten Modell in den USA den Ansatz, dass die Generierung der Nachfrage und die Verkehrsmittelwahl aktivitätsbasiert erfolgt, während die Belastung der Netze weiterhin mit bestehenden Verfahren und in der Praxis eingeführten Software aufgrund von Nachfragematrizen ohne agentenbasierte Simulation erfolgt. Demgemäss kann aber bei der Belastung der Netze nur eine beschränkte Anzahl von Verhaltensattribute berücksichtigt werden, da beim Aggregieren der Nachfrage zu Matrizen Informationen verloren geht.

Die Generierung aggregierter Messgrössen wie Anzahl generierter Wege nach Wegzweck und Verkehrszone, Distanzverteilungen und Verkehrsmittelanteile ermöglicht eine direkte Vergleichbarkeit zwischen aktivitätsbasierten und aggregierten Modellansätzen und trägt so dazu bei, dass die Resultate der komplexeren Modelle einfach überprüft werden können und der Wechsel einfacher fällt.

Software

Die Entwicklung praxistauglicher, aktivitätsbasierter Verkehrsmodelle ist methodisch anspruchsvoll und setzt vertieftes Expertenwissen voraus. Gleichzeitig birgt die Transformation von einem weg- zu einem aktivitätsbasierten Verkehrsmodell auch gewisse Risiken und Ungewissheiten. Daher überrascht es nicht, dass die in den USA bisher umgesetzten Modelle alle eine ähnliche Modellstruktur aufweisen und von einer überschaubaren Zahl von Beratungsunternehmen umgesetzt wurden. Zwar stellten diese Unternehmen jeweils den Auftraggebern den Softwarecode der aktivitätsbasierten Modelle zur Verfügung, in der Praxis zeigte sich aber dann, dass bei praktischen Fragestellungen, die Anpassungen des Codes erfordern, in der Regel nur die jeweiligen Beratungsunternehmen in der Lage sind, den Code effizient weiterzuentwickeln.

Mit der Initiative «ActivitySim» wird aber seit nun einigen Jahren das Ziel verfolgt eine offene Software-Plattform für aktivitätsbasierte Verkehrsmodelle zu entwickeln. Diese Initiative erlaubt es einerseits, dass die verschiedenen Auftraggeber sich die Entwicklungskosten teilen können. Andererseits schaffte es Transparenz hinsichtlich der verwendeten Modellansätze und ermöglicht so, dass auch kleinere Regionen mit geringeren Budgets längerfristig aktivitätsbasierte Modelle in Auftrag geben und betreiben können.

Die Erweiterung der Verkehrsmodellierungssoftware PTV Visum um Datenformate zum Abbilden einer synthetischen Population und einer aktivitätenbasierten Nachfrage trägt dazu bei, dass die Verwendung aktivitätenbasierter Modelle in der Praxis einfacher wird. Die Generierung der aktivitätenbasierten Nachfrage ist aber bisher nicht Teil der Software und muss mit separaten Skripten / Software erfolgen. Eine Kombination mit ActivitySim bietet hier Synergiepotenzial.

Synthetische Population

Aktivitätenbasierten Verkehrsmodelle benötigen als Grundlage eine synthetische Population. In der Schweiz wurde mit der Generierung einer landesweiten, detaillierten synthetischen Population die Grundlage für die Implementierung aktivitätsbasierter Modelle gelegt.

Eine wichtige Anwendung von Verkehrsmodellen ist die Definition von Prognosezuständen. Die für die Schweiz zur Verfügung stehende synthetische Population macht aber starken Gebrauch von Registerdaten, die für Prognoseszenarien nicht vorliegen. Daher bedarf es hier für praktische Anwendungen eines neuen Ansatzes zur Generierung von Prognoseszenarien der synthetischen Bevölkerung.

In verschiedenen Forschungsprojekten konnte viel Erfahrung bei der Erstellung und Verwendung von aktivitätsbasierten Modellen und der Simulation der daraus abgeleiteten Verkehrsnachfrage mit MATSim gewonnen und Expertise aufgebaut werden.

Praktische Erfahrung mit aktivitätsbasierten Modellen in der Schweiz

Die Entwicklung von SIMBA MOBi als das erste für die Praxis entwickelte, aktivitätsbasierte Verkehrsmodell Europas bei den SBB ist die Fortführung der vor allem am IVT der ETH Zürich vorangetriebenen Forschungsarbeiten. Dabei lag der Fokus der Modellentwickler bei der SBB einerseits darauf methodische saubere, massnahmensensitive Modelle zur Generierung einer aktivitätsbasierten Nachfrage umzusetzen. Andererseits setzte man (anders als in der US-amerikanischen Praxis) statt auf Umlegungsmodelle oder Dynamic Traffic Assignment mit MATSim auf ein agenten-basiertes Simulationsmodell zur Belastung der Verkehrsnetze und bildete dabei gleichzeitig auch Verkehrsmittelwahlprozesse ab.

Gleichzeitig ist aber auch klar, dass in der Schweiz eine Vielzahl der verkehrsplanerischen Fragestellungen mit regionalen Verkehrsmodellen bearbeitet wird, die bisher alle als aggregierte Modelle implementiert wurden. Hier bietet sich hinsichtlich der Weiterverwendung und -entwicklung von Grundlagedaten (synthetische Population, Verkehrsnetze) sowie bezüglich der Verwendung von Software (z.B. ActivitySim) und der im In- und Ausland gemachten praktischen Erfahrungen beträchtliches Synergiepotenzial.

Dabei ist unter anderem entscheidend, welche Anforderungen sie an die Modelle heute und in Zukunft stellen und welche verkehrsplanerischen Fragestellungen modellbasiert beantwortet werden sollen. Die im folgenden Kapitel dargestellten Experteninterviews nehmen sich diesen Fragen an.

4 Experteninterviews

4.1 Methodische Grundlagen

Wissen und Kompetenzen von Experten

Experteninterviews zielen auf die Rekonstruktion von detailliertem und umfassendem Wissen über bestimmte Praktiken und expliziten Wissensbestände ab, also Wissen das von Experten als erlernt, erinnerbar und als Wissen gewusst und somit abrufbar ist (Bogner et al., 2009). Experten zeichnen sich also einerseits dadurch aus, dass sie einen Überblick über das auf einem Gebiet angesammelte Wissen haben und die Zusammenhänge des im Gebiet relevanten Spezialwissen kennen. Diese Sonderwissensbestände sind über längere Lern- und Erfahrungsprozesse erworben worden. Andererseits zeichnen sich Experten dadurch aus, dass sie zuständig für problemlösungsorientierte Entscheide haben. Dieser Umstand unterscheidet sie von Forschenden, die zwar ebenfalls über Expertenwissen verfügen, aber bezüglich der interessierenden Fragestellung keine problemlösungsorientierte Entscheidungsverantwortung ausüben.

Form der Experteninterviews

In den Sozialwissenschaften wird zwischen explorierenden und fundierenden Experteninterviews unterschieden (Bogner et al., 2014). Explorierende Interviews übernehmen im Rahmen von Studien bei denen mehrere Forschungsinstrumente zum Einsatz kommen eine felderschliessende, ergänzende Funktion. Dem gegenüber nimmt das fundierte Experteninterview eine zentrale Stellung im Forschungsdesign ein. Wichtige Erklärungen, Begründungen und Zusammenhänge des Forschungsvorhabens werden durch die Experteninterviews wissenschaftlich erarbeitet.

In dieser Forschungsarbeit werden fundierende Experteninterviews durchgeführt. Zwar kommen in der Arbeit mit der Literaturanalyse und den Modellvergleichen auch weitere Forschungsinstrumente zum Einsatz, die Experteninterviews nehmen aber bezüglich der Beantwortung der Forschungsfrage zur Sinnhaftigkeit und Möglichkeit des Einsatzes von aktivitätsbasierten Verkehrsmodelle eine zentrale Rolle ein: Mit diesem Instrument soll erklärt werden, welche praktischen Erfahrungen bisher bei der Einführung und Verwendung von aktivitätsbasierten Modellen gemacht wurden, welche Begründung für und gegen die Einführung sprechen und welche Zusammenhänge, z.B. bezüglich der mit dem Modell zu beantwortenden Fragestellungen, berücksichtigt werden müssen.

Bezüglich der mit Experteninterviews erzielbaren Wissen wird zwischen Informationen und Deutungswissen unterschieden (Bogner et al., 2014). Das *systematisierende Interview* zielt auf die Erhebung von Informationen in Form einer möglichst weitgehenden und umfassenden Erhebung des Sachwissens der Experten ab. Dieses Wissen umfasst technisches Wissen und Prozesswissen, das jederzeit den Befragungspersonen reflexiv verfügbar ist. Die Durchführung des Interviews erfolgt in diesem Fall mit einem relativ differenzierten Leitfaden.

Beim *theoriegenerierenden Interview* steht die subjektive Dimension des Expertenwissens im Zentrum, also Handlungsorientierungen, implizite Entscheidungsmaximen und handlungsanleitende Wahrnehmungsmuster. Die Interviewpartner sind hier in erster Linie als Vertreter einer bestimmten Gruppe, z. B. als Funktionsträger, etwa als Besteller und Betreiber eines Verkehrsmodells angesprochen. Im Vergleich zum systematisierenden Experteninterview ist der Gesprächsleitfaden lockerer und offener gestaltet.

In dieser Forschungsarbeit werden Elemente des systematisierenden und des theoriegenerierenden Interviews eingesetzt: Für die vorliegenden Forschungsfragen sind sowohl technisches und Prozesswissen von Relevanz, aber auch die Einschätzungen von Experten in ihrer Funktion als problemlösungsorientierte Entscheidungsträger.

Art der Gesprächsführung

Der Interviewende führt das Gespräch aufgrund eines im Vorfeld erarbeiteten Leitfadens. ExpertInnen sind es sich in der Regel gewohnt über ihr Fachgebiet zu sprechen und anderen darzulegen. Dabei werden in alltäglichen Situationen durchaus auch strategische Absichten verfolgt, da die ExpertInnen dies im beruflichen Kontext oft im Austausch mit Vorgesetzten oder Kunden machen. Daher ist es wichtig, dass der Interviewende sich als kompetenter Gesprächspartner auf Augenhöhe erweist, um ein möglichst von strategischen Absichten ungefärbtes Bild der Sichtweisen des/r Experten/in zu erhalten.

Um zu verhindern, dass sich ein einseitiges Frage-Antwort-Verhältnis ergibt, soll besonders in der ersten Interviewphase darauf geachtet werden, dass sich die Kommunikationssituation den Gewohnheiten eines Miteinander-Reden entspricht (Bogner et al., 2009). Ziel des Interviewenden muss es sein ein quasi-normales Gespräch zu führen. Im Kontext von Experteninterviews entspricht dies in der Regel einem diskursiv-argumentativen Fachgespräch, das durch folgende Merkmale gekennzeichnet ist: thematische Fokussierung, Gebrauch von Fachwörtern und Abkürzungen.

Bei Fachgesprächen wird davon ausgegangen, dass das Gegenüber grundlegende Sachverhalte und Zusammenhänge voraussetzen darf und dass man sich nicht fürchten muss missverstanden zu werden, da die Gesprächspartner mit den Fachtermini und den methodischen Grundlagen des Fachgebiets vertraut sind.

Beim Gespräch soll vermieden werden, dass sich eine Situation der Belehrung oder Rechtfertigung einstellt, sondern ein möglichst neutrales Darstellen von Sachverhalten und Herangehensweisen: Was gemacht wird, warum es gemacht wird, wie es gemacht wird. Daher soll ein das Interviewsetting eine Situation zu erzeugen, die es erlaubt, dass sich das Gespräch als gegenseitige Unterrichtung einstellt mit dem Ziel, dass die zentralen Kompetenzen des/r Experten/in (Sonderwissen und Zuständigkeit bei problemlösungsorientierten Entscheiden) zum Tragen kommen.

Daher ist es für Experteninterviews von zentraler Bedeutung, dass der Interviewer ebenfalls über ein gewisses Expertenwissen zum Fachgebiet verfügt, wenngleich er sich auch die Voraussetzung nicht erfüllen im Fachgebiet verantwortlich für den Entwurf und die Bereitstellung von Problemlösungen zu sein.

Anonymisierung und Ergebnisdarstellung

Die Tatsache, dass ExpertInnen oft exponierte Positionen haben, erschwert die Anonymisierung der Interviews. Im konkreten Fall dieser Forschungsarbeit kann davon ausgegangen werden, dass sie die Gesprächspartner zumindest partiell kennen und in wechselseitigem Austausch stehen. Daher erscheint eine Anonymisierung der Interviews als nicht zwingend. Trotzdem soll den Gesprächspartnern angeboten werden (auch gewisse Aussagen) anonymisiert abgeben zu können.

Auswertung und Dokumentation

Die Auswertung der Interviews erfolgt basierend auf Transskripten gemäss Mayer (2012) in sechs Stufen:

1. Antworten markieren
2. Kategorieschema einordnen
3. Innere Logik erstellen
4. Text zur inneren Logik erstellen
5. Text mit Interviewausschnitten
6. Bericht

4.2 Vorbereitung und Durchführung der Experteninterviews

4.2.1 Leitfaden

Der Interviewleitfaden dient in der Vorbereitung der Interviews zur Strukturierung des Interviews und als Hilfsmittel in der Erhebungssituation. Ziel des Leitfadens ist nicht, dass in allen Interviews die absolut identischen Fragen gestellt werden, sondern, dass die Befragten gleichermaßen zum Reden gebracht werden (Bogner et al., 2014).

Je nach Art des Interviews funktioniert der Leitfaden als Themensammlung, die im Interview angesprochen werden sollen, sowie als Auflistung der zentralen Fragestellungen, die besprochen werden. Stehen aber bei einem systematisierenden Interview eher die Abbildung von Sachwissen im Vordergrund, kann der Leitfaden aber auch konkrete Fragen umfassen.

Ein Leitfaden enthält in der Regel verschiedenen Themenblöcke zu denen jeweils ein bis drei Hauptfragen notiert werden, die als zentrale Gesprächsanreize dienen. Ergänzend kommen je nach Thema davon abhängige, konkrete Fragen hinzu, die der weiteren Detaillierung dienen. Folgende Themenblöcke wurden für die Experteninterviews vorgesehen:

Einleitung:

- Warm-up (um sich gegenseitig kennenzulernen und Vertrauen zu schaffen)
- Rolle von Verkehrsmodellen im Planungsprozess
- Vorwissen zum Thema abklären

Hauptteil:

- Anwendungen von Verkehrsmodellen
 - Akzeptanz bestehender Modelle
 - Hindernisse bei der Verwendung von aktivitätenbasierten Modellen
 - Anwendungen mit konkreten Vorteilen bei der Verwendung von aktivitätenbasierten Modellen
 - Erfahrungen aus Anwendungen mit aktivitätenbasierten Modellen
- Transformationsprozess
 - Welche Eintrittshürden gibt es?
 - Welche Erfahrungen wurden beim Wechsel von einem aggregierten auf ein aktivitätenbasiertes Modell gemacht?
 - Welche Verbesserungen würden Modell-Betreiber und Anbieter dazu bewegen / wären nötig, damit das heute eingesetzte Modell/Ansatz zu einem aktivitätenbasierten Modell weiterentwickelt wird?
- Anforderungen an Modellqualität
 - Kennwerte auf Ebene Teilmodell / Gesamtmodell
 - Massnahmensensitivität
- Kenntnisse über und Anforderungen an Software klären
- Modellverwaltung (Governance)

Schlussenteil:

- Frage nach Themen und Aspekten, die nicht/zu wenig im Interview abgedeckt wurden.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung unterscheiden sich die Fragestellungen und Themenblöcke je nach Funktion der zu interviewenden Experten. Daher werden hier Gesprächsleitfäden nach Funktion unterschieden. Einzelne Themenblöcke sind dabei funktionspezifisch, andere sind für mehrere Funktionen von Relevanz.

Der vollständige Leitfaden ist im Anhang dieses Berichts dokumentiert.

4.2.2 Stichprobenbildung

Experteninterviews sind ein qualitatives Forschungsinstrument. Anders als bei der quantitativen Forschung steht bei der qualitativen Forschung nicht die statistische Repräsentativität, sondern die Relevanz der Subjekte für die inhaltliche Repräsentation der Fragestellung im Vordergrund (Flick, 1999). Dennoch zielen Experteninterviews darauf ab, Erkenntnisse zu gewinnen, die über den konkreten vom Interviewpartner erläuterten Fall hinausreichen. Dementsprechend zielt die Wahl der Interviewpartner (Stichprobe) darauf ab, dass die gewonnenen Ergebnisse übertragbar und generalisierbar sind. Dazu Kriterien festgesetzt, welche eine Differenzierung der Interviewpartner nach deren für die Fragestellung relevanten Eigenschaften erlauben.

Im Fall von aktivitätsbasierten Verkehrsmodellen wird zwischen Betreibern, Beratern (welche Verkehrsmodelle implementieren und anwenden), Anbietern von spezialisierter Software und Forschenden unterschieden. Eine weitere Dimension für die Wahl der Interviewpartner bildet das Kriterium, ob die Befragten selbst bereits vertiefte Arbeitserfahrung mit aktivitätsbasierten Modellen haben. Damit soll eine ausgeglichene Abbildung des Erfahrungswissens zum Thema Verkehrsmodelle und deren praktischen Anwendung gewährt werden und auch mögliche Hemmnisse für den Einsatz von ABM abgeklärt werden.

Bei der Stichprobenbildung wurde darauf Wert gelegt, dass alle Experten die oben formulierten Bedingungen nach nachgewiesenem Sonderwissen als auch Zuständigkeit für problemlösungsorientierte Entscheide erfüllen. Zur gegenseitigen Absicherung und zur Einbeziehung verschiedener Perspektiven wurde darauf geachtet, dass für die Zellen der bei den praxisrelevanten Funktionen Modellbetreiber, Berater und Softwarebetreiber mehrfach belegt sind, sofern das im Rahmen dieser Arbeit möglich war.

4.2.3 Stichprobe

Tab. 4 listet die interviewten Experten gemäss der im obigen Abschnitt definierten Dimensionen auf. Aufgrund der beruflichen Laufbahn verschiedener Interviewpartner ist eine eindeutige Zuweisung zu einer Zelle von Tab. 4 nicht immer möglich:

- Ben Stabler hat einerseits viel Erfahrung bei der Entwicklung von ABM und ist gleichzeitig einer der Hauptentwickler der Software ActivitySim.
- Christian Schiller ist ein bekannter Praxisexperte und Entwickler von aggregierten Verkehrsmodellen und als Consultant tätig.
- Billy Charlton hat als Modellbetreiber die Entwicklung der ABM in den Städten Seattle und San Francisco betreut, ist heute aber als Forscher an der TU Berlin tätig.

Für diese drei Fälle wurde die Zuweisung in Tab. 4 aufgrund der hauptsächlichen Tätigkeit zum Zeitpunkt des Interviews vorgenommen.

Tab. 4 Aufbau der Stichprobe und Interviewpartner für Experteninterviews

Funktion	Mit vertiefter ABM-Erfahrung	Ohne vertiefte ABM-Erfahrung
Modellbetreiber	Wolfgang Scherr	Andreas Justen
	Leitet bei den SBB die Entwicklung die Entwicklung des ABM SIMBA MOBi und den Einsatz des neuen Modellwerkzeugs im Rahmen der strategischen Planung des Personenverkehrs bei der SBB.	Ist beim Bundesamt für Raumentwicklung für die Entwicklung und den Betrieb des Nationalen Personenverkehrsmodells der Schweiz zuständig.
	Guy Rousseau	Michael Redle
	Leitet bei der Atlanta Regional Comission die Abteilung Modellierung und Erhebungen. In dieser Rolle hat er die Transformation von einem aggregierten zu einem aktivitätenbasierten Verkehrsmodelle geleitet.	Ist beim Kanton Basel-Stadt für die Entwicklung und den Betrieb des grenzüberschreitenden Gesamtverkehrsmodell Basel zuständig.
		Stefan Dasen
		Ist beim Kanton Zürich für die Entwicklung und den Betrieb des Gesamtverkehrsmodells zuständig.
		Stefan Geier, Volker Franke
		Sind bei den Berliner Verkehrsbetrieb für die Verkehrsmodellierung zuständig. In Auftrag der BVG hat die Firma Senozon ein agenten-basiertes Verkehrsmodell mit der Software MATSim implementiert, das für bestimmte Fragestellungen in Ergänzung zum aggregierten Modell zu Anwendung kommt.
Modellentwickler	Ben Stabler	Milenko Vrtic
	Arbeitet beim Ingenieursberatungsunternehmen RSG in den USA und hat bei der Implementierung mehrere in der Praxis genutzten ABM mitgearbeitet. Er leitet die Entwicklung von ActivitySim, einer Open Source Softwareplattform für die Implementierung von ABM.	Implementierte zahlreiche Verkehrsmodelle in der Schweiz, z.B. das Nationale Verkehrsmodell, sowie die kantonalen Verkehrsmodelle in Zug, Zürich und Tessin.
		Christian Schiller
		Arbeitet als Berater im Bereich der Verkehrsmodellierung und, ist Experte für Verkehrsnachfragetheorien sowie Professor für Verkehrsmodellierung bei der Hochschule RheinMain.
Softwarebetreiber	Marcel Rieser	Klaus Nökel
	Ist Kernentwickler von MATSim und vertreibt über seine Firma Simunto die Software «via» zur Visualisierung von agenten-basierten Verkehrsmodellen.	Leitet die Entwicklung von PTV Visum, einer der führenden Software für aggregierte Verkehrsmodelle.

Tab. 4 Fortsetzung

Funktion	Mit vertiefter ABM-Erfahrung	Ohne vertiefte ABM-Erfahrung
Forschende	Kay Axhausen	
	Ist Professor für Verkehrsplanung an der ETH Zürich und ist ein anerkannter Experte für aktivitätsbasierte Verkehrsmodelle.	
	Rolf Möckel	
	Ist Professor «Modellierung räumlicher Mobilität» an der TU München und hat agenten-basiertes Flächennutzungs- und Verkehrsmodell für die Metropolregion München entwickelt. Von 2007 – 2013 arbeitete er für Parsons Brinkerhoff in New York an aktivitätsbasierten Verkehrsmodellen in der Praxis.	
	Billy Charlton	
	Ist seit 2017 als Forscher im Bereich der ABM und der Visualisierung derer Resultate an der TU Berlin tätig. Zuvor leitete bei der San Francisco County Transport Authority und Puget Sound Region Council jeweils Teams die mit der Einführung und Verwendung von aktivitätsbasierten Verkehrsmodellen betraut sind	

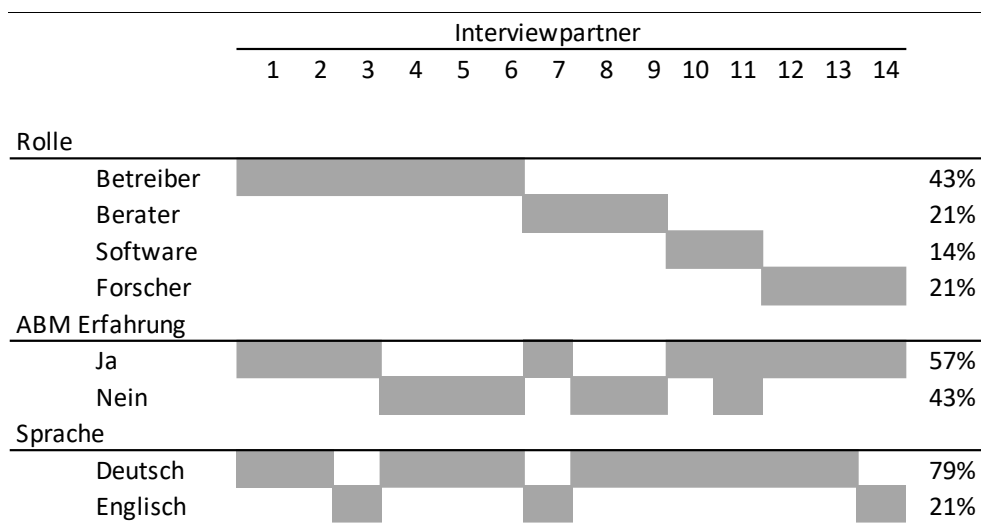
Tab. 5 bietet einen Überblick zum beruflichen Hintergrund der interviewten Personen, deren Rolle und Erfahrung im Bereich der Verkehrsmodellierung sowie der Sprache in der das Interview geführt wurde.

Um den Praxisbezug der Forschungsarbeit zu stärken, wurde bei der Gewichtung der interviewten Personen Wert daraufgelegt, dass die Sicht der Betreiber gut abgestützt ist und daher hier eine grössere Anzahl Interviews geführt als bei den anderen Kategorien der Dimension «Rolle».

Zudem konnte erreicht werden, dass das Sample für alle Rollen ausser in der Forschung sowohl Personen mit als auch ohne Erfahrung mit aktivitätsbasierten Modellen umfasst.

Mit drei Interviewpartnern aus den USA wird gewährleistet, dass die dort gemachten Erfahrungen bei der Entwicklung und dem Einsatz von aktivitätsbasierten Modellen berücksichtigt werden.

Tab. 5 Beruflicher Hintergrund der interviewten Personen im Überblick



Die Verkehrsmodellierung ist ein interdisziplinäres Arbeitsgebiet, welches die Themen Infrastrukturplanung, volkswirtschaftliche Bewertung, Mikroökonomie und Verhaltensmodellierung, Statistik, Informatik und Raumwissenschaft umfasst. Dies reflektiert sich auch bezüglich des beruflichen Werdegangs der interviewten Experten wobei sich auch zeigt, dass es bezüglich der Rolle in der Arbeit mit Verkehrsmodellen Unterschiede gibt.

Drei von vier Personen, die bei Amtsstellen oder Verkehrsbetrieben ein Verkehrsmodell betreiben, haben Ingenieurwissenschaften (Bau- oder Wirtschaftsingenieur) studiert. Bei den Modellentwicklern und in der Forschung tätigen Experten halten sich die Ingenieurwissenschaften und andere thematische verwandte Studienabschlüsse die Waage.

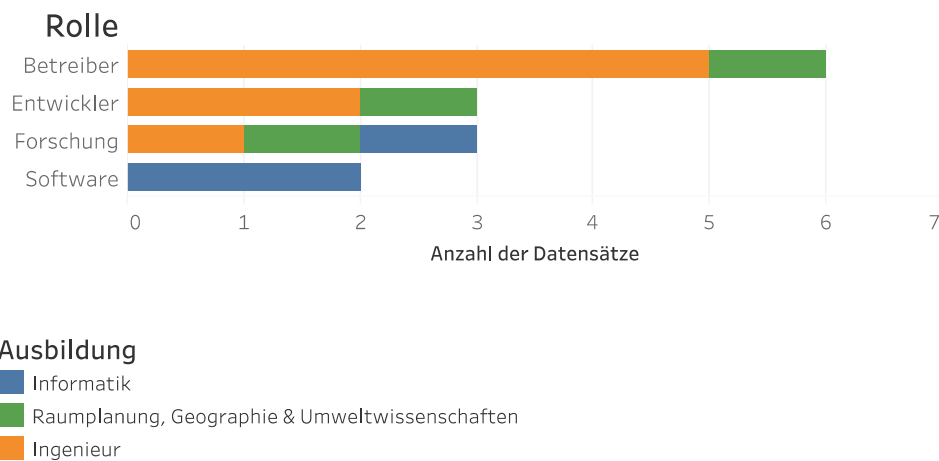


Abb. 21 Beruflicher Werdegang der Interviewten Experten

Alle sechs interviewten Personen, die als Modellentwickler oder in der Forschung arbeiten, haben in ihrer beruflichen Laufbahn Programmierkenntnisse erworben.

Beide Personen, die sich mit der Entwicklung von Software beschäftigen, haben ein Informatikstudium abgeschlossen und sind über die Entwicklung von Softwareanwendungen im Bereich des Verkehrswesens zur Verkehrsmodellierung gestossen.

Die Auswahl der interviewten Personen hat keinen Anspruch, repräsentativ für die im Berufsfeld Verkehrsmodellierung tätigen Personen zu sein. Trotzdem zeigt der Umstand,

dass die Hälfte der interviewten Personen ein Doktorat mit Bezug zum Thema erlangt haben, dass es sich bei der Verkehrsmodellierung um ein hochspezialisiertes Berufsfeld handelt. Der Einstieg ins Berufsfeld erfordert eine fachspezifische Ausbildung und anschließend vertiefte Auseinandersetzung mit dem Thema. Obschon die Verkehrsmodellierung ein interdisziplinäres Arbeitsumfeld ist, sind Quereinsteiger selten. Dies bedeutet, dass neue Arbeitsansätze und Methoden eher über die Hochschulen ins Arbeitsumfeld gelangen, respektive die im Arbeitsumfeld tätigen Personen sich selbst von anderen Fachgebieten Inspiration für die eigene Arbeit holen müssen, um innovativ zu bleiben.

4.3 Anforderungen und Anwendungen heutiger Verkehrsmodelle

4.3.1 Anforderungen

Bezüglich der grundsätzlichen Qualitätsanforderungen sehen die interviewten Experten keine grundlegenden Unterschiede zwischen den beiden Modellansätzen: Alle Teilmodelle müssen sensitiv auf Änderungen bei den relevanten Einflussgrößen reagieren, dabei sollen die Verhaltensparameter nachvollziehbar sein und das Gesamtmodell muss Verkehrsmengen im Ist-Zustand sowie verschiedene Kenngrößen wie zum Beispiel Verkehrsmittelwahlanteile nach Distanzklassen gleichermaßen zuverlässig reproduzieren können.

Die funktionellen Anforderungen gegenüber den aktivitätenbasierten Modelle umfassen aber einen breiten Anforderungskatalog. Hier wird in der Regel auch gefordert, dass die Modelle auf Veränderungen des Verkehrsangebots und der Siedlungsstruktur bezüglich des Mobilitätswerkzeugbesitzes, der Anzahl Wege sowie der Wahl der Abfahrtszeit resp. Anfangszeit von Aktivitäten reagieren, die bei aggregierten Modellen normalerweise als exogen vorgegeben werden.

Die befragten Experten aus dem europäischen Raum sind sich weitgehend darin einig, dass die bestehenden, aggregierten Verkehrsmodelle sich gut eignen, um die heute in der Praxis gängigsten Fragestellungen zu beantworten. Gleichzeitig wurde in den Interviews vereinzelt angemerkt, dass, bei in der europäischen Praxis erst noch demonstriert werden muss, dass aktivitätenbasierten Modelle den gängigen Qualitätskriterien bezüglich der Kalibrierung und Validierung zu erfüllen vermögen (N. Rieser, Tasnady, de Vries, et al., 2018) und sensitiv auf Angebotsänderungen reagieren. Konkret wurde in Frage gestellt, wie mit aktivitätenbasierten Modellen der Randsummenabgleich bei der Zielwahl von Arbeits- und Ausbildungswegen bewerkstelligt werden kann und wie differenziert die für die Modelle der Verkehrsmittel-, Abfahrtszeit- und Routenwahl tatsächlich umgesetzt werden. Hierbei spielt mit, dass im hiesigen Forschungsumfeld aktivitätenbasierte Modelle vor allem im Zusammenhang mit der agentenbasierten Simulation MATSim zum Einsatz gekommen sind. Dabei wurde primär auf die Weiterentwicklung und Anwendung des Simulationsmodells fokussiert, während bei der aktivitätenbasierten Nachfragemodellierung zum Beispiel im Vergleich mit der US-amerikanischen Praxis einfachere Modelle eingesetzt worden sind.

Im Allgemeinen wird zwar anerkannt, dass aggregierte Modelle aufgrund verschiedener Unterschiede gegenüber aktivitätenbasierten Modellen bezüglich der möglichen Verhaltensdifferenzierung und möglichen Modellanwendungen Nachteile mit sich bringen. Zugleich wird aber auch argumentiert, dass die damit einhergehenden Modellfehler im Vergleich zu anderen Unsicherheiten überschaubar und für die bisher relevanten Anwendungen von untergeordneter Relevanz sind. Wichtiger sei es, dass die Modelle richtig angewendet werden: Zum Beispiel, dass in Prognosemodellen die richtigen Annahmen bezüglich der Strukturdaten getroffen werden und die Wirkung zukünftiger Angebotsverbesserungen vollständig, also inklusive Zielwahl- und Verkehrsmittelwahleffekten abgebildet werden. Zudem können diese Nachteile durch entsprechende Erweiterungen der aggregierten Modellansätze reduziert werden.

Ein Beispiel dafür ist die Abbildung von Wegen, die nicht an den Wohnstandort gebunden sind. Hier ist es mit aggregierten Modellen bei der Verkehrsmittelwahl nicht direkt möglich den für diesen Ort spezifischen Mobilitätswerkzeugbesitz zu berücksichtigen. Die für die

Verhaltensmodelle relevanten Angaben zu den für diese Wege relevanten Mobilitätswerkzeugbesitzanteile können nur aufgrund der Verkehrsbeziehungen mit anderen Zonen näherungsweise abgeschätzt werden, was zusätzlichen Modellierungsaufwand bedingt. Diese Art von Wegen machen in der Schweiz rund 20% bis 30% der gesamte Personenverkehrsnachfrage aus (siehe Abb. 18). Dementsprechend beschränkt sich der bei Verwendung von aggregierten Modellen entstehende Modellfehler auf diesen Teil der Nachfrage.

In der US-amerikanischen Praxis ist die Ausgangslage etwas anders gelagert, da hier bereits heute einige Fragestellungen eine hohe Praxisrelevanz haben, bei denen aktivitätsbasierte Modelle direkte praktische Vorteile gegenüber aggregierten Ansätzen bieten. Typische Beispiele für solche Fragestellungen sind *high occupancy lanes (HOV)*, nachfrageabhängig bemaute Autobahnspuren (*express lanes*) sowie Bring- und Holfahrten. Hier bieten aktivitätsbasierte Ansätze einerseits die Möglichkeit Wechselwirkungen zwischen Besetzungsgrad und der Koordination von gemeinsamen Touren innerhalb eines Haushalts direkt im Modell abzubilden. Andererseits erlaubt die Abbildung ganzer Touren, die Wirkung der Wahl der Abfahrtszeit und des Verkehrsmittels auf weitere Wege direkt im Modell zu berücksichtigen und dabei personen- und wegspezifische Faktoren, wie das verfügbare Einkommen und den Fahrzweck, flexibel in den Verhaltensmodellen zu berücksichtigen ohne im Voraus spezifische verhaltenshomogene Gruppen festlegen zu müssen.

Die Verteilungsgerechtigkeit bei Investitionen in die Verbesserung der Verkehrssysteme ist eine weitere Fragestellung, die bisher primär nur in den USA praxisrelevant ist. Hier bieten aktivitätsbasierte Modelle mehr Möglichkeiten die Auswirkungen verschiedener Massnahmen nach soziodemographischen Gruppen sowie bezüglich des Wohnorts der betroffenen Personen zu differenzieren.

Bezüglich der technischen Anforderungen stellt die Rechenzeitintensität für viele Anwendungen in der Praxis das wichtigste Kriterium dar. Aus der planerischen Praxis ergibt sich die Randbedingung, dass die Ergebnisse für gängige Modellierungen über Nacht, also innerhalb von rund 14 Stunden generiert werden können. Beim Modellentwurf wird daher darauf geachtet, dass die räumliche Auflösung und die Differenzierung der Verhaltensmodelle so gewählt, dass ein Modell mit einem entsprechend ausgestatteten Rechner innerhalb dieses Zeitraums berechnet werden kann.

Zur Berechnung der Streckenbelastungen kommen in der Praxis in der Regel sowohl bei aktivitätsbasierten als auch aggregierten Modellen umlegungs-basierte Verfahren zum Einsatz (siehe Abschnitt 3.2) wofür die gleichen Softwareprodukte verwendet werden. Daher unterscheiden sich die beiden Ansätze hier bezüglich der Rechenintensität nicht wesentlich. Das bei den SBB entwickelte aktivitätsbasierte Verkehrsmodell SIMBA MOBi bildet eine Ausnahme, da hier mit MATSim eine agentenbasierte Verkehrssimulation zur Berechnung der Streckenbelastungen sowie der Verkehrsmittel- und Zeitwahl zum Einsatz kommt.

Aufgrund der höheren Anzahl der Teilmodelle bei der Generierung der Verkehrsnachfrage ist es aber so, dass die aktivitätsbasierten Nachfragemodelle rechenzeitintensiver sind als aggregierte Modelle. Die einzelnen Teilmodelle sind in der Regel jedoch effizient parallelisierbar, was aber bezüglich der Anzahl verfügbarer Rechenkerne höhere Anforderungen an die Hardware mit sich bringt. Der Nachteil relativiert sich weiter, da die bei einem Modelldurchlauf für die Umlegung aufgewendete Rechenzeit deutlich grösser ist als für Verkehrsnachfragemodelle. Gleichzeitig es aber so, dass bei aggregierten Modellen aufgrund begrenzter Ressourcen beim Arbeitsspeicher die Anzahl der verhaltenshomogenen Gruppen eingeschränkt ist, die berücksichtigt werden können. Diese Einschränkung gibt es bei aktivitätsbasierten Nachfragemodellen nicht.

4.3.2 Anwendungen

Aus den Experteninterviews geht hervor, dass die Verkehrsmodelle für vielfältige Anwendungen im Planungsprozess eingesetzt werden. Die standardisierte Bewertung der verkehrlichen Auswirkungen von Angebotsszenarien sowie die Erstellung von langfristigen

Verkehrsprognosen wurden von allen Experten als die wichtigsten und häufigsten Anwendungen genannt. Weitere gängige Anwendungen umfassen die ÖV-Angebotsplanung, Fahrgastprognose, Abschätzung der Wirkung von Baustellen und einer flächendeckenden Anpassung des Geschwindigkeitsregimes.

Die Wirkung von verkehrlichen Massnahmen auf die Erreichbarkeit wird nur vereinzelt systematisch ausgewertet. Umgekehrt werden Erreichbarkeitsindikatoren bei der Modellierung des Mobilitätswerkzeugbesitzes sowie der Anzahl und Art der durchgeführten Wege aber immer häufiger eingesetzt, insbesondere bei aktivitätsbasierten Modellen. Eine Rückkopplung mit einem Flächennutzungsmodell wie z.B. beim NPVM mit FaLC wird bisher noch selten, aber sowohl im Kontext aggregierter als auch aktivitätsbasierter Modelle eingesetzt. Die Verwendung von verkehrsmittelübergreifenden Logsums oder ähnlicher Konstrukte (z.B. simultane Ziel- und Verkehrsmittelwahl im NPVM) hingegen wird, unabhängig vom Modellansatz, gemeinhin als unverzichtbarer Ansatz gesehen, um die Wirkung bei Änderungen des Verkehrsangebots auf die Zielwahl berücksichtigen zu können.

Eine weitere oft genannte Anwendung ist die Abschätzung von Lärmbelastungen und Luftemissionen. Bei der Modellierung der Fahrzeugemissionen ergeben sich beim Einsatz aktivitätsbasierter Ansätze Vorteile, da hier aus dem Nachfragemodell direkt abgeleitet werden kann, wie lange ein Verbrennerfahrzeug seit der letzten Nutzung stillgestanden ist und daher auf den ersten Kilometern erhöhte Emissionswerte aufweist. Es wurde aber auch darauf hingewiesen, dass aufgrund der Information des Fahrzwecks und der verhaltenshomogenen Nachfragegruppe auch mit aggregierten Modellen die Häufigkeit von Kaltstarts probabilistisch abgeschätzt und bei der Emissionsmodellierung berücksichtigt werden kann. Gleichzeitig ist aber klar, dass ein solcher Ansatz in der Umsetzung aufwändiger ist und zu einem höheren Modellfehler führt als bei Verwendung eines aktivitätsbasierten Nachfragemodells.

Verkehrsmodelle werden oft als Datengrundlage für weitere Anwendungen verwendet. So werden zum Beispiel die streckenbezogenen Verkehrsmengen im Rahmen des Infrastrukturmanagements, der Planung von Velonetzen oder der Modellierung von Immobilienpreisen (Lärmemissionen) verwendet. Da hier in der Regel pro Fahrzeugtyp aggregierte Verkehrsmengen pro Strecke verwendet werden, macht es keinen Unterschied, ob diese auf einem aggregierten oder aktivitätsbasierten Modell basieren. Für spezifische Anwendungen kann es aber von Interesse sein nach Verkehrszweck und verhaltenshomogenen Gruppen differenzierte Verkehrsmengenangaben nutzen zu können. So kann zum Beispiel bei der Velonetzplanung der Anteil Jugendlicher an bestimmten Strecken und Kreuzungen abgeleitet werden. Zudem werden solche Ergebnisse aus Verkehrsmodellen in der Werbewirtschaft eingesetzt, um die Sichtbarkeit von Plakaten differenziert nach verschiedenen Zielgruppen abschätzen zu können. Hier bieten aktivitätsbasierte Modelle aufgrund der höheren Differenzierbarkeit der Streckenbelastungen Vorteile, insbesondere, wenn deren Berechnung agentenbasiert erfolgt. So lässt sich dabei zum Beispiel nach Standort und Tageszeit abzuschätzen, wie viele Personen in einem bestimmten Perimeter präsent sind, welche Aktivitäten diese Personen im Verlauf des Tages unternehmen und wie deren Soziodemographie zusammengesetzt ist. Während solche Fragestellungen für verkehrsplanerische Anwendungen höchstens eine untergeordnete Rolle spielen, sind derartige Analysen jedoch für standortbezogene Dienstleistungen und die Werbewirtschaft von so grossem Nutzen, dass die Firma Senozon primär für solche Anwendungen eigene aktivitäts- und agentenbasierte Verkehrsmodelle betreibt.

Bezüglich der Weiterverwendung von Modelldaten nimmt das NPVM eine Sonderrolle ein. Einerseits bietet das NPVM wichtige Grundlagen für die Erstellung von regionalen Verkehrsmodellen. Andererseits bietet das NPVM für Regionen, die kein eigenes Verkehrsmodell betreiben, die Möglichkeit gewisse verkehrsplanerischer Fragestellungen dennoch modellbasiert angehen zu können.

Die interviewten Experten aus den USA legten dar, dass aufgrund der Flexibilität der aktivitätsbasierten Modelle zusätzliche, neue Anwendungen ermöglicht hat, die nicht unter den ursprünglich beschriebenen Anforderungen des Modells figurierten. Ein Beispiel hierfür ist die über die Jahre gestiegene Relevanz von Fragen zur Verteilungsgerechtigkeit von Massnahmen (transport equity) und multimodalen Verkehrsangeboten, die aufgrund der

Abbildung ganzer Wegeketten mit aktivitätenbasierten Ansätzen deutlich besser und differenziert beantwortet werden können.

4.3.3 Verwendung der Modelle im Planungsprozess

Bezüglich der Relevanz der Modellergebnisse auf planerische Entscheide gehen die Meinungen der interviewten Experten auseinander, wobei positive Einschätzungen deutlich überwiegen. Verschiedenen Experten bemerken, dass der Wert des Modells nicht nur darin liegt, quantitative Resultate auf bestimmte Fragestellungen generieren zu können, sondern die Modelle auch helfen verkehrsplanerischer Fragestellungen zu strukturieren. Dadurch wird der Abwägungsprozess transparenter, was der Qualität der fachlichen und politischen Diskussion zuträglich ist. Ein Experte sieht die Rolle eines Verkehrsmodells gar darin, dass das Modell im fachlichen Diskurs bei der Entscheidungsfindung eine zusätzliche, unabhängige Stimme bietet.

Ein Experte gab aber auch zu bedenken, dass Modelle die Gefahr bieten dazu zweckentfremdet werden, um vorgefasste, zuweilen auch politisch motivierte Erwartungen zu bestätigen. Dabei geht oft ein falsches Verständnis für die Komplexität der Modelle einher und zum Beispiel erwartet, dass das Modell ähnlich einfach wie ein Dreisatz funktioniert. Dabei überrascht es dann auch nicht, dass in solchen Situationen die Wertschätzung für das Modell fehlt und zu wenig Geld für die korrekte Anwendung der Modelle budgetiert wird.

Knappe oder unzulängliche Budgets, sowohl bei der Modellentwicklung als auch bei Anwendungen, werden von fast allen interviewten Personen als grösstes Problem bei der Verwendung von Verkehrsmodellen gesehen. Bei der Entwicklung neuer Modelle fehlt in der Regel der finanzielle Spielraum, der es zuliesse neue, innovative Ansätze in einem praktischen Umfeld zu testen und später einzusetzen. Bei den Modellanwendungen sind die Budgets teilweise so knapp, dass vereinfachte Vorgehen zur Modellierung der erwarteten Auswirkungen von Infrastrukturprojekten eingesetzt werden müssen. Ein typisches Beispiel dafür ist die Beschränkung der berücksichtigten Nachfragereaktionen auf Routenwahleffekte oder die Abbildung von Verkehrsmittelwahleffekten über Elastizitäten.

Deutliche Unterschiede zeichnen sich bei der Projektorganisation für Modellanwendungen ab. Im europäischen Umfeld beschränkten sich die personellen Ressourcen beim Modellbetreiber in der Regel auf ein bis maximal zwei Vollzeitäquivalente, in den USA sind in der grossen Metropolitanregionen hingegen Modellierungsteams von vier bis sechs Personen gängig. In der Schweiz stehen den verschiedenen Betreibern zwischen einem halben bis maximal 2 Vollzeitäquivalente zur Betreuung der Anwendungen und Weiterentwicklung der Modelle zur Verfügung. Dementsprechend werden hier viele Arbeiten ausgelagert und in der Regel nur einfache Anwendungen direkt vom Betreiber betreut bei denen zum Beispiel nur die Verkehrsmittel- und Routenwahleffekte berechnet werden. In den USA hingegen ist die Aufteilung der Arbeiten zwischen Betreibern und Ingenieurbüros im Allgemeinen umgekehrt. Hier werden komplexere Anwendungen vom Betreiber selbst umgesetzt, da hier eher das dazu notwendige modell- und fachspezifisch Wissen vorhanden ist und einfacherer Anwendungen durch Ingenieurbüros besorgt. Für die Modellentwicklung hingegen werden überall spezialisierte Ingenieurbüros beauftragt, die oft für gewisse Teilaspekte der Modellentwicklung auch mit Universitäten zusammenarbeiten.

Aufgrund der Situation mit eher knappen Finanz- und Personalbudgets bei den Betreibern schätzen mehrere Experten ein, dass die Verkehrsmodelle eher unternutzt sind und öfters für die Entscheidungsfindung zum Einsatz kommen könnten. Dabei spielen auch die Aufwände für das Initiieren und Managen eines Projekts mit externen Beratern eine Rolle. Hier würde es helfen, wenn bei den Betreibern mehr fachliche Kompetenzen und Personalressourcen verfügbar wären, um komplexere, aber nicht besonders arbeitsintensive Anwendungen in Eigenregie abwickeln zu können.

Ebenso wurde ausgeführt, dass die Projektorganisation mit externen Auftragnehmern bei szenariobasierten Planungsprozessen eine explorative Arbeitsweise erschwert oder gar verunmöglicht. Hier müssen die zugrundeliegenden Annahmen aufgrund der Ergebnisse

von Modellläufen immer wieder iterativ angepasst werden. Dies bedingt eine agile Projektorganisation und somit enge Zusammenarbeit zwischen Studienbesteller und Modellierer. Als Beispiel für das Potenzial, dass eine solche Arbeitsweise zu besseren Ergebnissen führt, wird die Abschätzung der verkehrlichen Wirkung eines neuen, gemischt genutzten Entwicklungsgebiets genannt. Dabei sind die erwarteten Verkehrsmengen und deren Aufteilung auf die umliegenden Knoten direkt von den Modellannahmen zur Verkehrserzeugung, zum Mobilitätswerkzeugbesitz sowie der Gestaltung der Verkehrsinfrastruktur abhängig. Ein iteratives Vorgehen ermöglicht eine engere Zusammenarbeit mit der Stadtentwicklung und somit bessere Lösungen bezüglich der Abstimmung zwischen Siedlung und Verkehr zu finden. Damit dieses Potenzial realisiert werden kann, bedarf es aber eines flexiblen Planungsprozesses bei dem das Modell direkt vom Betreiber eingesetzt oder aber einer entsprechend flexiblen Projektplanung mit externen Anwendern.

4.3.4 Zwischenfazit

In der Schweiz und europäischen Umland herrscht in der Praxis bezüglich der Anwendung von Verkehrsmodellen im Allgemeinen die Meinung vor, dass sich aggregierten Verkehrsmodelle gut für die derzeit relevanten Anwendungen eignen. Die derzeit bei den Betreibern vorhandenen Budgets erlauben in der Regel eine der jeweiligen Fragestellung angemessene Modellanwendung, aber teilweise werden Modellanwendungen auch aufgrund knapper Budgets auch nur in vereinfachter Form durchgeführt.

Gleichzeitig sind die Grenzen und Einschränkungen bei Anwendungen mit aggregierten Modellen bekannt. Bisher waren aber Fragestellungen, bei denen diese Einschränkung besonders stark wiegen und aktivitätsbasierten Modellansätze praktische Vorteile bieten, von beschränkter Relevanz. Aktivitätenbasierten Modelle stellen noch höhere Anforderungen an die Modellentwicklung, deren Nutzung in praxisrelevanten Anwendungen sowie bezüglich der Rechenintensität. Daraus lässt sich ableiten, dass der Einsatz von aktivitätsbasierten Modellen nur dann sinnvoll ist, wenn

- a) Fragestellungen an Relevanz gewinnen, bei denen aktivitätsbasierte Modelle praxisrelevante Vorteile bieten, und
- b) die Betreiber bereit sind, mehr Ressourcen für die Modellentwicklung und -anwendung zur Verfügung zu stellen.

Aktivitätsbasierten Modelle werden in der Schweiz und in Europa in der Praxis bisher nur vereinzelt und nirgends als vollständiger Ersatz von konventionellen Modellen eingesetzt. Dementsprechend wurde in den Experteninterviews festgestellt, dass es bezüglich Modellentwicklung, Anwendungen und der damit erzielbaren Resultate mit aktivitätsbasierten Modellen noch einiges an Unsicherheit vorherrscht und Fragen bezüglich des Einsatzes in der Praxis aufgeworfen werden. Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur Beseitigung dieser Unsicherheit und zur Klärung einiger Fragen.

In den USA hingegen werden aktivitätsbasierte Modelle schon seit rund zehn Jahren in der Praxis eingesetzt. Dies begründet sich, unter anderem darin, dass Fragestellungen, bei welchen aktivitätsbasierte Modelle einen deutlichen Vorteil bieten, hier schon seit längerem bei praktischen Anwendungen eine hohe Relevanz aufweisen. Daher habe die Entscheidungsträger eher darauf hingewirkt, aktivitätsbasierte Modelle in der Praxis zu etablieren. Die Erfahrung in den USA zeigt, dass bei der Anwendung von aktivitätsbasierten Modellen höhere Anforderungen an Fachwissen und Computerressourcen gestellt werden. In diesem Umstand wird einer der Gründe für die Unterschiede bei der Organisationsform zwischen der europäischen und US-amerikanischen Praxis gesehen. Es zeigt sich aber, dass eine Stärkung der Betreiber oder zumindest engere Zusammenarbeit mit Modellanwendern auch beim Einsatz von aggregierten Modellen für die Bearbeitung gewisser Fragestellungen vorteilhaft sein kann.

4.4 Potenziale für den Einsatz von aktivitätenbasierten Modellen

4.4.1 Praxisrelevanz verschiedener Eigenschaften von aktivitätenbasierten Modellen

In der Literatur werden wiederholt verschiedene Eigenschaften von aktivitätenbasierten Modellen im Vergleich mit aggregierten Modellen als methodische Vorteile aufgeführt. Daher wurden alle Interviewpartner gebeten die Praxisrelevanz solcher Eigenschaften einzuschätzen. zeigt Übersicht der Einschätzung zu dieser Fragestellung, wobei die Experten jeweils die drei für sie relevantesten Eigenschaften angegeben und anschliessend rangiert haben.

Mit Abstand als praxisrelevanteste Eigenschaft wurde die bessere Eignung von aktivitätenbasierten Modellen für verschiedene verkehrsplanerische Fragestellungen genannt. Dies überrascht nicht, da die Modelle primär zur Unterstützung von Entscheidungen bei verkehrsplanerischen Fragen entwickelt werden. Dass sich aktivitätenbasierte Modelle auch bezüglich weiterer Eigenschaften von aggregierten Modellen unterscheiden, erscheint aufgrund einer solch übergeordneten Sichtweise für die meisten interviewten Experten daher von untergeordneter Relevanz.

Dabei stellen Betreiber und Entwickler, die aktivitätenbasierte Modelle in der Praxis einsetzen, hier besonders die bessere Eignung für die Modellierung multimodaler Mobilitätsformen in den Vordergrund, da mit aktivitätsbasierten Modellen die ganze Reisekette und insbesondere vielfältige Zugangsmodi konsistent abgebildet werden können.

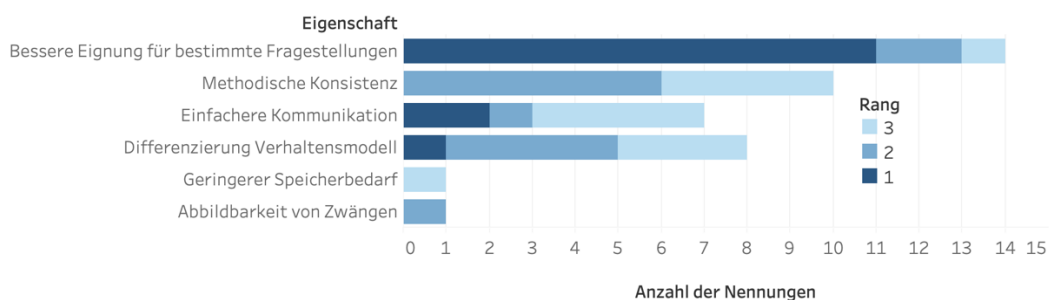


Abb. 22 Einschätzungen zur Praxisrelevanz verschiedener Eigenschaften von aktivitätenbasierten Modellen

Aktivitätenbasierte Modelle weisen aufgrund der Abbildung der gesamten Aktivitätsketten und des Verzichts auf eine Aggregation von einzelnen Handlungssubjekten zu verhaltenshomogenen Gruppen eine höhere methodische Konsistenz auf. Keiner der interviewten Experten sieht aber darin die für die Praxis relevantesten Eigenschaft für den Einsatz von aggregierten Modellen. Oft wird dieser Umstand aber als zweit- oder dritt wichtigster Vorteil genannt, weshalb er in Abb. 22 an zweiter Stelle aufgeführt wird.

Zwei Experten (je einer aus Forschung und Praxis) sehen in der einfacheren Kommunikation der aktivitätenbasierten Modelle den grössten Vorteil. Beide argumentierten dabei aus Sicht des Modellbetreibers, welcher die Funktionsweise der Modelle auch Laien einfach nachvollziehbar erklären muss und letztlich auch die Mittel für die Modellentwicklung zur Verfügung stellt.

Ein Experte, der heute auf Betreiberseite ein aggregiertes Modell betreut, sieht bezüglich der Möglichkeiten der Differenzierung des Verhaltensmodells den grössten Vorteil hinsichtlich aktivitätenbasierter Modelle. Diese Einschätzung gründet auch darauf, dass dieser Experte Fragestellungen zu verkehrslenkenden Massnahmen, wie Mobility Pricing eine hohe

Relevanz zuordnet und er hierbei insbesondere nach soziodemographischen Kriterien differenzierte Verhaltensreaktionen erwartet.

Ein Experte hingegen gibt zu bedenken, dass der aktivitätenbasierten Ansatz zwar Vorteile aufweist, dieses Potenzial aber aufgrund mangelnder Verhaltensdaten nicht voll ausgenutzt werden kann. Damit die Verhaltensmodelle so differenziert formuliert werden könnten, damit dieser Vorteil tatsächlich ausgenutzt werden kann, bedürfte es bei den Verhaltensdaten grösserer Datensätze, die heute in der Verkehrsmodellierung aber (noch) nicht zur Verfügung stehen.

Vereinzelt wurde von Interviewpartnern angemerkt, dass bisher nicht gezeigt werden konnte, dass die mit einem ABM mit agenten-basierter Simulation berechneten Verhaltensreaktionen auf empirische Datengrundlagen kalibriert werden können und dazu auch keine plausiblen Entscheidungsmodelle vorliegen. Ebenso wurden teilweise angezweifelt, dass aktivitätenbasierten Nachfragemodelle in der Praxis genauso gut für die Verkehrsprognose und Verkehrsplanung eingesetzt werden können, wie aggregierte Modelle. Diese Aussage steht im Widerspruch zur Praxis in den USA, wo einige Betreiber nach ausgiebigen Tests den Wechsel von aggregierten zu aktivitäten-basierenden Modellen vollzogen haben. Daraus wird abgeleitet, dass ein Klärungsbedarf zum aktuellen Stand der Nutzung von ABM in der US-amerikanischen Praxis und der Übertragbarkeit der dort gemachten Erfahrungen auf den schweizerischen oder europäischen Kontext besteht.

Aktivitätenbasierten Modellansätze nutzen zur Beschreibung der Nachfrage effizientere Datenstrukturen (relationale Tabellen) als aggregierte Modelle (Matrizen mit Gleitkommazahlen). Der Speicherbedarf wurde aber selten als praxisrelevanter Vorteil von aktivitätenbasierten Modellen genannt. Dies hat verschiedene Gründe. Zunächst schätzen einige Experten den Speicherplatzbedarf von aktivitätenbasierten Modellen als mindestens so gross ein, wie derjenige von aggregierten Modellen, da hier ja eine synthetische Population vorgehalten werden muss. Ein weiteres, oft angeführtes Argument ist, dass Speicherplatz aufgrund der fallenden Hardwarekosten kein echtes Problem darstellt.

Als weiterer Vorteil wurde einmal die Möglichkeit genannt, dass sich mit aktivitätenbasierten Modellen angebotsseitige Zwänge, wie zum Beispiel die Kapazitätsbeschränkung einzelner Netzelemente oder Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs explizit abgebildet werden können. Gleichzeitig bemerkte ein anderer Experte, dass die Abbildung von detaillierten Knotenwiderständen bei der agentenbasierten Simulation noch nicht gelöst sei²⁹, pauschale Knotenwiderstände können jedoch sehr gut angewendet werden, wie sie auch in der Praxis in den allermeisten Fällen flächendeckend angewendet werden. Detaillierte Knotenströme sind bei Simulationen wie auch bei der Umlegung schwierig umzusetzen, weil die Konvergenzeigenschaften nicht mehr gültig sind.

4.4.2 Zukünftige Anforderungen an Verkehrsmodelle

Bezüglich der zukünftig praxisrelevanten Planungsfragen gibt es einen Konsens unter den Experten, dass Fragestellungen zur kombinierten Mobilität, Mobility Pricing und Modellierung der zeitlichen Verteilung der Verkehrsnachfrage immer wichtiger werden. Um diese Fragestellungen methodisch adäquat beantworten zu können bedarf es dazu einerseits einer detaillierteren Beschreibung des inter- und multimodalen Verkehrsangebots. Dies bedingt einerseits, dass die Zahl der zu berücksichtigenden Verkehrsmittel und deren Kombination zunimmt. Andererseits gewinnt die konsistente Abbildung der Autoverfügbarkeit für alle Wege an Praxisrelevanz. Zudem bedarf es insbesondere zur Modellierung der zeitlichen Dynamik neuer Verhaltensmodelle, welche die heterogenen Zahlungsbereitschaften

²⁹ Diese Feststellung gilt für detaillierte Knotenwiderstände, e.g. LSA mit Umlaufzeiten. Bisherige Versuche, z.B. (Grether, 2014; Kühnel et al., 2018) zeigen zwar, wie Knotenwiderständen bei Lichtsignalanlagen mit agentenbasierten Ansätzen modelliert werden können. Der damit einhergehende zusätzliche Aufwand bezüglich der Netzdatenerhebung und Berechnung verhinderte bisher einen breiten Einsatz.

und unterschiedlichen Möglichkeiten die Startzeit von Aktivitäten frei zu wählen berücksichtigen. Ebenso führt die zunehmende Bedeutung von Onlineshopping und flexiblen Arbeitsorten direkt und indirekt zu Veränderungen bei der Zielwahl und der Bildung von Aktivitätsketten, deren Abbildung hohe Anforderungen an die Verhaltensmodelle stellen.

Fragestellungen zu neuen Angebotsformen wie zum Beispiel Mobility-as-a-Service (MaaS) sowie autonomen Fahrzeugen werden zwar als relevant für die Zukunft gesehen, spielen in der heutigen Praxis aber bisher noch keine wesentliche Rolle. Die interviewten Experten sind sich weitgehend einig darüber, dass diese zukünftigen Mobilitätsformen neue Herausforderungen insbesondere an die Modellierung des Verkehrsangebots, aber auch bezüglich der Verhaltensmodelle stellen.

Ebenso wird beobachtet, dass Anwendungen an der Schnittstelle Stadt-/Raumplanung und Verkehr immer wichtiger werden. Hier bieten Verkehrsmodelle Anwendungspotenzial für Fragestellungen der Raumentwicklung wie zum Beispiel die Wirkung und Machbarkeit von Anpassungen bei der Landnutzung und den Ausnutzungsziffern. Ein iterativeres Vorgehen bei der Modellierung bietet insbesondere bei solchen Anwendungen klare Vorteile. Während beispielsweise bei Ausbauten der Verkehrsinfrastruktur oder Anpassungen von Fahrplänen die verschiedenen relevanten Szenarien im Voraus festgelegt werden können, bietet ein iteratives Vorgehen bei Fragestellungen der Siedlungsentwicklung aufgrund derer direkten Wirkung auf die Verkehrserzeugung einen grossen Mehrwert. Damit ein iteratives Vorgehen in der Praxis aber umsetzbar ist, bedarf es entweder einer engeren, ergebnisoffener Zusammenarbeitsformen zwischen Betreiber und Anwender oder, dass solche Anwendungen vermehrt direkt vom Betreiber durchgeführt werden. Dies wiederum bedingt einen höheren Bedarf an Methodenkompetenz und verfügbaren Ressourcen beim Betreiber.

4.4.3 Eignung von aggregierten und aktivitätsbasierten Modellen für zukünftige Fragestellungen

Alle Interviewpartner wurden gebeten eine Einschätzung abzugeben, wie sie die Eignung von aktivitätsbasierten und aggregierten Modellen für verschiedene Anwendungen einschätzen, von denen erwartet wird, dass diese in den nächsten Jahren insbesondere in der europäischen Praxis eine höhere Relevanz haben werden. Abb. 23 zeigt die Ergebnisse diese Fragestellung in der Übersicht.

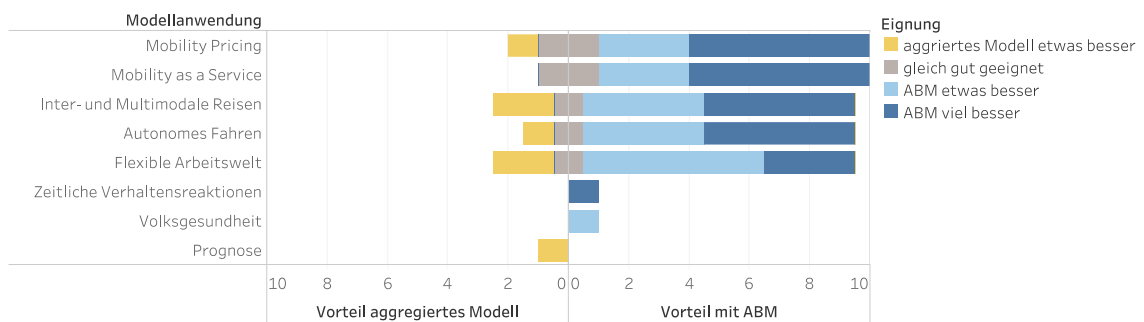


Abb. 23 Einschätzung zur besseren Eignung der aktivitätsbasierten Modelle für zukünftige Fragestellungen

Am vorteilhaftesten wird die Verwendung von aktivitätsbasierten Modellen beim Abbilden von *Mobility Pricing* und *Mobility-as-a-Service*-Angeboten eingeschätzt. Als Hauptgrund wird dabei die Möglichkeit aufgeführt, dass aktivitätsbasierte Modelle die zeitliche und räumliche Dynamik bei der Nachfrage besser abbilden können.

Als relevanteste Vorteile der ABM für *Mobility Pricing* Anwendungen wurden insbesondere die tourbasierte Verkehrsmittelwahl, die mögliche Differenzierung der Zahlungsbereitschaften nach Einkommen sowie das Abbilden der zeitlichen Flexibilität je nach Art des

Arbeitsplatzes genannt. Gleichzeitig geben aber mehrere Experten zu bedenken, dass eine solche Differenzierung nur möglich sei, wenn die entsprechenden Variablen auch in der synthetischen Population korrekt abgebildet sind und Verhaltensmodelle vorliegen, welche eine Differenzierung beschreiben. Zusätzlich sei eine Unterteilung der Arbeitsplätze nach zeitlicher Flexibilität in der synthetischen Population nicht trivial und würde heute in der Praxis noch nicht umgesetzt.

Bei der Modellierung von *Mobility-as-a-Service*-Angeboten liegt die zentrale Herausforderung bei der Abbildung der zeitlichen und räumlichen Dynamik. Hier wurde wiederholt darauf hingewiesen, dass ABM hier zwar bezüglich der Abbildung der zeitlichen Dynamik Vorteile bieten, aber insbesondere die Abbildung der räumlichen Effekte eine Rückkopplung von Angebot und Nachfrage mit einem agentenbasierten Simulationsmodell voraussetzt, was bisher aber primär in Forschungsprojekten umgesetzt wurde.

Deutliche Vorteile sehen die befragten Experten auch bezüglich der Möglichkeit mit aktivitätsbasierten Modellen inter- und multimodale Wege abzubilden. Aufgrund der vielfältigen Verkehrsmittelkombinationen, insbesondere beim Bahnzugang, ergeben sich bei aggregierten Modellen Einschränkungen, da eine Erhöhung der zu berücksichtigten Modi sich immer direkt auf die Anzahl der vorzuhaltenden Matrizen und somit auf dem Speicherbedarf niederschlägt. Es wurde aber auch angemerkt, dass in der Praxis mit pragmatischen Vereinfachungen auch mit aggregierten Modellen gute Ergebnisse erzielt werden können. Zum Beispiel kann über zusätzliche Anbindungen an ausgewählte ÖV-Haltestellen der Erreichbarkeitsgewinn, den zusätzliche Zugangsmodi bieten, gut abbildet werden. Gleichzeitig wurde aber auch mehrfach angeführt, dass aggregierte Modelle für die methodisch konsistente Abbildung inter- und multimodale eigentlich ungeeignet sind, da hier die Verfügbarkeit von Verkehrsmitteln auf einzelnen Wegen einer Tour nicht konsistent abgebildet werden kann.

Grundsätzlich sind sich die befragten Experten darin einig, dass sich aktivitätsbasierte Modelle besser zum Abbilden der Verhaltensreaktionen eignen, die eine flexiblere Arbeitswelt ermöglicht. Insbesondere die Möglichkeit die zeitliche Komponente explizit abbilden zu können wird als Vorteil erachtet. Ebenso bietet die Berücksichtigung von heterogenen Nutzergruppen bessere Möglichkeiten die Verfügbarkeit flexibler Arbeitsarrangements sowie der Zielwahleffekte im Modell abzubilden, die *work from home* und flexible Arbeitsplätze bedingen und auch Veränderungen bezüglich weiterer Aktivitätsarten nach sich ziehen. Wie bei *Mobility Pricing* setzt aber auch die Modellierung von Effekten einer flexibleren Arbeitswelt entsprechende Verhaltensmodelle voraus, die auf die in der synthetischen Population verfügbaren Attribute abgestimmt sind. Gleichzeitig gaben verschiedene Experten auch zu bedenken, dass die wichtigsten Effekten von *work from home* auch gut mit aggregierten Modellen abgebildet werden können und aufgrund des Mangels an detaillierten Verhaltensdaten die möglichen Vorteile von ABM gar nicht wirklich zum Tragen kommen.

Bezüglich der Eignung der verschiedenen Modellansätze Szenarien mit autonomen Fahrzeugen abzubilden, muss stark nach den konkreten Anforderungen und Fragestellung unterschieden werden. Gewisse Fragestellungen können in vereinfachter Weise angegangen. Um die positive Wirkung von autonomen Fahrzeugen auf die Strassenleistungsfähigkeit abzubilden können zum Beispiel unabhängig vom Modelltyp vereinfacht für einen Teil der Nachfrage geringere Fahrzeugäquivalente angenommen werden und streckenspezifisch die *capacity-restraint*-Funktionen angepasst werden. Sollen jedoch auch Leerfahrten und neue Mobilitätsangebote, welche mit autonomen Fahrzeugen angeboten werde abgebildet werden, bedarf es dazu einen Einsatz von agentenbasierten Simulationsmodellen mit Rückkopplung auf ein räumlich-zeitlich differenziertes Nachfragemodell. Eher zurückhaltend äussern sich die verschiedenen Interviewpartner bezüglich der Relevanz von Fragestellungen zum autonomen Fahren. Es wird erwartet, dass es noch Jahrzehnte dauert bis diese Technologie breit am Markt einführt sein wird und somit für praktische Anwendungen abgebildet werden muss.

4.4.4 Zwischenfazit

Aufgrund neuer Angebotsformen und flexibleren Mobilitätsbedürfnissen erhöhen sich die Anforderungen an die Verkehrsmodelle. Aufgrund der konsistenteren Methodik bei der Beschreibung der Verkehrsnachfrage bieten aktivitätenbasierte Modellansätze hier Vorteile. Zugleich stellen sich aber auch erhöhte Anforderungen an die Verhaltensmodelle und der dafür notwendigen Datenquellen.

Die Erfahrung in der US-amerikanischen Praxis, aber auch mit SIMBA MOBi in der Schweiz zeigen, dass mit aktivitätenbasierten Modellansätzen mit den bestehenden Verhaltensdaten aus Wegtagebüchern komplexere Verhaltensreaktionen abgebildet werden können als dies mit aggregierten Modellen möglich ist. Zum Beispiel kann so die Wechselwirkung zwischen der Reisedauer zum Arbeitsort und der Anzahl von Freizeit- und Einkaufsaktivitäten im Modell abgebildet werden.

Zur Realisierung anderer Vorteile bedarf es aber neuer Verhaltensdaten, beispielsweise um die Wirkung einer fahrleistungsabhängigen Verkehrsfinanzierung auf den Mobilitätswerkzeugbesitz sowie die Ziel- und Verkehrsmittelwahl abbilden zu können. Ebenso bedarf es neuer Verhaltensmodelle, um die vielschichtige Wirkung einer Einführung von Mobility Pricing in Bezug auf die Abfahrtszeit, Ziel- und Verkehrsmittelwahl zu beschreiben und dabei auch verschiedene soziodemographische Variablen zu berücksichtigen, die bei Verwendung eines aktivitätenbasierten Ansatzes über die synthetische Population zur Verfügung stehen.

Gleichzeitig ist klar, dass auch mit aggregierten Modellen und vergleichbar geringem zusätzlichem Aufwand einige der wichtigsten Effekte solcher Fragestellungen beantwortet werden können. Zum Beispiel lässt sich die Wirkung einer vermehrten Nutzung von *work from home* einfach über eine Anpassung der Erzeugungsraten abbilden. Aufgrund Fokussierung auf einzelne Wege und der Aggregation der Nachfrage ist Abbildung komplexerer Verhaltensreaktionen aber eingeschränkt.

Die Mehrheit der interviewten Experten aktivitätenbasierten Modelle, insbesondere bezüglich der Bearbeitung von Fragestellungen, die in Zukunft eine höhere Relevanz haben und klare Vorteile bieten könnten. Dafür braucht es jedoch mehr Forschungsarbeit und Erfahrung bei der Arbeit mit den Modellen. Zudem wurde verschiedentlich angemerkt, dass aktivitätenbasierte Modelle aufgrund der Flexibilität eine bessere Ausgangslage zur Beantwortung neuer Fragestellungen bieten könnten, die heute noch nicht absehbar sind.

4.5 Erfahrungen mit aktivitätenbasierten Modellen in der Praxis

Von den sieben interviewten Experten ohne eigene praktische Erfahrung mit aktivitätenbasierten Modellen gaben vier an, dass sie die aktuellen Entwicklungen in diesem Bereich aktiv durch den Besuch von Konferenzen und/oder die Lektüre von Fachartikeln verfolgen. Den anderen drei Interviewpartnern sind zwar die Grundsätze aktivitätenbasierter Modellansätze geläufig, sie setzten sich bisher jedoch nicht vertieft mit der Materie auseinander.

Unter den interviewten Experten, die bisher keine eigene praktische Erfahrung mit aktivitätenbasierten Modelle gesammelt haben, stellen sich vor allem noch Fragen zur allgemeinen Vorgehensweise, der Kalibration und der verwendeten Software zur Erstellung der Modelle. Dabei herrscht im deutschsprachigen Raum der Eindruck vor, dass sich bei Implementierung von aktivitätenbasierten Nachfragemodellen noch kein einheitliches Vorgehen als Standard durchgesetzt hat und die einzelnen Modellentwickler von aussen nicht immer nachvollziehbaren Präferenzen für die eine oder andere Vorgehensweise vorbringen. Zudem wurde angemerkt, dass es aufgrund der verfügbaren Dokumentationen nicht immer klar sei, wie bestimmte Einstellungen zu Stande kommen und die schlussendlich verwendeten Parameter nicht konsequent bezüglich der Konsistenz mit Ergebnissen von Verhaltensmodellen geprüft werden.

Daher wird in diesem Teilkapitel beispielhaft aufgezeigt, wie aktivitätenbasierte Modelle in der Praxis heute eingesetzt werden. Dabei wird der Schwerpunkt auf ausgewählte Aspekte

der Implementierung und des Betriebs der Modelle gesetzt. Auf eine detaillierte und umfassende Dokumentation der erwähnten Modelle wird jedoch verzichtet und auf die entsprechenden Berichte verwiesen.

4.5.1 Erfahrung in den USA

Travel Demand Model der Atlanta Regional Commission

Gründe für die Einführung und Verwendung eines aktivitätenbasierten Modellansatzes

Im Fall der Region Atlanta entstanden bei der Planung der dynamischen bemaßten Autobahnspreuen neue Fragestellungen bezüglich der Nutzung und der Wirkung dieser Infrastrukturen. Dass sich der aktivitätenbasierte Ansatz besser zur Beantwortung dieser Fragestellungen eignet, war ein Hauptgrund für den Entscheid der Atlanta Regional Commission (ARC) ein solches Modell einzuführen. Ebenso empfanden die für die Modellentwicklung und -pflege verantwortlichen Personen, dass «das Leben insgesamt komplexer wird» und die Modelle die Fähigkeit haben, müssen diese Komplexität abbilden zu können. Rückblickend habe sich gerade auch diese Einschätzung bewahrheitet, da nicht nur die Aktivitäten, die in einem Haushalt an einem typischen Tag ausgeführt vielfältiger und voneinander abhängiger geworden sind, sondern sich auch neue Angebotsformen wie zum Beispiel *hailing* im Markt durchgesetzt haben.

Ein weiterer, in der US-amerikanischen Praxis relevanter Beweggrund wird in den besseren Auswertungsmöglichkeiten gesehen. Insbesondere in den letzten Jahren wurden Fragestellungen zur Verteilungsgerechtigkeit von Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur (transport equity) immer wichtiger. Aktivitätenbasierte Modelle bieten hier die Möglichkeit, dass die Wirkung von Massnahmen personenspezifisch und somit für verschiedene soziodemographische Gruppen und räumliche Gebiete ausgewertet werden können.

Wie auch in anderen amerikanischen Städten, haben in Atlanta verkehrsplanerische Fragestellungen im Bereich der ÖV-orientierten Siedlungsentwicklung (*transit oriented development*) an Relevanz gewonnen. Eine Frage, welche die Modellierer dabei beschäftigt hat, ist wie mit dem Modell methodisch sauber abgebildet werden kann, dass insbesondere in *transit oriented developments* Haushalte vermehrt auf ein Auto verzichten und sich dieser Umstand auf das Verkehrsverhalten niederschlägt. Dabei spielen auch Überlegungen rund um die Problemstellung des «*aggregation bias*» sowie der Berücksichtigung der PW-Verfügbarkeit bei nicht-heimgebunden Wege eine wichtige Rolle.

Modellentwicklung

Die von der Atlanta Regional Commission verwendete Coordinated Travel Regional Activity-Based Modeling Platform (CT-RAMP) wurde vom Ingenieurberatungsunternehmen WSP entwickelt und wird derzeit in 17 Metropolregionen in den USA eingesetzt. Das Modell basiert auf einer synthetischen Bevölkerung mit den Ebenen Haushalte und Personen und beschreibt die Verkehrsnachfrage mittels einer Serie von mit Befragungsdaten geschätzten Entscheidungsmodellen, wobei hier zwischen lang- und kurzfristigen Entscheiden sowie tour- und wegspezifischen Dimensionen differenziert wird (Abb. 24). Je nach den Anforderungen der Fragestellung werden jeweils verschieden Entscheidungsdimensionen berücksichtigt.

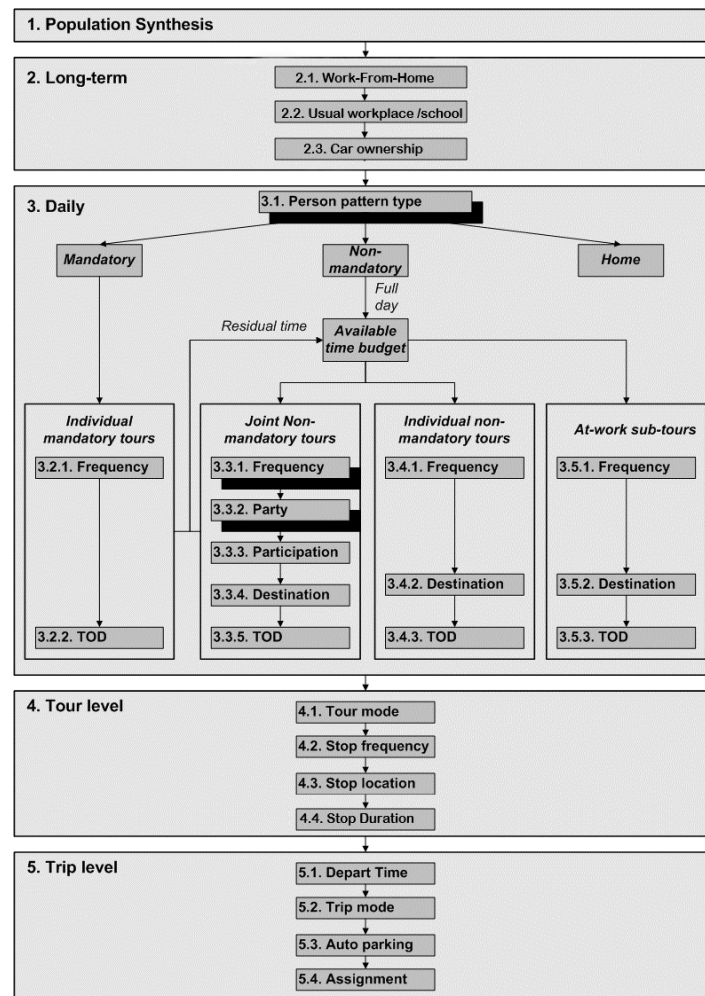


Abb. 24 Modellübersicht von CT-RAMP des Modells für die Region Atlanta (Quelle: atrlregional.github.io)

Die für die einzelnen Modelle berücksichtigte räumliche Auflösung unterscheidet knapp 6000 Verkehrszonen. Die zeitliche Auflösung basiert auf einer Aufteilung eines Tages in Intervalle von 30 Minuten. Die Berechnung der Streckenbelastungen, und somit der für die Modelle verwendeten Reisezeitmatrizen erfolgt aufgrund von fünf Tageszeitperioden für die die Nachfrage des aktivitätenbasierten Modells in entsprechende Quell-/Zielmatrizen aggregiert wird.

Obschon der aktivitätenbasierte Modellansatz im Prinzip keiner übergeordneten Segmentierung von Nutzergruppen bedarf, unterscheidet CT-RAMP für alle Modelle zwischen den gleichen acht Nutzergruppen. Bezüglich der Aktivitäten werden zehn Arten von Aktivitäten und somit Wegzwecken unterschieden. Auf Ebene Weg wird zwischen 15 verschiedenen Verkehrsmitteln unterschieden, wobei nicht alle Verkehrsmittel für alle Nutzergruppen und Wegzwecke zur Verfügung stehen (z.B. Schulbus).

Die Atlanta Regional Commission hat auf der Website atrlregional.github.io das Modell samt Resultaten der Kalibrierung und Validierung detailliert dokumentiert. In den folgenden Abschnitten wird daher nur auf spezifische Aspekte des Modells eingegangen, die im Austausch mit der Begleitkommission als besonders relevant für die Beurteilung im Rahmen einer Entscheidungshilfe identifiziert worden sind.

Das Personenwagenbesitzmodell berücksichtigt auch die Erreichbarkeit eines Wohnorts mit dem Auto und dem ÖV. Somit kann die Wirkung eines Infrastrukturausbaus auf den Mobilitätswerkzeugbesitz abgebildet werden.

Eine Besonderheit von CT-RAMP ist die explizite Berücksichtigung von Wechselwirkungen innerhalb eines Haushalts über verschiedene Verhaltensmodelle. Neben den in Abb. 24 schwarz hinterlegten Teilmodellen, berücksichtigt auch das Zielwahlmodell zur Bestimmung des Arbeits- und Ausbildungsorts solche Wechselwirkungen. Auf Ebene der kurzfristigen Entscheide beschränken sich die Wechselwirkungen auf die Modelle zur Definition der Häufigkeit und Teilnahme an Ausgängen (Touren) mit Freizeit- oder Einkaufscharakter sowie dem Entscheid zu Hause zu bleiben. Die berücksichtigten Wechselwirkungen umfassen die Dimensionen Ausgangshäufigkeit, Teilnehmende, Zielwahl, und Tageszeit.

Ausgängen, die am Arbeits- oder Ausbildungsort starten und enden, werden mit zusätzlichen Modellen erfasst, welche deren Häufigkeit nach Ausgangsart sowie die gewählte Zielzelle beschreiben.

Die Wahl der Tageszeit und Dauer für alle Ausgänge erfolgt über eine Kombination der Start- und Ankunftszeit. Aufgrund der 30-Minutenintervalle ergeben sich so für einen Tag 1'176 Alternativen.

Die Wahl des Verkehrsmittels auf Ebene einzelner Ausgänge (Tour) erfolgt mittels eines dreistufigen *nested logit* Modells. Auf der höchsten Ebene wird zwischen Auto, ÖV, nicht-motorisiert und anderen Modi unterschieden. Die zweite Ebene beschreibt die Wahl zwischen verschiedenen Zugangsformen (Fuss, K+R und P+R) im ÖV, Selbstfahren/Mitfahren bei Autofahrten sowie Fuss vs. Velo bei den nicht-motorisierten Modi. Auf der dritten Ebene erfolgt eine weitere Unterteilung beim MIV zwischen bemauteeten und nicht-bemauteeten Strassen und im ÖV zwischen normalen ÖV-Linien und S-Bahn mit direkten Feederbussen. Die Wahl erfolgt aufgrund Tour-basierten, tageszeitabhängigen *level of service* – Matrizen zwischen den Hauptaktivitätsorten. Somit wird gewährleistet, dass die Verbindungsqualität zur gegebenen Startzeit sowohl auf dem Hin- wie auch dem Rückweg bei der Verkehrsmittelwahl berücksichtigt wird.

Die Anzahl und Wahl der Ziele für weitere Nebenaktivitäten, die während einem Ausgang zwischen Wohnort und Arbeits-/Ausbildungsplatz besucht werden, erfolgt mit weiteren Entscheidungsmodellen. Zunächst wird in Abhängigkeit der Hauptaktivität, Dauer des Ausgangs, sowie räumlichen und soziodemographischen Variablen die Anzahl von Nebenaktivitäten einer Tour bestimmt. Die Wahl der Standorte für diese Nebenaktivitäten erfolgt unter Berücksichtigung der Hauptaktivitätsorte, des für die Tour gewählten Verkehrsmittels und der sich daraus jeweiligen *level of service* zwischen den Haupt- und Nebenaktivitätsorten. In weiteren Modellen wird die Dauer der Nebenaktivitäten und die Wahl des Verkehrsmittels für die einzelnen Wege bestimmt, wobei hier die Verfügbarkeit verschiedener Verkehrsmittel direkt aufgrund des für die Tour gewählten Verkehrsmittel vorgegeben wird. Somit wird zum Beispiel gewährleistet, dass bei einer Tour mit dem Velo das eigene Auto nicht für einzelne Wege als Verkehrsmittel zur Verfügung steht. Als Besonderheit von CT-RAMP wird abschliessend bei Wegen mit dem Auto in die Innenstadt über ein Parkplatzwahlmodell bestimmt, ob das Auto direkt am Aktivitätsort oder in benachbarten Zonen (mit ev. geringeren Kosten) parkiert wird.

Alle Modelle wurden mit Verhaltensdaten einer Verkehrstagebuchbefragung geschätzt, die um räumliche und verkehrliche Variablen (*level of service*) ergänzt worden sind. Im Rahmen der Modellkalibration wurden die Resultate der einzelnen Modelle jeweils mit den tatsächlichen Verteilungen verglichen und einzelne Modelle bezüglich der Konstanten angepasst. Damit konnte zum Beispiel sichergestellt werden, dass das Modell keine unrealistisch kurzen Arbeitsaktivitäten generiert. Ebenso wurde das Zielwahlmodell nachträglich über zusätzliche, distanzband-spezifische Konstanten angepasst um sicherzustellen, dass die beobachtete Distanzverteilung möglichst gut getroffen wird. Bei der Kalibration des Verkehrsmittelwahlmodells wurde darauf geachtet, dass die modellierten Anteile auch differenziert nach Einkommensgruppen mit den Verhaltensdaten übereinstimmen.

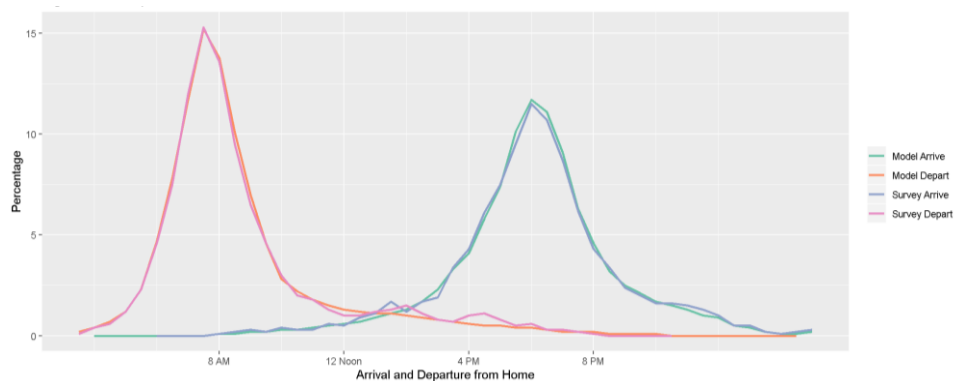
Damit einer Zone die richtige Anzahl an Arbeit- und Ausbildungsaktivitäten zugeordnet wird (Randsummenabgleich), wird ein Schattenpreisansatz eingesetzt. Dabei wird bei der Zielwahl iterativ vorgegangen und aufgrund der Diskrepanz zwischen der durch das Modell zugewiesenen und vorhandenen Arbeits- und Ausbildungsplätzen als zonenspezifische

Konstante (Schattenpreis) zugewiesen. Dieser wird iterativ angepasst bis die Diskrepanz ein im Voraus definiertes Mass unterschreiten.

Die Berechnung der verkehrlichen Variablen (level of service) erfolgt mit der Software mit der das Umlegungsmodell berechnet wird. Dabei werden neben belastungsabhängigen Streckenwiderständen auch detaillierte Angebotscharakteristiken wie zum Beispiel Streckentyp spezifische Widerstandsfunktionen und Knotenwiderstände berücksichtigt.

Die Ergebnisse zur Schätzung und Kalibrierung der einzelnen Modelle zeigen, dass auch ein derart komplexes Nachfragemodell gut auf die vorliegenden Verhaltensdaten abgestimmt werden kann (Zwei Beispiele sind in Abb. 25 aufgeführt. Viele weitere Vergleiche sind auf der Website von CT-Ramp aufgeführt³⁰. Aufgrund der Art der Kalibrierung mit zusätzlichen, alternativen-spezifischen Konstanten sind die kalibrierten Modelle auch weiterhin prognosefähig.

Vergleich zwischen den modellierten und beobachteten Abfahrtszeiten von Touren mit Hauptaktivität Arbeiten in CT-Ramp



Vergleich zwischen den modellierten und beobachteten Distanzverteilungen für Einkaufswege in CT Ramp

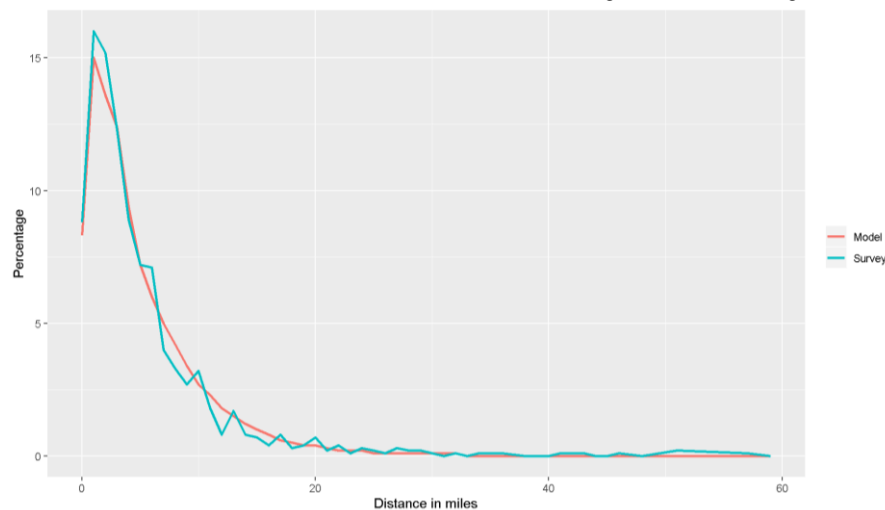


Abb. 25 Vergleich zwischen Modell und Beobachtung für zwei Teilmodelle der Verkehrsnachfrage in CT-Ramp

Die aus den verschiedenen Teilmodellen resultierende Nachfrage wird automatisiert zu Quell-/Zielmatrizen aggregiert und mit einer der etablierten Softwarepakete (derzeit Cube Voyager) auf die Angebotsnetze umgelegt. Dabei werden das Nachfragemodell und die Umlegung

³⁰ https://atregional.github.io/ARC_Model/TourModelCalibration.html
https://atregional.github.io/ARC_Model/StopandModeChoiceModel.html

so lange iteriert bis das System konvergiert, also die Kenngrößenmatrizen zwischen zwei Iterationen nur geringe Abweichungen aufweisen.

Wie auch bei aggregierten Modellen üblich, wurde aufgrund der Differenzen zwischen Strassenzähldaten und den Umlegungsergebnissen ein weiterer Kalibrierungsschritt durchgeführt. Aufgrund der beobachteten Differenzen der mit dem aktivitätenbasierten Nachfragemodell generierten Verkehrsmengen wurde mit einer Fratarprozedur iterativ eine Korrekturmatrix erstellt. Um sicherzustellen, dass diese Korrekturmatrix keine systematischen Fehler korrigiert, wurde geprüft, ob Korrelationen mit verschiedenen im Nachfragemodell verwendeten Variablen auftreten, was aber nicht der Fall war. Diese Korrekturmatrix wird je nach Anwendungsfall zur Nachfragematrix addiert, die das aktivitätenbasierten Nachfragemodell generiert.

Die abschliessende Validierung des Modells (mit Korrekturmatrix) erfolgt basierend auf einem Vergleich der modellierten Verkehrsströme mit den für den Strassenverkehr und den ÖV vorliegenden Zählwerten. Bei Strassen wird dabei eine Regressionskoeffizient von 0.9502 erreicht, der relative RMSE beträgt für Strecken mit mehr als 5000 Fahrzeugen 18% (Abb. 26).

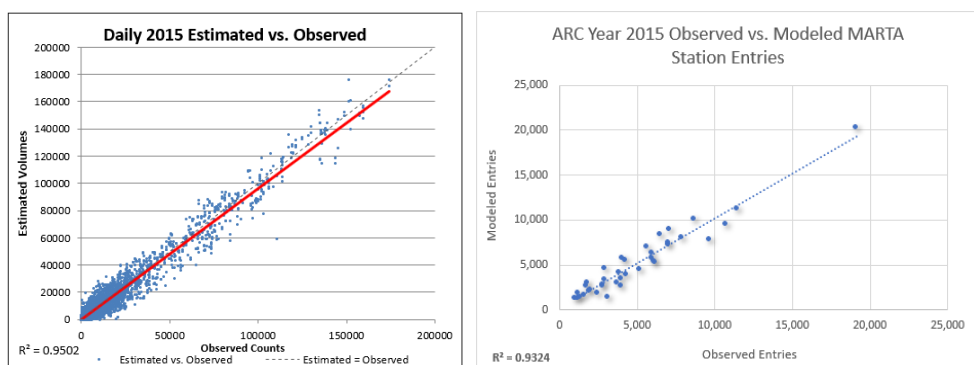


Abb. 26 Vergleich zwischen modellierten DTV-Verkehrsmengen (y-Achse) und Zählwerten des aktivitätenbasierten Verkehrsmodells der Region Atlanta, links Streckenbelastungen im Strassenverkehr (alle Tageszeiten), rechts Einsteiger S-Bahn (Quelle: atrlregional.github.io)

Modellbetrieb

Das Nachfragemodell wurde in Java implementiert und kann über eine für CT-RAMP entwickelte Software mit einfacher graphische Nutzeroberfläche ohne Programmierkenntnisse konfiguriert werden. Diese Software automatisiert auch den Datenaustausch zwischen dem Nachfragemodell und der für die Umlegung verwendeten Software. Dieser hybride Ansatz, erlaubt es Anwendern für Modellauswertungen und Darstellungen auch auf weitere «off the shelf» Softwareprodukte, z.B. zur Datenanalyse und -visualisierung zuzugreifen.

Um die Risiken der Modellentwicklung besser im Griff zu haben wurde, das Modell stufenweise entwickelt und in Betrieb genommen. Dabei wurden die Ergebnisse des neuen, aktivitätenbasierten Modells systematisch mit dem bestehenden, aggregierten Modell verglichen. Der Modellwechsel erfolgte nachdem anhand verschiedener Fallstudien gezeigt werden konnte, dass das aktivitätenbasierten Modell glaubwürdige und massnahmensensitive Resultate liefert. Nach einer Übergangszeit von knapp zwei Jahren wird heute für alle Fragestellungen nur noch das aktivitätenbasierten Modell eingesetzt und das aggregierte Modell nicht weiter gepflegt.

Bei den Modellvergleichen und im Betrieb zeigen sich die Vorteile des neuen Modells insbesondere bezüglich der guten und sehr nachvollziehbaren Möglichkeiten zur Abbildung verschiedener Verhaltensdimensionen auf Ebene Haushalt, Person, Aktivitätenpläne und

Verkehrsmittelwahl. Diese erlauben es mit den Modellen bestehende Fragestellungen differenzierter zu beantworten (z.B. Mobility Pricing und Emissionen). Es zeigte sich auch, dass das Modell sich gut für neue Fragestellungen angepasst werden kann (z.B. *transport equity*, *Mobility as a Service*), die beim Entwurf des Modells nicht berücksichtigt worden sind.

Obschon das Nachfragemodell eine zeitliche Auflösung von 30 Minuten aufweist, erfolgt die Berechnung der Streckenbelastungen aufgrund einer Aggregation der Nachfrage für Tageszeitperioden. Das Zusammenspiel zwischen der aktivitätenbasierten Verkehrsnachfrage und einem *dynamic traffic assignment* Ansatzes (DTA) wurde bereits in angewandten Forschungsprojekt in Angriff genommen. Dabei zeigte sich, dass das Nachfragemodell die dafür notwendige Granularität aufweist, es aber bei der Spezifikation der Angebotsdaten zusätzliche Arbeitsschritte notwendig sind. Aufgrund der langen Laufzeiten des DTA erscheint eine Rückkopplung zwischen DTA und dem Nachfragemodell derzeit ausser Frage.

Für den Betrieb des Modells hält die Atlanta Regional Commission einen Rechnerserver mit 512 GB RAM und 64 Prozessoren mit je 2 Threads vor auf dem mehrere Rechenläufe gleichzeitig laufen können. Im Fall des Modells für Atlanta mit knapp 6000 Zonen beträgt die Rechenzeit mit allen Rückkopplungen rund 26h. Es wurde auch geprüft, inwiefern es sich lohnt cloudbasierte Rechnerserver einzusetzen. Aufgrund der heutigen Kostenstruktur solcher Services (Cube Cloud respektive AWS) hat sich herausgestellt, dass sich solche Server gut für den kurzfristigen Ausbau von Rechenressourcen eignen, als Ersatz für den eigenen Server aber langfristig zu teuer sind.

Weitere Erfahrungen mit aktivitätenbasierten Modellen in den USA

Während im vorigen Unterkapitel eine detaillierte Betrachtung eines aktivitätenbasierten Modells im Vordergrund stand, zielt dieses Unterkapitel darauf ab, weitere im Rahmen der Experteninterviews geäußerten Erfahrungen bei der Entwicklung und Anwendung solcher Modelle in den USA zusammenzufassen.

Neben funktionalen Gründen, die in der Regel sehr ähnlich gelagert sind wie im Fall von Atlanta, spielte der Umstand, dass andere Regionen bereits aktivitätenbasierten Modelle im Einsatz haben, eine wichtige Rolle beim Entscheid ein aktivitätenbasiertes Verkehrsmodell zu entwickeln. Dabei wurde den Argumenten der demonstrierten Machbarkeit und des Bedürfnisses den letzten Stand der Technik einsetzen zu wollen eine ähnlich grosse Bedeutung beigemessen.

Die Anzahl der Beratungsunternehmungen, die praktische Erfahrung mit der Entwicklung aktivitätenbasierten Modelle vorweisen können, beschränkt sich derzeit auf rund fünf Firmen. Diese verwendeten, wie auch im Beispiel von WSP und Atlanta gezeigt, in der Vergangenheit für die Implementierung des Nachfragemodells eigene Softwareprodukte, die den Betreibern jeweils kostenfrei zur Verfügung gestellt und auf die jeweiligen Bedürfnisse angepasst wurden. Seit 2015 haben sich aber mehrere Modellbetreiber zusammenschlossen, um gemeinsam die Entwicklung der Software ActivitySim³¹ voranzutreiben (siehe auch Abschnitt 3.2.1).

Bezüglich der Modellarchitektur folgt ActivitySim stark dem Ansatz von CT-Ramp, ist aber in Python geschrieben und als Open Source frei verfügbar. Damit werden die übergeordneten Ziele verfolgt, die Nachfragemodelle methodisch transparenter zu machen und den Entwicklungs- und Wartungsaufwand der Software effizienter zu gestalten. Die Region SEMCOG rund um Detroit, Michigan USA hat bereits 2018 ein multimodales ABM in ActivitySim aufgebaut und mit TransCAD für die Umlegungen gekoppelt. Für ein Modell mit 1,9 Mio. Haushalten, 2900 Verkehrszellen und drei kompletten Schlaufen Erzeugung inklusive Umlegung werden auf einem Server (12 Kerne, 128 GB RAM) 14h Rechenzeit benötigt (RSG, 2020).

³¹ <https://activitysim.github.io>

Bei allen Modellentwicklungen wurde grosser Wert auf die Kalibrierung der verschiedenen Teilmodelle sowie der Validierung mit Zähldaten gelegt. Ein interviewter Experte hat sich bezüglich der Validierung daher gehend geäussert, dass im Vergleich mit den aggregierten Modellen mehr Wert auf die Überprüfung der Sensitivität des Modells gelegt wird als auf die Reproduktion der Zähldaten. Dies hänge einerseits mit dem Umstand zusammen, dass eine automatisierte Anpassung der Nachfragematrix mit einem aktivitätenbasierten Ansatz nicht einfach umsetzbar ist. Andererseits wird damit dem Umstand Rechnung getragen, dass aktivitätenbasierten Modelle eine höhere Anzahl von Teilmodellen umfassen und somit höhere Anforderungen an die Überprüfung der Sensitivität stellen.

In allen den interviewten Experten bekannten Fällen wurde das aktivitätenbasierte Modell zunächst parallel mit dem bestehenden, aggregierten Verkehrsmodell betrieben. Erst nachdem mit dem Modell bezüglich des Umgangs und der Ergebnisse genügend Erfahrungen gemacht werden konnte, wird das aktivitätenbasierte Modell für praktische Anwendungen eingesetzt. In allen den interviewten Experten bekannten Fällen wurde aber nach einer gewissen Zeit das aggregierte Modell zu Gunsten des aktivitätenbasierten Modells aufgegeben.

Damit der Wechsel von einem aggregierten zu einem aktivitätenbasierten Modell gelingt, werden jeweils auch Weiterbildungsprogramme für die Mitarbeitenden beim Betreiber, aber auch bei den Modellanwendern unternommen. Einige Betreiber organisieren auch regelmässige Nutzermeetings, um die Weiterbildung am Modell sicherzustellen.

Um dem Umstand gerecht zu werden, dass Entwicklung und Betrieb von aktivitätenbasierten Modellen andere Anforderungen an die Mitarbeitenden und das Arbeitsumfeld stellt, ging mit der Einführung in einzelnen Fällen auch organisatorische Änderungen einher, zum Beispiel der Zuteilung der Verkehrsmodellierung in das Aufgabenfeld des Chief Technology Officers (CTO).

Die Erfahrung in den USA zeigt, dass die Entwicklung von aktivitätenbasierten Modellen einen rund 30-50% höher Aufwand nach sich zieht, als dies bei aggregierten Modellen der Fall ist. Dies wird aber von den dortigen Entscheidungsträgern bewusst in Kauf genommen, da sich gemäss deren Einschätzung die aktivitätenbasierten Modelle besser für die jeweils vorliegenden planerischen Fragestellungen eignen. Gleichzeitig ist aber auch klar, dass aktivitätenbasierten Modelle derzeit vor allem von grösseren Modellbetreibern eingesetzt werden, die über mehrere Mitarbeitende verfügen, die sich ausschliesslich mit der Anwendung und Weiterentwicklung der Modelle beschäftigen. In dieser Konstellation sei es einfacher, dass Mitarbeitenden das notwendigen Spezialwissen zu entwickeln, um alle Aspekte der Modellanwendung auch in komplexen Projekten selbst abdecken und die Weiterentwicklung der Modelle in Partnerschaft mit externen Beratern mitvorantreiben zu können. Dementsprechend sind auch in den USA aggregierte Modellansätze in der Praxis derzeit deutlich weitverbreiteter als aktivitätenbasierte Modelle.

4.5.2 SIMBA MOBi

Während die wichtigsten Eckpunkte zur Modellarchitektur von SIMBA MOBi bereits in Kapitel 3.2.3 dargelegt ist, werden in diesem Abschnitt weitere Aspekte beleuchtet, die im Rahmen der Experteninterviews hervorgehoben sind. Diese umfassen neben organisatorischen Aspekten auch Hinweise auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede zur Modellierungspraxis in den USA.

Im Fall der SBB stand am Anfang des Entscheids, ein aktivitätenbasiertes Verkehrsmodell zu entwickeln, die Einsicht, dass es im Unternehmen ein langfristiges Bedürfnis gibt, Verkehr von Tür-zu-Tür über multi- und intermodale Wegeketten abbilden zu können. Ebenso wurde der Bedarf formuliert ein besseres Verständnis für die Mobilitätsnachfrage im Allgemeinen und bezüglich der zeitlichen Dynamik im speziellen zu entwickeln. Zudem war es dem Management wichtig bezüglich dem Thema Innovation eine Führerschaft einzunehmen. Diese Strategie machte sich in der Umsetzung dahingehend bezahlt, dass es möglich war hochqualifizierte Leute zu rekrutieren und eine hohe Motivation der Mitarbeitenden zu erreichen.

Bezüglich der Architektur des aktivitätenbasierte Nachfragemodells verfolgt SIMBA MOBi einen ähnlichen Ansatz, wie er in der US-amerikanischen Praxis angewendet wird (Abb. 27). Mit einer Vielzahl von Entscheidungsmodellen wird zunächst die Anzahl von Ausgängen und weiteren Schritten die Zielwahl der Hauptaktivitäten sowie Anzahl und Ort weiterer Aktivitäten beschrieben. Das aktivitätenbasierte Nachfragemodell (MOBi.Plans) wurde dabei mit externen Entwicklungspartnern in Python implementiert. Die Datenhaushaltung erfolgt mit PTV Visum, das mit der neuen Modellversion 2020 auch Datenstrukturen für die aktivitätenbasierte Nachfragemodellierung anbietet.

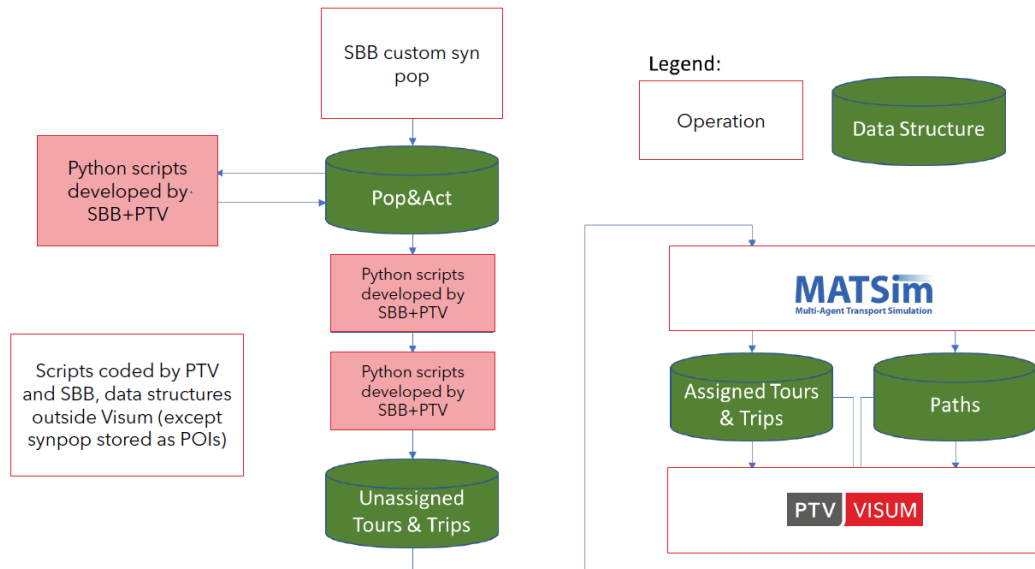


Abb. 27 Systemskizze von SIMBA MOBi, dem ABM Ansatz der SBB (Quelle: (Joshi, 2019))

Im Gegensatz zu den aktivitätenbasierten Modellen in den USA wird bei SIMBA MOBi an Stelle des Umlegungsmodells mit der agenten-basierten Simulationsmodell MATSim gearbeitet. Dabei werden Rückkopplungen bezüglich der Verkehrsmittelwahl, Wahl der Abfahrtszeit und der Routenwahl direkt in MATSim abgebildet. Rückkopplung der Angebotskenngrößen erfolgt auch zum Nachfragemodell in der Form von Kenngrößenmatrizen (für Zielwahl, Verkehrsmittelwahl) und von Erreichbarkeiten (für Auto- und Abonnementsbesitz, Erzeugung von Aktivitäten und Wegeketten).

Für die Entwicklung des Modells SIMBA MOBi wurde eine vom Tagesgeschäft abgegrenzte Projektorganisation eingerichtet, neue Mitarbeitende angestellt und mit externen Partnern sowie Hochschulen zusammengearbeitet. Dabei haben sich die Entwicklungsarbeiten über einen Zeitraum von drei Jahren erstreckt. Als zentrale Voraussetzungen für den Projekterfolg werden die Risikotoleranz und fortwährenden Unterstützung des Managements gesehen. Grundlegend war zudem die Bereitschaft des Managements, die für die Modellentwicklung notwendigen Mittel zu investieren.

Bei der Beschreibung des zukünftigen Verkehrsangebots stellt die Erstellung eines zukünftigen Fahrplans bei der Verwendung eines fahrplanfeinen Umlegungs- oder Simulationsverfahrens hohe Anforderungen an den Detaillierungsgrad: Um die Vergleichbarkeit mit dem Ist-Zustand zu gewährleisten bedarf es hier zur Replikation eines zukünftigen Taktfahrplans auch einer Optimierung der wichtigsten Anschlüsse. Diese Anforderungen treffen aber auch bei der Verwendung eines aggregierten Modells mit fahrplanfeiner Umlegung zu.

Bei der SBB hat man beim Einsatz der Open Source Software MATSim die Erfahrung gemacht, dass MATSim einerseits eine sehr leistungsstarke Software mit vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten handelt, andererseits es auch einiges an Expertise und Zusatzaufwand bedurfte, um die Software für die Angebotsplanung der SBB spezifischen Fragestellungen und die Modelllandschaft SIMBA MOBi produktiv einsetzen zu können. So wurde zum Beispiel ein neuer, performanterer Router entwickelt. Ebenso hat die Kalibrierung der

Verhaltensparameter für die verschiedenen Nutzergruppen einiges an Aufwand erfordert. Dabei spielte auch eine entscheidende Rolle, dass in MATSim - anders als bei den aggregierten Modellen - ganze Tagespläne bewertet werden. Die aus *stated und revealed preference* Befragungen abgeleiteten Parameter basieren aber normalerweise auf Datensätzen, die das Verhalten bezüglich der Verkehrsmittel- und Routenwahl auf einzelnen Wegen beschreiben.

4.5.3 MATSim Modell bei den Berliner Verkehrsbetrieben

Die Firma Senozon hat 2012 ein MATSim Modell für die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) entwickelt, welches danach für spezifische Fragestellungen eingesetzt wurde. Gleichzeitig ist bei den BVG ein aggregiertes Verkehrsmodell in Betrieb, das jährlich aktualisiert wird und für alle gängigen verkehrsplanerischen Fragestellungen des ÖV-Betreibers eingesetzt wird.

Aufgrund knapper Personalressourcen und mangelnden Programmierkenntnissen haben sich die Modellierer bei der BVG auf die Weiterentwicklung und Anwendungen des aggregierten Modells konzentriert und alle MATSim Anwendungen an Senozon ausgelagert. Ein weiterer, für die BVG wichtiger Grund weiterhin am aggregierten Modell festzuhalten ist, dass dessen Ergebnisse vor Gericht Bestand haben, was beim MATSim Modell derzeit nicht sicher gegeben ist.

Aufgrund der bei der BVG gemachten Erfahrung werden besonders die vielfältigen Analysemöglichkeiten des MATSim-Modells als Vorteil in Ergänzung zum aggregierten Modell gesehen. Dies erlaube es auch Fragestellungen zu beantworten, die beim Entwurf und der Entwicklung des Modells noch nicht absehbar waren. So wurde das Modell zum Beispiel auch für Marketinganwendungen eingesetzt, um besser zu verstehen welche Nutzergruppen heute eher mit dem Auto unterwegs sind und um potenzielle Neukunden zu identifizieren.

Ein weiterer Vorteil wird in der agenten-basierten Simulation gesehen, die erlaubt auch betriebliche Fragestellungen, wie zum Beispiel mögliche Massnahmen gegen die Pulkbildung von Bussen im Linienbetrieb simulationsbasiert zu beurteilen.

Eine weitere Fragestellung für die das MATSim-Modell eingesetzt wurde, war die Abschätzung der Nachfrage für das on-demand Minibusangebot «Berlkönig». Dabei hat sich gezeigt, dass dieses dynamische ÖV-Angebot mit dem Simulationsmodell korrekt abgebildet werden kann. Aufgrund der verwendeten Verhaltensmodelle überschätzte das MATSim Modell die tatsächliche Nachfrage aber deutlich. Anfangs waren die für die komplexen Simulationen notwendigen Rechenzeiten für den Einsatz in der Praxis auch zu lang. Im Projektverlauf konnte aber die Software deutlich beschleunigt werden. Die Analyse des Minibusangebots mit dem MATSim-Modell erfolgte in Ergänzung zur Beurteilung des Angebots, für welche das aggregierte Modell und die Software MaaS-Modeller von PTV eingesetzt worden ist.

Als grösster Nachteil in der Praxis hat sich aber die Tatsache herausgestellt, dass die Entwicklung des Nachfragemodells komplett durch Senozon besorgt wurde und beim Modellbetreiber keine Kenntnisse vorhanden sind, um das Nachfragemodell zu aktualisieren oder fragestellungsspezifisch anzupassen. Im Rahmen der Modellentwicklung wurden Mitarbeitende zwar in Workshops weitergebildet. Dabei konnten die Mitarbeitenden ein tiefgehendes Verständnis für das Modell erwerben, das Erlernen von Kenntnissen für eigene Modellanwendung war aber im Rahmen der verfügbaren Zeit und den laufenden Verpflichtungen mit Anwendungen des aggregierten Modells nicht möglich.

Grundsätzlich spreche aber nichts gegen eine an Berater ausgelagerte Entwicklung des Nachfragemodells, es bräuchte aber eine Integration der beiden Modelle über eine gemeinsame Datenbasis. So könne eine Art Modellkreislauf entstehen von dem beide Modelle profitieren würden.

Da die meisten Anwendungen keine Anpassung des Nachfragemodells bedürfen, würde es für viele Fragestellungen auch genügen, wenn eine Software mit grafischer Benutzeroberfläche zur Verfügung stehen würde, um zum Beispiel Angebotsanpassungen, Modellläufe und Ergebnisanalysen ohne Programmierkenntnisse umsetzen zu können.

Im Fazit sehen die interviewten Mitarbeitenden der BVG also definitiv Vorteile in der Nutzung von aktivitätenbasierten Modellen in der Praxis. Gemäss ihrer Erfahrung benötigt es für die langfristig erfolgreiche Einführung solcher Modelle aber mehr Zeit bei der Weiterbildung, zusätzliche Personalressourcen, eine verbesserte Integration der Datenbasis mit aggregierten Modellen, Software mit grafischer Nutzeroberfläche zu Bearbeitung der gängigsten Fragestellungen und bei anspruchsvollen Anwendungen zudem eine Ausdifferenzierung der Verhaltensmodelle zur Beschreibung der Verkehrsmittelwahl.

4.5.4 Weitere Erfahrungen

Der Einsatz von simulationsbasierten Ansätzen bringt es *per se* mit sich, dass die Ergebnisse einer gewissen Variabilität unterliegen. Dies betrifft grundsätzlich sowohl die aktivitätenbasierte Nachfragemodellierung als auch die agentenbasierte Verkehrssimulation. Bisher hat sich die Forschung aber mit der praxisorientierten Frage nach der Auswirkung dieser Variabilität auf die Aussagekraft in Anwendungsfällen nur auf der Ebene globaler Kenngrössen, wie zum Beispiel des Modal Splits und der Bewertung der Aktivitätspläne befasst. Für praktische Fragestellungen sei es aber zum Beispiel auch wichtig zu wissen, in welcher Bandbreite sich spezifische Kenngrössen, wie zum Beispiel die Belastung auf bestimmten Strecken und Knoten bewegen, wenn dasselbe Modell für mehrere Simulationsläufe verwendet wird. Eine anwendungsorientierte Masterarbeit, die kürzlich an der ETH erarbeitet wurde, hat sich diesen Fragen nun erstmalig im Kontext von MATSim systematisch angenommen (Guggisberg 2020).

Zur Frage inwiefern simulationsbasierte Variabilität auch die Resultate der aktivitätenbasierten Nachfragemodelle beeinflusst, gibt es gemäss den befragten Experten noch keine spezifischen Untersuchungen. Es wurde aber angemerkt, dass natürlich auch hier das Nachfragemodell theoretisch nicht nur einmal, sondern mehrmals simuliert werden müsste, um eine Aussage über die Bandbreite der simulationsbedingten Unschärfe möglich wäre. Dadurch würde der Rechenaufwand aber massiv ansteigen. Gleichzeitig wird aber erwartet, dass bei einem solchen Vorgehen die grossen und relevanten Verkehrsströme nur sehr geringe Streuungen unterliegen. Daher wird in der Praxis bei der Generierung der Nachfrage auf *ensemble runs* verzichtet (Guggisberg, 2020).

Ein Entwickler von aktivitätenbasierten Modellen sieht zusätzliches Verbesserungspotenzial darin, dass mehr Budget dafür aufgewendet werden sollte, um sicherzustellen, dass die Modelle in Projekten richtig und zuverlässig eingesetzt werden. Modellierer tendieren nach seiner Meinung in der Regel eher dazu, methodische Verbesserungen im Rahmen von Neu- und Weiterentwicklungen der Modelle implementieren zu wollen, wodurch aber die Qualitätssicherung bei den Anwendungen zuweilen leidet.

Dabei passt ins Bild, dass aufgrund der höheren Granularität von aktivitätsbasierten Modellen die Erfahrung gemacht wurde, dass teilweise die Aussagekraft der Modelle überstrapaziert wird. Aktivitätenbasierten Modelle bieten die Möglichkeit Verhaltensreaktionen auf Ebene einzelner Individuen zu analysieren. Dabei muss man sich aber immer wieder vergegenwärtigen, dass die gesamte Nachfrage synthetisiert ist und nur daraus aggregierten Werte die in der Realität tatsächlich beobachten Verkehrsmengen und zu erwartenden Verhaltensreaktionen widerspiegeln. So muss zum Beispiel insbesondere Laien immer wieder bewusstgemacht werden, dass es zwar technisch möglich, aber nicht sinnvoll ist Auswertungen vorzunehmen, die sich auf kleine Gebiete oder wenig befahrene Strecken und Haltestellen beziehen.

Alle Experten, die bereits vertiefte eigene Erfahrungen bei der Erstellung und Anwendung von aktivitätenbasierten Modellen sammeln konnten, stimmen überein, dass der Aufwand zum Implementieren eines solchen Modells deutlich höher ist, als dies bei einem aggregierten Modell der Fall ist. Als Hauptgrund dafür wird die Anzahl der Teilmodelle und deren

Umfang genannt, die bei aktivitätenbasierten Modellen deutlich zahlreicher und aufwendiger sind. Da diese Modelle nur bedingt zwischen verschiedenen Regionen übertragen werden können, nimmt die Modellentwicklung auch dann im Vergleich zu aggregierten Modellen mehr Zeit und Aufwand in Anspruch, wenn man mit der Erstellung aktivitätenbasierter Modelle bereits sehr erfahren ist.

Bei der Kalibration führen zwei Umstände zu einem höheren Aufwand. Einerseits werden die Modellergebnisse von einer grösseren Zahl von Teilmodellen erzeugt, die ihrerseits Möglichkeiten zur Kalibration bieten. Andererseits sind die abgebildeten Verhaltensreaktionen komplexer, da die Nachfrage auch in der zeitlichen Dimension und bezüglich der Aktivitätsketten reagiert. Zudem gibt es bei aktivitätsbasierten Ansätzen keine einfache Möglichkeit aggregierte Nachfrageströme auf Zählwerte zu eichen. Bisher sind derartige Ansätze (z.B. Flötteröd, 2017) primär im Bereich der Forschung und nur vereinzelt in der Praxis zum Einsatz gekommen.

Ebenfalls birgt die Erarbeitung der Prognosezustände einen grösseren Arbeitsaufwand. Zwar können zur Erstellung der Nachfrage für Prognosezustände im Prinzip die gleichen Skripte verwendet werden wie für den Ist-Zustand. Die Herausforderung stellt sich aber darin die Erwartungen bezüglich der sich verändernden soziodemographischen Strukturen auf Personen und Haushaltebene mit den von den statistischen Ämtern verfügbaren Randsummen der Szenarien zur Bevölkerungsentwicklung in Einklang zu bringen.

Zusätzlich sei es bei Prognosemodellen fragwürdig, ob die teilweise sehr differenzierten Verhaltensparameter für zukünftige Zustände einfach übertragbar seien. Eine interviewte Person gab aufgrund dieser Herausforderungen auch zu bedenken, ob die Anwendung von aktivitätenbasierten Modellen mit agenten-basierter Simulation für Prognosemodelle nicht ein «Overkill» sei. Aktivitätenbasierten Modelle bieten aber auch bei der Anwendung von Prognosemodellen Vorteile bezüglich der methodischen Konsistenz, den Auswertungsmöglichkeiten und besseren Möglichkeiten zukünftige Mobilitätsangebote abzubilden. Daher sollte man sich bezüglich der Annahmen zu den Verhaltensparametern und dem Vorgehen beim Erstellen der Fahrpläne vielleicht mehr Gedanken zu einfacheren und robusteren Verfahren machen.

4.5.5 Zwischenfazit

Die in den Experteninterviews abgedeckten Fallbeispiele zeigen, dass eine Kombination aus neuen funktionalen Bedürfnissen, normativen Einschätzungen, dem Zugang zur entsprechenden Expertise und die Bereitschaft zusätzlichen Aufwand auf sich zu nehmen für Betreiber grundlegende Voraussetzungen darstellen, um ein aktivitätenbasiertes Modell einzuführen und für praktische Anwendungen zu nutzen.

Gegenüber aggregierten Modellen stellt die Entwicklung und Anwendung von aktivitätenbasierten Modellen höhere Anforderungen bezüglich des fachlichen Know-Hows der beteiligten Personen. Für die Modellentwicklung bedarf es derzeit Spezialkenntnisse bezüglich des übergeordneten Vorgehens und bei Spezifikation der verschiedenen Teilmodelle. Neben langjähriger Erfahrung im Umgang mit Verkehrsmodellen und spezifischem Methodenwissen sind dabei auch fundierte Programmierkenntnisse gefragt. Spezialkenntnisse im Bereich der Verkehrsmodellierung sind aber auch bei der Erstellung der heutigen, detaillierten aggregierten Modelle notwendig.

Noch ausgeprägter wie bei den aggregierten Modellen bedarf es für die Implementierung aktivitätenbasierter Modelle einer Expertise. Daher wird auch hier für die Modellentwicklung mit externen Beratern zusammengearbeitet. Dabei hat sich gezeigt, dass eine enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit zwischen Betreiber und Entwickler ein wichtiges Element für den Projekterfolg darstellt und eine Kultur des gemeinsamen Erkennens und Lösen von Problemen entwickelt werden kann. Ein solch aktives Engagement des Betreibers trägt auch dazu bei, dass später auch komplexere Anwendungen durch den Betreiber durchgeführt werden können.

Die Anwendung von aktivitätsbasierten Modellen stellt derzeit höhere Anforderungen an die Modellnutzenden, als dies bei den aggregierten Modellen der Fall ist. Zwar sind in den USA bereits Softwarewerkzeuge mit grafischer Nutzeroberfläche im Einsatz, welche die Anwendung von aktivitätsbasierten Modellen vereinfachen. Ebenso bietet PTV Visum 2020 Datenstrukturen und Programmierschnittstellen an, welche die Einbindung von aktivitätsbasierten Nachfragemodellen unterstützen. Die Modellanwendung und Analyse der Ergebnisse erfordert aber nicht nur vertiefte Kenntnisse bezüglich der zu Grunde liegenden Methodik, sondern aufgrund der höheren Anzahl an Teilmodellen grössere Rechenressourcen und entsprechende Kenntnisse beim Handling und der Auswertung der dabei generierten Datenmengen. Aufgrund der derzeit bei Modellbetreibern in der Schweiz vorhandenen Ressourcen und den dort vorhandenen Kenntnissen bedarf es daher bei einem Wechsel von aggregierten zu aktivitätsbasierten Modellen der Bereitschaft sich weiterzubilden oder neues Personal mit den entsprechenden Kenntnissen anzustellen.

Die Erfahrung in den USA, aber auch mit SIMBA MOBi in der Schweiz zeigt, dass bei einem aktivitätsbasierten Ansatz die einzelnen Teilmodelle flexibel kalibrierbar sind und so auch die in der Praxis gestellten Ansprüchen bezüglich Modellgenauigkeit bezüglich Übereinstimmung mit unabhängig ermittelten Zählwerten erfüllt werden können. Bezüglich der Massnahmensensitivität bieten aktivitätsbasierte Modelle Vorteile, da die Teilmodelle differenzierter Verhaltensreaktionen abbilden können (z.B. Wirkung von räumlichen Qualitäten auf die Anzahl nicht-heimgebundener Wege).

In den USA werden aktivitätsbasierte Nachfragemodelle in der Praxis kombiniert mit aggregierten Umlegungsmodellen eingesetzt. Somit ist es möglich die im Markt verfügbaren Softwares für die Berechnung der Routenwahl und die Darstellung von Strecken- und Linienebelastungen zurückzugreifen. Zudem können die für die aggregierten Modelle über Jahre kontinuierlich verbesserten Netzmodelle verwendet werden und, falls nötig direkt editiert werden. Im Falle von SIMBA MOBi und dem MATSim Modell der BVG hingegen hat man von Beginn weg auf die Verwendung eines agentenbasierten Mikrosimulationsmodells gesetzt. Dies bietet zwar Vorteile, bringt aber eine höhere Rechenintensität und höheren Anforderungen an das Netzmodell mit sich. Falls die praxisrelevanten Fragestellungen keine agentenbasierte Simulation bedürfen, empfiehlt es sich also in einen ersten Entwicklungsschritt auf deren Verwendung zu Gunsten eines Umlegungsmodells zu verzichten.

Die in diesem Teilkapitel gezeigten Beispiele aus den USA zeigen, dass aktivitätsbasierte Modelle eine hohe Flexibilität bezüglich der Fragestellungen bieten, die damit bearbeitet werden können. Zusammen mit den im vorigen Teilkapitel dargelegten Einschätzungen der Experten, dass sich aktivitätsbasierte Modelle besser für in Zukunft relevante Fragestellungen eignen, ergibt sich hier also ein relevanter Vorteil bezüglich der Zukunftstauglichkeit.

Damit diese Vorteile tatsächlich in der Praxis nutzbar gemacht werden können, bedarf es bei Betreibern und Modellentwicklern Anpassungen hinsichtlich der Organisationsstruktur und des Arbeitsumfelds um den gesteigerten Anforderungen gerecht werden zu können, welche diese Modelle bezüglich der Personalressourcen stellen. Die Vermittlung von Programmierkenntnissen wird derzeit im Rahmen der Aus- und Weiterbildung von Fachkräften stark gefördert. Daher wird erwartet, dass bei Betreibern und Beratungsbüros vielmehr Fachkräfte verfügbar sind, welche die für die Arbeit mit aktivitätsbasierten Verkehrsmodellen notwendigen Programmierkenntnisse mitbringen. Zudem ist klar, dass die Einführung von aktivitätsbasierten Modellen einen gewissen Einarbeitungsaufwand mit sich zieht, wie das aber auch für neue Mitarbeitende bei den immer komplexer werdenden aggregierten Modellen der Fall ist.

4.6 Herausforderungen und Entwicklungspotenziale beim Einsatz von aktivitätsbasierten Modellen in der Praxis

Alle interviewten Personen wurden gebeten die Relevanz verschiedener Herausforderungen zu rangieren, die sich bei der Arbeit mit aktivitätsbasierten Modellen stellen. Die Antworten wurden auf einer fünfstufigen Skala von «überhaupt nicht wichtig» bis «sehr wichtig» erfasst. Abb. 28 zeigt die Ergebnisse der so aufgenommenen Einschätzungen im Überblick.

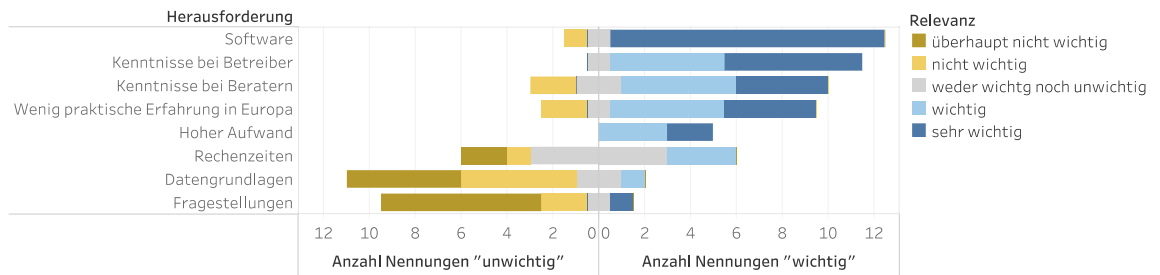


Abb. 28 Relevanz verschiedener Herausforderungen beim Einsatz von aktivitätsbasierten Modellen

Gemäss den Einschätzungen der interviewten Experten liegen derzeit die grössten Herausforderungen bei der Verfügbarkeit praxisgeeigneter Software, den Kenntnissen bei Beratern und Betreibern und mangelnder praktischer Erfahrung mit aktivitätsbasierten Modellen im europäischen Markt. Nicht alle Experten konnte eine auf eigenen Erfahrungen beruhende Einschätzung zum Aufwand für die Implementierung eines aktivitätsbasierten Modells machen. Diejenigen Experten, die aber bereits mit solchen Modellen gearbeitet haben, schätzen den damit zusammenhängenden hohen Aufwand als wichtige oder sehr wichtige Herausforderung ein.

Bezüglich der Rechenzeiten sind die Einschätzungen recht heterogen. Experten, die in den USA mit aktivitätsbasierten Modellen arbeiten, sehen in den Rechenzeiten keine relevante Herausforderung. Hier konnte bezüglich der Parallelisierung der Nachfragemodelle schon einiges an Erfahrung gesammelt werden und zur Berechnung der Streckenbelastungen wird, wie bei den aggregierten Modellen auf Umlegungsmodelle gesetzt. Experten, die hingegen mit aktivitätsbasierten Modellen im Zusammenhang mit agentenbasierter Simulation arbeiten, sehen hier die Rechenzeiten hingegen noch als Herausforderung für den Einsatz in der Praxis.

Mangelnde Datengrundlagen sowie der Umstand, dass es in der Praxis Fragestellungen gibt für die sich aktivitätsbasierte Modelle besonders gut eignen, werden bezüglich als nicht relevante Hemmnisse für einen möglichen Einsatz von aktivitätsbasierten Modellen eingeschätzt.

In diesem Unterkapitel wird nun genauer auf die von den Experten dargelegten Überlegungen zu den einzelnen Herausforderungen eingegangen.

4.6.1 Software

Als grösste Herausforderung für die Einführung von aktivitätsbasierten Modellen in der Praxis wird der Mangel an einer Software mit graphischer Nutzeroberfläche gesehen, welche es erlaubt, Anpassungen am Modell einfach vorzunehmen und hilft, die Modellresultate einfach zu analysieren und klar darzustellen. Es sei zwar nachvollziehbar, dass bei der Modellentwicklung die Verwendung von skriptbasierter Software geeigneter und für die Aufgabe ausreichend sei. Bei der Modellanwendung ergeben sich hier aber aufgrund der Vorkenntnisse der Anwender und der Arbeitsproduktivität Schwierigkeiten. Wachsende Programmierkenntnisse bei den Studienabgängern können jedoch zukünftig diese Lücke

schliessen. Erfordern doch praktische Fragestellungen immer wieder spezifische Auswertungen und Darstellungen.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass im Bereich der aggregierten Modelle der Wechsel zwischen Software-Produkten mit graphischer Nutzeroberfläche für die Ingenieurbüros mit Schwierigkeiten verbunden sind. Ein interviewter Experte fasste seine langjährige Erfahrung zu diesem Thema mit dem Satz *«Switching Software is like switching religions»* zusammen. Mit einem Wechsel der Software ergeben sich Unsicherheiten bezüglich des erwarteten Aufwands für den notwendigen Lernprozess und beim Einsetzen der Software (Rechenzeiten, Speicherbedarf) sowie der Verfügbarkeit der Lizenzen. Während der letzte Punkt mit entsprechenden vertraglichen Regelungen entschärft werden kann, können die ersten Punkte nur durch den Zugewinn von Erfahrung angegangen werden.

Mit der Entwicklung und Veröffentlichung neuer Softwarewerkzeuge wie ActivitySim, PTV Visum 2020 und Tramola ändert sich aber diese Situation derzeit. In den folgenden Abschnitten werden die im Rahmen der Experteninterviews erlangten Erkenntnisse bezüglich der Funktionalität und der Praxistauglichkeit dieser Softwares für die Implementierung und Anwendung aktivitätsbasierter Modelle aufgezeigt. Für eine detaillierte Beschreibung des Funktionsumfangs der einzelnen genannten Werkzeuge wird hingegen auf die jeweilige Dokumentation verwiesen.

Bei den Experteninterviews hat es sich als zielführend erwiesen zwischen folgenden Arten von Software zu unterscheiden:

- Werkzeuge und Software zur Entwicklung aktivitätsbasierter Nachfragemodelle,
- Verwendung dieser Werkzeuge im Zusammenspiel mit anderen Softwareprodukten bei Modellanwendungen,
- Werkzeuge zur Auswertung der Modellresultate.

Bis zur Entwicklung von ActivitySim war die Situation in den USA so, dass die Modellentwickler jeweils eigene Softwarewerkzeuge zum Implementieren von aktivitätsbasierten Modellen entwickelt haben und diese den Betreibern im Rahmen von Beratungsmandate kostenfrei zur Verfügung gestellt haben. Diese Softwarelösungen beschränken sich bezüglich Funktionalität auf die Erstellung aktivitätsbasierter Nachfragemodelle. Über Schnittstellen können diese mit verschiedenen im Markt verfügbaren Softwares zur Berechnung der Netzbelastungen (z.B. Cube Voyager, PTV Visum) verknüpft und so die Rückkopplung zwischen Nachfrage- und Angebotsmodell gewährleistet werden.

Einige Betreiber empfanden diese Situation aber unbefriedigend. Sie empfanden diese aktivitätsbasierten Modelle teilweise als *«black box»* und wollten sich nicht von einzelnen Modellentwicklern abhängig machen. Daher haben sich mehrere Betreiber nach Absprache mit den Modellentwicklern dazu entschlossen die Entwicklung von ActivitySim als gemeinsamen Software in Auftrag zu geben und diese als Open Source Software öffentlich verfügbar zu machen.

Zum aktuellen Zeitpunkt (September 2020) konnte die fünfte Entwicklungsphase von ActivitySim abgeschlossen werden. Die Software umfasst nun alle wichtigen Teilmodelle eines aktivitätsbasierten Nachfragemodells. Die Verwendung der Software setzt aber ein vertieftes methodisches Verständnis der einzelnen Teilmodelle und gute Programmierkenntnisse in Python voraus. Derzeit wird ActivitySim in der Praxis noch nicht für verkehrsplanerische Anwendungen eingesetzt, die Atlanta Regional Commission plant aber im Jahr 2021 den Wechsel von CT-Ramp auf ActivitySim.

Der Ansatz von ActivitySim wird auch von bekannten Anbietern von kommerzieller Verkehrsplanungssoftware als *«sehr vernünftig»* angesehen. Eine solche Standardisierung bei den aktivitätsbasierten Modellen erlaube es den kommerziellen Softwareanbietern Referenzimplementierungen voranzutreiben und Schnittstellen zu ActivitySim bereitzustellen. Gleichzeitig bietet ein solcher Ansatz Betreibern und Modellanwendern die Möglichkeit die gewohnten Softwarewerkzeuge mit der bekannten graphischen Nutzeroberfläche weiter zu benutzen. So kann auch gewährt werden, dass für viele Modellanwendungen keine

Programmierkenntnisse vorhanden sein müssen. Dies wird von fast allen interviewten Experten als Voraussetzung gesehen, damit sich die Verwendung von aktivitätenbasierten Modellen in der Praxis durchsetzen kann.

Die Grundidee von ActivitySim ist es, dass Modellentwickler basierend auf dem öffentlich verfügbaren Programmcode die für die jeweilige Region relevanten Teilmodelle implementieren und den so angepassten Code mit den Betreibern teilen. Nur so ist gewährleistet, dass der Betreiber und andere Anwender das Modell nachvollziehen und anwenden können.

Verschiedene Betreiber in der Schweiz gaben dabei aber zu bedenken, dass einzelne Modellentwickler von einem solchen Konzept nicht begeistert sein werden, da so mit dem kompletten Code der Modellimplementation ihr Spezialwissen mit dem Betreiber und über Anwendungen auch möglichen Mitbewerbern (Modellanwendern) zur Verfügung stellen müssen. In den USA wird nun aber die Erfahrung gemacht, dass eine solche Herangehensweise von allen Beteiligten akzeptiert und unterstützt wird. Dabei wurde auch die Erfahrung gemacht, dass die Transparenz über die Funktionsweise der Modelle sich verbesserte und der Austausch zwischen den Fachpersonen ebenfalls besser funktioniert. Dabei wird auch das Argument aufgeführt, dass die Modelle ja mit öffentlichen Geldern finanziert werden und somit auch öffentlich verfügbar sein sollten.

Bezüglich der Verwendung von kommerzieller Verkehrsplanungssoftware gibt es aber noch Entwicklungsbedarf hinsichtlich der Kompatibilität mit aktivitätenbasierten Nachfragemodellen. In der US-amerikanischen Praxis war es bisher so, dass für die Arbeit mit aktivitätenbasierten Nachfragemodellen mit eigenen Datenstrukturen gearbeitet wurde und der Datentransfer mit den kommerziellen Softwarepaketen über offene Dateiformate erfolgt ist. Die letzte Weiterentwicklung von PTV Visum bieten nun aber das Potenzial einer verbesserten Modellintegration, da die neuste Softwareversion Datenstrukturen unterstützt, wie sie für aktivitätenbasierte Modelle typisch sind. Derzeit erfolgt die Kommunikation mit dem Nachfragemodell über eine Programmierschnittstelle, innerhalb von Visum stehen aber noch keine Verfahren zur Berechnung der aktivitätenbasierten Nachfrage zur Verfügung.

Eine derartige Integration von kommerzieller Verkehrsplanungssoftware mit frei verfügbarer Software wird von verschiedenen Stakeholdern als interessanter, zukunftsfähiger und unterstützungswerter Ansatz eingeschätzt. Für Softwareanbieter bietet sich so weiterhin die Möglichkeit der Produktdifferenzierung über die Usability (GUI) und Softwarebeschleunigung durch spezialisierte Algorithmen. Für Modellentwickler bieten sich so die Möglichkeit ihre Expertise unabhängig von kommerziellen Softwarelösungen anbieten zu können. Gleichzeitig kann für Betreiber und Anwender gewährleistet werden, dass diese auch ohne Programmierkenntnisse und mit den bekanntesten Softwareprodukten die gängigsten Modellanwendungen rechnen und deren Resultate analysieren können. Zudem wurde von Seiten der Betreiber mehrmals aufgeführt, dass die langfristige Verfügbarkeit und kontinuierliche Weiterentwicklung der Software wichtige Voraussetzung darstellen, dass die Software in der Praxis nutzbringend eingesetzt werden kann. Daher gibt es kaum Bereitschaft «Speziallösungen» einzusetzen, die primär für ein bestimmtes Modell entwickelt worden sind.

Da aktivitätenbasierten Verkehrsmodelle mehr Auswertungsmöglichkeiten bieten, gibt es auch bezüglich der für die Auswertung der Modellanwendungen eingesetzten Software neue Anforderungen. Da kleinste Analyseeinheiten nicht mehr aggregierte Verkehrsflüsse, sondern einzelne Fahrten sind, ergeben sich andere Möglichkeiten die Modelloutputs zu analysieren. Für wiederkehrende, standardisierte Analyseprozesse, wie sie zum Beispiel im Rahmen eine Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt werden, bietet es sich an Skripte zu entwickeln, welche basierend auf den Modelloutputdaten die gewünschten Kenngrößen berechnen und grafisch darstellen. Beispiele aus der Forschung und in der Praxis zeigen aber auch, dass insbesondere für die explorative Datenanalyse zusätzlich auch *Business Intelligence* Software nutzbringend eingesetzt wird.

Die interviewten Softwareentwickler sehen Potenzial Verkehrsplanungssoftware in Zukunft auch als Software-as-a-Service (SaaS) anzubieten. Zwar wird erwartet, dass insbesondere die Entwicklung der Nutzerinterfaces, der Parallelisierung der Rechenprozesse und die Datenhaushaltung noch einiges Aufwand erfordern. Gleichzeitig bietet sich gegenüber den

heutigen Lösungen viel Verbesserungspotenzial bei Modellanwendungen, beispielsweise beim Management mehrere Rechenläufe und der einfacheren Kommunikation der Resultate. Zudem könnte mit einem solchen Modell die Software einfacher bedarfsorientiert angemietet werden, was die Eintrittshürden für Modellanwender senkt.

Einige Betreiber haben aber auch Bedenken bezüglich eines Einsatzes von SaaS im Kontext von Verkehrsmodellen geäußert. Da die untersuchten Fragestellungen politisch sehr brisant sein können und die damit untersuchten Planzustände sich direkt auch Landwerte und Immobilienpreise auswirken können, wird eine Lösung, die auf eigenen Rechenservern läuft präferiert. Diesem Kundenwunsch wird auch bei der Entwicklung von Tramola Rechnung getragen, welches sich sowohl auf lokalen Servern als auch in der Cloud betreiben lässt. Gleichzeitig wurde von Softwareentwicklern aber auch viel Potenzial von reiner Cloud-Software im Bereich der Verkehrsmodelle gesehen, z.B. bezüglich der kurzfristigen Anmietung zusätzlicher Rechenkapazität und des Managements mehrere Rechenläufe sowie dem Teilen von Ergebnissen über webbasiert Visualisierungen. Das Beispiel von Cube Cloud von Citilab ist ein erstes solches Softwareprodukt, dass auch bereits auf dem Markt ist.

Zwar gibt es im Markt verschiedene anwenderfreundliche Softwareprodukte mit GUI für die dynamische Netzsimulation (DTA). Für eine netzweite Simulation ist ein solcher Ansatz aber aufgrund der hohen Rechenintensität und des hohen Datenbedarfs beim Netzmodell in der Praxis aber nicht geeignet. Zahlreiche Verbesserungen bezüglich der Performanz des agentenbasierten Simulationsmodells von MATSim (Bruno et al., 2019; M. Rieser et al., 2018) haben dazu geführt, dass dieser Ansatz nun auch für Anwendungen in der Praxis eingesetzt wird, wie das Beispiel von SIMBA MOBi zeigt.

Die Firma Simunto ist derzeit daran eine Software zu entwickeln, die es erlaubt aufgrund einer aktivitätenbasierten Nachfrage, die im MATSim-Format vorliegt, agenten-basierte Simulationen über einen Webbrowser zu managen. Die Software Tramola soll es auch erlauben einfache Anpassungen am Nachfragemodell zu tätigen (z.B. Anpassung des Straßennetzes, ergänzen/löschen von Haltestellen etc.) und mit «mit einem Klick» die Simulation laufen zu lassen. Ebenso bietet die Software die Möglichkeit die Standardauswertungen zu tätigen und z.B. die Streckenbelastungen von zwei Szenarien miteinander zu vergleichen. Tramola befindet sich derzeit (September 2020) in der beta-Phase und soll in einer ersten Version im Laufe des Jahres 2021 kommerziell verfügbar werden.

4.6.2 Ökosystem

Als zweitwichtigste Herausforderung für den Einsatz von aktivitätenbasierten Modellen wird die mangelnde Erfahrung im Umgang mit diesen Modellansätzen gesehen. In den Experteninterviews wurden primär die derzeit mangelnden Kenntnisse bei Betreibern und Modellentwicklern als Herausforderung für eine mögliche Einführung von aktivitätenbasierten Verkehrsmodellen in Europa gesehen. Gleichzeitig scheint klar, dass neben Betreibern und Modellentwicklern auch die Rolle von Universitäten und Softwareanbietern mitbetrachtet werden müssen, da diese zusammen eine Art Ökosystem bilden, welches auch die Ausbildung und die Bereitstellung von Werkzeugen umfasst.

Während es im europäischen Umfeld noch kaum Modellentwickler gibt, welche praktische Erfahrungen bei der Erstellung von aktivitätenbasierten Modellen vorweisen können, beschränkt sich auch in den USA der Markt auf drei bis vier Anbieter. In den USA hat das dazu geführt, dass Betreiber einen *Lock-in-Effekt* wahrgenommen haben. Jede Weiterentwicklung und Bearbeitung spezifischer Fragestellung mit dem aktivitätenbasierten Modell erforderte eine derart vertiefte Expertise, dass oftmals nur der Entwickler des Modells in der Lage war die gewünschten Arbeiten zu verrichten. Dieser Umstand war einer der Hauptgründe für die Betreiber von aktivitätenbasierten Modellen sich zusammenzutun und die Entwicklung einer Open Source Software in Auftrag zu geben.

Neben Betreibern, Softwareanbietern und Modellentwicklern sind Universitäten über Ihren Bildungs- und Forschungsauftrag ein weiterer wichtiger Teil des Ökosystems. US-ameri-

kanische Universitäten waren und sind im akademischen Bereich führend bei der Forschung und Entwicklung aktivitätsbasierter Modelle. Daher überrascht es nicht, dass die ersten in der Praxis eingeführte aktivitätsbasierten Modelle von Personen entwickelt wurden, die sich zuvor im universitären Umfeld vertieft mit diesen Modellansätzen auseinandergesetzt haben.

In Europa waren und sind die Forschungsgruppen um Kay Axhausen an der ETH und Kai Nagel an der TU Berlin weltweit führend im Bereich der agentenbasierten Simulation. Auch hier ist es so, dass Doktoranden aus diesen Gruppen als Keimzelle wirkten und ihr Wissen durch Start-Ups wie Senozon oder Simunto sowie Beratungsmandate in die Praxis einbringen konnten. Gleichzeitig muss man sich aber auch bewusst sein, dass der Fokus dieser Forschungsgruppen auf der Weiterentwicklung der agenten-basierten Simulation liegt und dabei nicht zwingend deckungsgleich ist mit den Bedürfnissen der Praxis. Mit Ralf Moeckel an der TU München und Peter Vortisch am KIT gibt es aber im deutschsprachigen Raum auch Lehrstühle, die sich in der Forschung intensiv mit der Entwicklung und Anwendung von aktivitätsbasierten Nachfragemodellen befassen. Und in der Schweiz unterstützt ein Team um Michel Bierlaire (EPFL) die SBB tatkräftig bei der Entwicklung des aktivitätsbasierten Nachfragemodells MOBi.plans.

In den USA unterstützte die FHWA im Rahmen des Strategic Highway Research Programmes zwei Pilotprojekte (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2013, 2014) von je 3.5 Jahren Laufzeit mit Aufwänden im Wert von 1.9 Mio. und 2.5 Mio., die es zwei Consultingfirmen ermöglicht haben in einem risikobefreiten Umfeld vertiefte Erfahrungen mit dem Einsatz von aktivitätsbasierten Modellen in der Praxis zu machen. Zwar sind die in diesen Projekten entwickelten Modelle von den jeweiligen Betreibern nicht längerfristig weitergeführt und für praktischen Fragestellungen eingesetzt worden. Rückblicken haben sich diese Projekte aber als wichtiger Nährboden für die Entwicklung eines Ökosystems von Beratern und Betreibern herausgestellt. Zudem ermöglichten es diese Projekte die Machbarkeit und den Nutzen von aktivitätsbasierten Modellen in der Praxis aufzuzeigen. Da neben den Projektberichten auch der in den Projekten entwickelte Softwarecode öffentlich verfügbar gemacht wurde und die Projektergebnisse in Konferenzen diskutiert wurden, funktionierten diese Projekte auch als Plattformen für den Wissensaustausch.

Mit Ausnahme der Anstrengungen bei der SBB fehlen in der europäischen Praxis solche gross angelegten Praxistransferprojekte bisher. Gleichzeitig konnte aber in der Schweiz mit der Erarbeitung einer synthetischen Population, welche das Bundesamt für Raumentwicklung für Planungsprojekte zur Verfügung stellt, und auch der vorliegenden Arbeit wichtige Grundlagen für die Entwicklung von praxistauglichen aktivitätsbasierten Verkehrsmodellen erarbeitet werden. Daneben bietet der gut funktionierende Austausch zwischen den verschiedenen Modellbetreibern in der Schweiz ein Nährboden für ein gemeinsames Vorgehen bezüglich weiterer Entwicklungsprojekte im Bereich der aktivitätsbasierten Modelle.

In den Experteninterviews wurde auch klar, dass es zwischen der Praxis im deutschsprachigen Raum und den USA Unterschiede bezüglich der beruflichen Weiterbildung gibt. Während in den USA einige der in der Praxis tätigen Modellbetreiber und -entwickler regelmässig (ein bis zwei Mal pro Jahr) und aktiv an akademischen Konferenzen teilnehmen, ist dies im deutschsprachigen Raum nur selten der Fall.

4.6.3 Rechenzeiten

Bezüglich der Rechenzeiten gehen die Einschätzung den befragten Experten auseinander. Experten mit Erfahrung mit aktivitätsbasierten Modellen in der Praxis schätzen diese Herausforderung aber als neutral oder nicht wichtig ein. Die Erfahrung zeigt, dass aktivitätsbasierte Nachfragemodelle relativ effizient parallelisierbar sind und daher mit genügend Rechenressource ähnlich schnell durchgerechnet werden können wie aggregierte Modelle.

Wenn jedoch eine Fragestellung eine dynamische Umlegung oder agenten-basierte Simulation erfordert, kann die gängige Anforderung, dass die Modellergebnisse «über Nacht», also innert rund 14h zur Verfügung stehen nicht erfüllt werden. Da dies bei aggregierten

Modellen mit zeitlich hochaufgelösten Matrizen aber ebenfalls der Fall ist, ergibt sich hier kein komparativer Vor- oder Nachteil.

Derzeitig wird Verkehrsmodellsoftware primär auf Rechenservern angewendet, welche Betreiber, Entwickler und Anwender für die Arbeit mit den Modellen angeschafft haben und selbstständig betreiben. Vereinzelt werden Rechenjobs auch auf cloudbasierte Rechenserver ausgelagert. Grundsätzlich wird aber das Potenzial erkannt, dass beim Auslagern von Rechenjobs deutlich mehr Szenarien parallel berechnet werden. Bei der Modellentwicklung und komplexen Anwendungen gibt es aber immer auch Entwicklungsarbeiten, die zeitaufwendig sein können. Daher scheint sich hier eine Herangehensweise durchzusetzen, bei der der vor Ort betriebene Rechenserver spezifisch durch die Anmietung cloudbasierte Rechenkapazitäten ergänzt wird.

4.6.4 Datengrundlagen

Mangelnde Datengrundlagen sieht keiner der interviewten Experten als wichtiges Hemmnis bei der Einführung von aktivitätenbasierten Modellen. Die Erfahrung zeigt, dass bezüglich der Strukturdaten, der Verhaltensdaten (Wegtagebuchbefragung) als auch des Verkehrsangebots keine grundsätzlichen anderen Anforderungen bestehen als dies bei aggregierten Modellen der Fall ist. In allen den Interviewpartnern bekannten Gebieten (Schweiz, USA und Deutschland) sind die notwendigen Daten verfügbar. Es wurde aber angemerkt, dass die zur Verfügung stehenden Stichproben ein limitierender Faktor bei der Differenzierung der Verhaltensmodelle darstellen. Im Falle der deutschen Wegtagebuchbefragung «Mobilität in Deutschland» wurde die Granularität der Daten als nicht optimal erachtet, da hier die Aktivitätsorte keine addressscharfen Angaben umfassen.

4.7 Fazit

Erkenntnisse:

Die heute im Einsatz stehenden Verkehrsmodelle leisten einen wichtigen Beitrag in der verkehrsplanerischen Praxis. Sie erlauben mögliche Auswirkungen verkehrsplanerischer Massnahmen quantitativ zu beschreiben. Diese daraus abgeleiteten Resultate und Einsichten bilden die Basis für verkehrsplanerische Entscheide und unterstützen politische Entscheidungsprozesse. Aufgrund knapper Zeit- und Geldbudgets wird aber das Potenzial, welche die bestehenden, aggregierten Modelle bieten, in der Praxis nicht immer ausgeschöpft.

Die Erfahrung in den USA zeigt, dass aktivitätenbasierte Verkehrsmodelle in der Praxis erfolgreich eingeführt werden konnten und dabei denselben Anforderungen bezüglich Sensitivität und Genauigkeit genügen wie aggregierte Modelle.

Im Vergleich aggregierten Modellen, eignet sich der aktivitätenbasierte Ansatz aber zur Beantwortung vielfältigerer Fragestellungen und bietet auch mehr Möglichkeiten bei der Auswertung. Gleichzeitig erfordert die Entwicklung und der Betrieb von aktivitätenbasierten Modellen einen gewissen Mehraufwand. Daher wird Betreibern empfohlen sich im Rahmen der Vorbereitung einer Ausschreibung zur Entwicklung eines Verkehrsmodells zunächst klar zu machen für welche Anwendungen das Verkehrsmodell eingesetzt werden soll. Basierend auf einem systematischen Vergleich der Vor- und Nachteile der beiden Modellansätze kann dann beurteilt werden, ob der Mehraufwand, den ein aktivitätenbasiertes Modell erfordert, gerechtfertigt erscheint.

Wie gross der Umfang des Mehraufwands für die Implementierung und den Betrieb eines aktivitätenbasierten Modells ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Die wichtigsten Faktoren sind in der untenstehenden Liste aufgeführt und werden den folgenden Abschnitten erläutert:

- Die im Projektteam vorhandenen Kenntnisse und Erfahrungen im Umgang mit aktivitätenbasierten Modellen,

- die Verfügbarkeit von bestehenden Vorarbeiten, beispielsweise eine synthetische Population,
- ob die Verkehrssimulation mit einem agentenbasierten Verkehrsmodell, *dynamic traffic assignment* oder einem herkömmlichen Umlegungsmodell erfolgt.
- die Verfügbarkeit und Verwendung von geeigneten Softwarewerkzeugen.

Kenntnisse und Erfahrung

Grundsätzlich ist klar, dass der Mehraufwand mit zunehmender Erfahrung der Projektbeteiligten abnimmt. Heute ist es so, dass in Europa zwar im akademischen Bereich bereits viel Erfahrung bei der Entwicklung und mit dem Umgang aktivitätenbasierten Modell gesammelt werden konnte. In der hiesigen Praxis konnten sich aktivitätenbasierten Modelle aber erst in den letzten Jahren und bisher nur vereinzelt etablieren. Zusammenarbeiten mit den Hochschulen bildeten dabei eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg dieser Pionierarbeiten.

Wenn sich nun auf diesem Nährboden in den nächsten Jahren ein Ökosystem von Start-ups, Beratern, Betreibern und Softwareanbietern entwickeln kann, ist davon auszugehen, dass der Mehraufwand bei der Arbeit mit aktivitätenbasierten Modellen deutlich geringer ausfallen wird. Die Entwicklungen in den USA, die hier der europäischen Praxis einige Jahre voraus ist, bestätigen dies. Gleichzeitig bieten die Erfahrungen bei der Entwicklung und dem Einsatz von aktivitätenbasierten Modelle in den USA ideale Voraussetzungen für eine beschleunigte Transformation im europäischen Umfeld.

Eine wichtige Erkenntnis der Interviews mit Experten aus den USA ist, dass Schulungen und der kontinuierliche Wissensaustausch eine wichtige Grundlage für den erfolgreichen Einsatz von aktivitätenbasierten Verkehrsmodellen in der Praxis darstellen. Der gut funktionierende Austausch zwischen den Betreibern in der Schweiz bildet eine gute Basis für den Aufbau von Strukturen, die den Wissenstransfer bei einer Einführung von aktivitätenbasierten Modellen in der Schweiz ermöglichen.

Bestehende Vorarbeiten

Eine zentrale Erkenntnis der in den USA gemachten Erfahrungen ist im stufenweisen Vorgehen bei der Entwicklung und dem Einsatz der aktivitätenbasierten Modelle zu sehen. Mit der Etablierung einer landesweiten synthetischen Population, die im Rahmen der Neuerstellung des nationalen Personenverkehrsmodells erfolgt ist, konnte der erste Schritt in Richtung der Etablierung eines aktivitätenbasierten Modells bereits vollzogen werden. Die Verfügbarkeit dieser synthetischen Population war auch eine Grundvoraussetzung für die Etablierung des aktivitätenbasierten Verkehrsmodells SIMBA MOBi bei den SBB. In ähnlicher Weise kann die synthetische Population auch die Grundlage für die Entwicklung regionaler, aktivitätenbasierter Verkehrsmodelle bieten.

Umlegung, DTA und Simulation

Der Einsatz von *Dynamic Traffic Assignment* oder agentenbasierter Simulationsmodelle wie MATSim erlaubt es das volle Potenzial aktivitätenbasierter Modellansätze auszuschöpfen. Da die Nachfrage nicht zu Quell-/Zielmatrizen aggregiert werden muss, kann auch bei der Beschreibung des Routenwahlverhaltens auf alle im Modell verfügbaren Variablen zurückgegriffen werden. Im Fall von Mobility Pricing kann so zum Beispiel ohne rechnerischen Mehraufwand das Routenwahlverhalten differenziert nach Einkommen, Wegzweck und weiteren Variablen beschrieben werden. Zudem erlauben es solche simulationsbasierten Ansätze Netzbelastungen kontinuierlich über den ganzen Tag zu beschreiben und so dynamische Effekte wie die Bildung von Rückstau abzubilden. Zudem werden Kapazitätsgrenzen im Netzwerk als harte Randbedingungen der Netzauslastung berücksichtigt.

Die Erfahrungen in den US-amerikanischen Praxis sowie bei der SBB zeigen aber, dass der Einsatz von *Dynamic Traffic Assignment* sowie agentenbasierter Simulationsmodelle zwar machbar ist und Vorteile bietet, aber mit beträchtlichem Zusatzaufwand verbunden ist. Daher kommt in der US-amerikanischen Praxis für die meisten Fragestellungen ein

hybrider Modellansatz zum Einsatz. Dabei werden die aus dem aktivitätenbasierten Nachfragemodell abgeleiteten Wege einzelner Personen zu Quell-/Zielmatrizen aggregiert und damit die Netzbelastungen mit konventionellen Umlenkmustern ermittelt. Dies verringert nicht nur den Entwicklungsaufwand und die Rechenintensität beträchtlich, sondern erlaubt es auch im Markt etablierte Software mit grafischer Nutzeroberfläche für Auswertungen und die grafische Aufbereitung der Modellresultate zu verwenden.

Softwarewerkzeuge

Bei der Beurteilung der Verfügbarkeit und der Eigenschaften von Softwarewerkzeugen ist zu bedenken, wie diese in der Praxis eingesetzt werden und welche Anforderungen sich daraus ergeben. Dabei unterscheiden wir zwischen Werkzeugen zur Entwicklung aktivitätenbasierter Nachfragemodelle (z.B. ActivitySim), deren Verwendung in Modellanwendungen (z.B. über Nachfragematrizen mit PTV Visum) und Werkzeugen zur Berechnung und Auswertung von dynamischen Netzbelastungen (z.B. MATSim, Dynameq).

In den USA haben sich verschiedene Betreiber zusammengeschlossen, um gemeinsam in Zusammenarbeit mit Beratern die Open Source Software ActivitySim zu entwickeln. Diese in der Programmiersprache Python implementierte Software bietet für alle notwendigen Funktionalitäten für die Erstellung von aktivitätenbasierten Verkehrsnachfragemodellen. Modellentwicklern nutzen die Software, die keine grafische Nutzeroberfläche bietet, für die Implementierung neuer Nachfragemodelle und schätzen damit basierend auf den für das jeweilige Modellgebiet vorliegende Grundlagedaten die verschiedenen Teilmodelle.

Für Modellanwendungen lässt sich die Software über Schnittstellen zusammen mit am Markt etablierten Softwareprodukten wie PTV Visum oder Cube Voyager oder TransCAD (Umlenkung) verwenden. Dabei wird das Nachfragemodell über Skripte aufgerufen wofür keine Programmierkenntnisse notwendig sind. Dies reduziert den Mehraufwand im Umgang mit aktivitätenbasierten Modellen und deren Auswertung beträchtlich.

Bezüglich der Methodik und der Anforderungen stellen die verschiedenen Betreiber sehr ähnliche Anforderungen an ein solches Softwarewerkzeug. Das koordinierte Vorgehen bei der Entwicklung von ActivitySim ermöglicht den Betreibern weniger von einzelnen Beratern abhängig zu sein, senkt die Entwicklungskosten und reduziert den Zusatzaufwand bei Beratern bei der Implementierung von aktivitätenbasierten Verkehrsmodellen beträchtlich.

Für Dynamic Traffic Assignment gibt verschiedene kommerzielle Softwareprodukte, z.B. Dynameq, Aimsun, Cube Avenue, TransDNA, TransModeler. Diese Softwarewerkzeuge können ebenfalls über Schnittstellen mit dem aktivitätenbasierten Nachfragemodell gekoppelt werden und erlauben somit eine vollständig dynamische Umlenkung und bieten gleichzeitig eine grafische Nutzeroberfläche.

Für anspruchsvollere Anwendungen, welche auch ein dynamisches Angebotsmodell umfassen sollen, wie zum Beispiel Szenarien mit Mobility-as-a-Service Angeboten, muss das aktivitätenbasierte Nachfragemodell mit einer agenten-basierten Simulation gekoppelt werden. Dabei hat sich MATSim in der Forschung als die am häufigsten verwendete Software etabliert und wird mit SIMBA MOBi nun erstmalig auch in der Praxis eingesetzt. Da MATSim über kein GUI verfügt, setzt die Erstellung mittlere und die Anwendung geringe Kenntnisse der Programmiersprache Java voraus. Mit der Software Simunto Via gibt es aber ein Werkzeug mit GUI für die Visualisierung von MATSim Simulationen. Zudem ist mit Tramola eine neue Software in Entwicklung, welche es erlaubt MATSim Simulationen über einen Webbrowser zu konfigurieren, auf Rechnerservern laufen zu lassen und anschließend visuell attraktiv auszuwerten.

Aktivitätenbasierten Nachfragemodelle und insbesondere die agentenbasierte Simulation setzen hohe Anforderungen bezüglich Rechenperformance und Speicherplatzbedarf. Besonders die Modelle zur Generierung der Verkehrsnachfrage sind anspruchsvoller, da hier für jede Person eine vollständige Aktivitätskette generiert werden muss. Diese Berechnungsschritte sind aber effizient parallelisierbar und lassen sich so gut auf mehrere Rechnerserver verteilen. Zur Berechnung der Streckenbelastungen kann auch mit aktivitätenbasierten Mo-

dellen auf Umlegungsmodelle zurückgegriffen werden. Die Verwendung einer agenten-basierten Simulation hingegen stellt hohe Anforderungen an die Rechenkapazität und erfordert längere Rechenzeiten als dies bei Umlegungsmodellen der Fall ist. Wenn bei Umlegungsmodellen aber mit zeitlich aufgelösten Matrizen gearbeitet wird, ist der agentenbasierte Ansatz im Vorteil, speziell bei detaillierten Umlegungsmodellen.

Mit der vereinfachten Nutzung von cloudbasiertem Rechnen bieten sich hier aber für beide Ansätze neue Möglichkeiten zum Auslagern von parallelen Rechenläufen. Somit kann der Bedarf bei Betreibern und Modellanwendern selbst Rechenkapazität vorzuhalten reduziert werden. Zudem ist zu erwarten, dass in nächsten Jahren auch vermehrt cloudbasierte Softwarelösungen angeboten werden.

Besondere Aspekte bezüglich der Ausgangslage in der Schweiz

Die Erstellung eines aktivitätenbasierten Nachfragemodells setzt vertiefte Expertise bezüglich der Modellarchitektur und der Methoden beim Implementieren der zahlreichen Teilm Modelle voraus. In Zusammenarbeit mit Experten der EPFL konnte bei der SBB hier bereits ein für die in der Schweiz vorhandenen Daten und hier relevanten Fragestellungen praktikables Vorgehen erarbeitet und erfolgreich implementiert werden. Es ist aber davon auszugehen, dass die SBB ihr Modell vor allem für den internen Bedarf einsetzen wird und sich in den Regionen Fragestellungen ergeben, für die sich SIMBA MOBi in der derzeitigen Form nur beschränkt eignet. Beispiele hierfür sind Fragestellungen im Bereich der Strasseninfrastruktur, des Velo- und Fussverkehrs und der Siedlungsentwicklung und deren Wechselwirkung mit Gesamtverkehrskonzepten.

Daraus wird schlussgefolgert, dass es in der Schweiz weiterhin einen Bedarf für die Erstellung regionaler Verkehrsmodelle gibt. Basierend auf den in diesem Kapitel dargelegten Erkenntnissen scheinen bezüglich der Ausgangslage für die Entwicklung und den Einsatz von aktivitätenbasierten Modellen in der Schweiz die im folgenden beschriebenen Aspekte von Relevanz.

Die für gesamte Schweiz bereits vorhandenen synthetischen Population, die in den Hochschulen geleistete Ausbildungsarbeiten, die bei den SBB gemachten Erfahrungen, die in den USA entwickelte Software Plattform ActivitySim sowie die Erweiterungen der von PTV Visum unterstützten Datenstrukturen bieten sehr gute Voraussetzungen für die Etablierung von aktivitätenbasierten Verkehrsmodellen in der Praxis.

Aufgrund der generischen Modellarchitektur ist es mit der Softwareplattform ActivitySim oder auch den von PTV zur Verfügung gestellten Skripten und Modulen grundsätzlich möglich aktivitätenbasierte Modelle auch für Regionen in der Schweiz zu erstellen. Es ist zu erwarten, dass dabei Teile der bestehenden Software erweitert oder angepasst werden müssten, um den in der Schweiz verfügbaren Daten und Bedürfnissen an die Beschreibung der Nachfrage Rechnung tragen zu können. Ein zentrales Ziel dabei muss sein, dass der Zusatzaufwand beim Implementieren und der Verwendung von aktivitätenbasierten Modellen vertretbar ist und geringer ausfällt als bei den bisherigen Pilotprojekten.

5 Verwendete Modelle und Methoden

5.1 Gesamtverkehrsmodell Basel (GVM Region Basel)

Überblick

Das Gesamtverkehrsmodell Region Basel (GVM Region Basel) bildet das Verkehrsgeschehen bzw. das Mobilitätsverhalten in der Region Basel ab, basierend auf generalisierten Inputdaten und Annahmen. Es berücksichtigt den motorisierten Individualverkehr (MIV), den öffentlichen Verkehr (OeV), den Veloverkehr und den Fussverkehr.

Die Verkehrsnachfrage wird in der Form von Wegen abgebildet. Das Verkehrsmodell enthält Strukturdaten, Verkehrsnetze und Wegematrizen. Auf der Basis von nutzenbewertenden Entscheidungsmodellen wird darin das Verhalten der Verkehrsteilnehmer bzgl. der Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahl abgebildet. Die Modellierung erfolgte mit dem Verkehrsplanungssoftwarepaket TransCAD der US-Firma Caliper.

Standardmässig liegen die Daten und Resultate des GVM Region Basel für den Zustand 2016 sowie für zwei Siedlungs-Szenarien (mittel und hoch) des Zeithorizontes 2040 vor. Die Modell-Zustände liegen jeweils vor für den durchschnittlichen Werktagerverkehr (DWV) sowie die Morgenspitzenstunde (MSP) und die Abendspitzenstunde (ASP).

Modellperimeter und Zonierung

Das Modellgebiet des GVM Region Basel erstreckt sich von Süden von Delémont, Olten bis Brugg und Leibstadt nach Norden von Feldberg, Freiburg im Breisgau, Mulhouse bis Altkirch (Abb. 29). Damit können die Wege auf dem ganzen Einzugsgebiet des S-Bahnsystems der Region Basel modelliert werden.

Innerhalb des Modellgebiets wird ein Kernzonen- und ein Randzonenbereich definiert (Abb. 29). Der Kernzonenbereich entspricht, bis auf ganz wenige Gemeinden im Kanton Aargau und Solothurn, dem Raum des Tarifverbundes Nordwestschweiz (TNW) in der Schweiz und den TEB-Regionen in Deutschland und Frankreich. Am Kernzonenrand muss im Modell die korrekte Routenwahl beim MIV und ÖV gewährleistet sein. Dies bedingt, dass ein genügend grosser Buffer an Verkehrszonen um den Kernzonenbereich mit abgebildet wird. Dies wird durch Zonen im Randzonenbereich abgedeckt. Die Randzonen sind weniger fein aufgelöst als die Kernzonen. Wege, die über den Rand des Modellgebiets führen, werden mit sog. Aussenzonen ins Modell eingespeist. Die Aussenzonen sind definiert als Schnittpunkte zwischen dem Modellgebiet und den Verkehrsinfrastrukturen (Strassen resp. ÖV-Linien).

Auf Seiten der Wegematrizen werden alle Quell-Ziel-Beziehungen im Kern- und Randzonenbereich massnahmensensitiv abgebildet. Das heisst die verkehrlichen Wirkungen von Massnahmen in diesem Bereich können mit dem Modell abgebildet werden. Es sollte jedoch beachtet werden, dass Verkehrsströme mit einer Quelle oder einem Ziel ausserhalb des Modellgebiets nicht massnahmensensitiv modelliert werden.

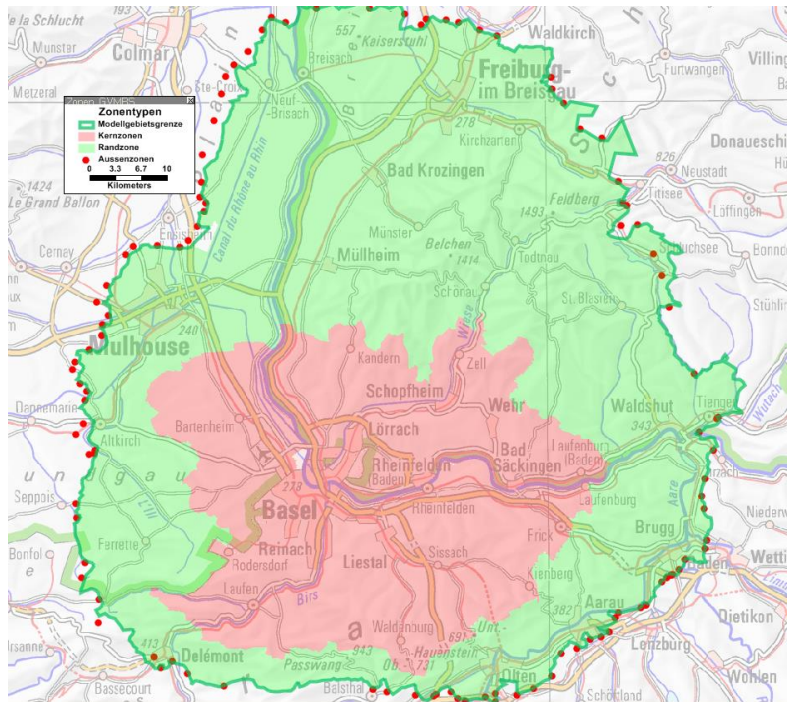


Abb. 29: Modellgebiet GVM Region Basel mit Kernzonen-, Randzonengebiet und Aussenzonen

Im vorliegenden Modell wurde im Kernzonenbereich der dicht besiedelte Raum in Basel und Umgebung sowie entlang den S-Bahn-Achsen grenzüberschreitend in hektargrosse Zonen (100m x 100m) eingeteilt. Das restliche besiedelte Gebiet im Kernzonenbereich wurde in Verkehrszonen der Grösse 200 x 200m eingeteilt. Im Randzonenbereich wurde pro Gemeinde eine Zone erstellt. An den Schnittstellen der Verkehrsachsen mit dem Rand des Modellgebiets (Strasse und Schiene) befinden sich die 109 Aussenzonen. Zusammen mit den Aussenzonen sind im Modell insgesamt 20'754 Zonen abgebildet. Darunter sind auch 11 singuläre Verkehrserzeuger mit je einer eigenen Zone.

Nachfrageberechnung

Zur Berechnung der Nachfrage bildet das Modell die Modellstufen Verkehrserzeugung, Verkehrszielwahl, Verkehrsmittelwahl und Routenwahl ab. Die belastungsabhängigen Fahrzeiten beim MIV werden bei der Ziel- und Verkehrsmittelwahl sowie der Routenwahl iterativ mit einer grossen Schlaufe berücksichtigt.

Bei der Verkehrserzeugung werden für die einzelnen Quell-Ziel-Gruppen die Quell- und Zielverkehrsaufkommen der Verkehrszonen berechnet. Diese gehen als Randsummen der zu ermittelnden Verkehrsstrommatrizen in die Zielwahl und Verkehrsmittelwahl ein. Die Berechnung der Quell- und Zielverkehrsaufkommen erfolgt auf der Grundlage der sozio-demografisch differenzierten Strukturdaten und der Verhaltensdaten für die jeweiligen Quell-Ziel-Gruppen. Zusätzlich werden singuläre Verkehrserzeuger – Flughäfen sowie grosse Freizeit- und Verkaufseinrichtungen – gesondert berücksichtigt

Beim Zielwahlmodell werden die erforderlichen Widerstandsmatrizen für die Berechnung der Zielwahl aus den Verkehrsnetzen für MIV, ÖV, Velo- und Fussverkehr für die betrachteten Verkehrszwecke abgeleitet. Die Berechnung der Widerstandsmatrizen und der Verkehrsnachfrage wird auf der Grundlage generalisierter Kosten (Nutzenfunktionen) durchgeführt. Damit werden unter anderem die unterschiedlichen Wegekosten und Tarife (einschliesslich Verbund-, Halbtax- oder Generalabonnement) sowie Park- und Mautgebühren berücksichtigt.

Mit dem Verkehrsmittelwahlmodell werden die Wegematrizen für den MIV, ÖV, Velo- und Fussverkehr mit dem Entscheidungsmodell (Nested-Logit-Modell) berechnet. Beim OEV werden Wege mit Fuss-, Velo- und Autozugang unterschieden. Das Modell wird für jede Quelle-Zielgruppe einzeln angewendet. Als Resultat erhält man die Anteilmatrizen für die MIV-, ÖV-, Velo- und Fuss-Wege. In beiden Modellen der Ziel- und Verkehrsmittelwahl werden Widerstände für die Überwindung des Weges zwischen einer Quelle und potenziellen Zielen benötigt. Einerseits wird anhand des Verhältnisses der Widerstände für das Erreichen unterschiedlich attraktiver Ziele die Wahrscheinlichkeit bestimmt, mit der ein Ziel angefahren wird. Andererseits sind die unterschiedlichen Widerstände für verschiedene Verkehrsmittel auf derselben Quell-Ziel-Relation ausschlaggebend für die Wahrscheinlichkeit der Nutzung eines bestimmten Verkehrsmittels. Aufgrund dieser gegenseitigen Abhängigkeiten werden die beiden Teilmodelle gekoppelt angewendet.

Die Modellparameter der oben dargestellten Teilmodelle resp. Nutzenfunktionen werden direkt aus der Stated preference Erhebung des Bundes 2015 für den Raum Basel ausgewertet (Weis et al., 2017) und nicht mehr nachkalibriert.

Verkehrsangebot

Zur Abbildung der netzbezogenen Verkehrsmodellgrössen werden vier Verkehrsnetze modelliert. Ein Verkehrsnetz für den MIV, ein Netz mit dem Angebot des öffentlichen Verkehrs sowie ein Velo- und Fusswegenetz. Die Codierung der Netze erfolgt auf einem einzigen Infrastrukturnetz, welches als Basis die gemeinsamen Attribute aller Netze abbildet.

Auf das Verkehrsnetz „Infrastruktur“ werden das Strassennetz und ein ÖV-Netz mit ÖV-Linien und Haltestellen routingfähig digitalisiert und mit Attributen versehen. Zusätzlich wird das Verkehrsangebot beim ÖV mit Fahrplänen ergänzt. Dabei werden aus den Fahrplänen neben den Reisezeiten nur noch die minutenscharfen Umsteigewartezeiten an den Schienenbahnhöfen zwischen den Zügen und zwischen Zug und Bus modelliert. Dies hat den Vorteil, dass bei Prognosezuständen nicht der ganze OEV-Fahrplan bekannt sein muss, sondern nur die Veränderungen bei den (fahrplanmässigen) Umsteigewartezeiten und die Taktfrequenzen der Linien. Die Netze dienen der Ableitung von sog. Widerstandsmatrizen für die Raumüberwindung pro Verkehrsmittel zwischen einer Quelle und potenziellen Zielen sowie für die Darstellung der Verkehrsbelastungen.

Umlegung

Umlegung MIV: Die oben erhaltene Wegematrix für die PW-Fahrten wird zusammen mit einer separat aufbereiteten Lieferwagenmatrix mit einem Routenwahlmodell auf die Verkehrsnetze umgelegt. Die Lastwagenmatrix wird vorgängig im unbelasteten Netz umgelegt. Damit erhält man die Verkehrsbelastungen pro durchschnittlichen Werktag. Beim MIV können sich die zugrundeliegenden Reisezeiten ändern aufgrund der durch die Routenwahl veränderlichen Verkehrsbelastungen. Es ist deshalb erforderlich, die Abfolge der Modellschritte iterativ so lange auszuführen, bis sich ein Gleichgewicht einstellt zwischen Nachfrage und Angebot. Für die Umlegung des Tagesverkehrs wird beim MIV ein Benutzer-Gleichgewichtsverfahren angewendet.

Umlegung ÖV: Bei der ÖV-Umlegung werden die Wege von der Quellzone zur Zielzone auf die verschiedenen ÖV-Verbindungen (resp. ÖV-Routen) umgelegt. Dabei wird auch der Zu- und Abgangsweg zu und von den Haltestellen zu Fuss, mit dem Velo oder dem Auto berücksichtigt (sog. kombinierte Wege). Die Qualität der möglichen Verbindungen wird zuerst bewertet und die Wege entsprechend der Attraktivität der Routen auf diese anteilmässig umgelegt. Der ÖV wird mit der Pathfinder-Methode in TransCAD umgelegt. Dieses Verfahren hat sich bewährt und hat gegenüber der fahrplanfeinen Umlegung den Vorteil, dass Prognosefälle ohne detaillierte Prognosefahrpläne plausibel umgelegt werden können. Abgestimmte Fahrpläne können durch die gezielte Anpassung von Startwartezeiten und Umsteigewartezeiten an Haltestellen simuliert werden.

Umlegung Veloverkehr: Die Velomatrizen werden mit einem *All-or-nothing*-Ansatz auf das Velonetz umgelegt. Entscheidende Variable für die Routenwahl ist die generalisierte Reisezeit, die einerseits als Fahrtzeit (aus der mittleren Velogeschwindigkeit und der Distanz)

ermittelt wird sowie aus Zeitabschlägen auf Streckenabschnitten mit Velomassnahmen und Zeitzuschlägen bei unattraktiven Strassen und bei Schiebestrecken.

Kalibrierung

Bei der Modellerstellung wird in allen Arbeitsschritten kalibrierend eingegriffen. Jede Kalibration wird begründet und erst nach Bereinigung von Netzfehlern, Anbindungsfehlern etc. durchgeführt. Die Erfahrung mit anderen Verkehrsmodellen zeigt, dass (umfangreiche) Korrekturen an den Verkehrsnetzen die Abbildung des Verkehrsgeschehens ziemlich nahe an die Realität heranbringen kann. Bei der Modellaktualisierung wird die Validität des Modells u.a. durch Vergleich der resultierenden Verkehrsbelastungen und Wegdistanzen mit Zählstellen resp. mit den berichteten Distanzverteilungen der Wege aus dem Mikrozensus nachgewiesen.

Um eine noch bessere Anpassung der Verkehrsbelastungen an die Zählwerte zu erreichen, werden die MIV- und OEV-Tagesmatrizen im letzten Schritt auf Querschnittszählungen kalibriert. Damit können die zu wenig oder zu viel im Modell abgebildeten Restmengen an Wegen einbezogen werden. Das heisst, es werden Teilmengen (aus sog. Spinnen an den Zählquerschnitten) der Wegematrizen iterativ solange erhöht und/oder abgemindert, bis die modellierten Belastungen bestmöglich den Werten der Zählstellen entsprechen. Dabei wird darauf geachtet, dass die Distanzverteilung der Wege vor und nach der automatischen Kalibration in etwa gleichbleibt.

Auswertungen

Mit dem GVM Region Basel sind grundsätzlich folgende Standard-Auswertungen möglich, die ohne grösseren Aufwand durchführbar sind:

- Plots mit Verkehrsbelastungen auf dem Infrastrukturnetz, grafisch als Balken
- Verkehrsspinnen als Belastungsplot oder als Spinnen-Matrix
- Matrizen der Wege, Kenngrössen für MIV, OEV, Velo und Fuss, komplett oder aggregiert nach frei definierbaren Gebieten
- Tabellen mit Fahr- und Verkehrsleistungen
- Tabellen mit Ein-/Aussteiger (Ersteinsteiger, Umsteigeaussteiger, Umsteigeeinsteiger, Aussteiger pro ÖV-Haltestelle)

Die wichtigsten Produkte des GVM Region Basel sind:

- Verkehrsbelastungs-Plots: Belastungen DWV (mittlerer Werktagsverkehr), ASP (Abendspitze) und MSP (Morgenspitze) für MIV / ÖV für 2016 und zwei Szenarien 2040
- Strukturdaten-Plots: Einwohner- und Arbeitsplatzverteilung für alle Modellzustände
- Differenzplots: Verkehrsbelastungen und Strukturdaten, Differenzen zwischen Ist-Zustand 2016 und jeweiligen Szenarien 2040
- Verkehrsnachfrage: Auswertungen zu modellierten Anzahl Wegen nach Verkehrsmittel, Teilgebiet und Verkehrszweck für alle Modellzustände
- Modellbeschreibung: Inhaltliche und technische Dokumentation des GVM Region Basel, richtet sich an Modellbearbeitende und Modellwender
- Ergebnisbericht: Dokumentation der Modellergebnisse, richtet sich an Fachplaner
- Vollständiges Modell: Vollständiges Modell mit allen Daten und Skripten im Datenformat TransCAD 8.0 (Firma Caliper) für erfahrene Verkehrsmodellwender

5.1.1 Aggregiertes Gesamtverkehrsmodell Basel

Dieses Verkehrsmodell wurde auf Grundlage des oben beschriebenen GVM Region Basel erstellt. Modellansätze und Modellparameter wurden daraus unverändert übernommen. Jedoch wurden die rund 21'000 Verkehrszonen auf rund 1'200 Zonen aggregiert. Für Gebiete in der Schweiz wurde Zonierung aus dem NPVMst übernommen. In Deutschland und Frankreich wurden gemäss der für das NPVM angewandten Zonierungslogik neue Zonen erstellt. Darauf basierend wurden folgende Mutationen vorgenommen:

- Die Mobilitätswerkzeugbesitzquoten wurden gemittelt und mit Einwohnern gewichtet
- Anbindungen MIV wurden aus dem NPVM übernommen (im Gebiet Schweiz)
- Im Ausland wurden die (mit Einwohner gewichteten) Zonenschwerpunkte bestimmt und von diesen Punkten aus wurden die Zonen ans MIV-Netz angebunden
- Anbindungen für ÖV, Velo und Fuss entsprechen der Anbindung aus dem MIV-Netz
- Keine direkten Verkehrs-Anbindungen an ÖV-Haltestellen, sondern ans Fusswegenetz
- Aggregation aller Wege-Matrizen und Matrizen der Kenngrössen.

5.2 Aktivitätenbasiertes Verkehrsmodell Basel (ABVM Basel)

5.2.1 Hintergrund

ABVM Basel wurde im Rahmen eines Innovationsprojektes (Auftraggeber: Schweizerische Bundesbahnen, SBB) im Zeitraum 2017-2018 von einem Konsortium bestehend aus Erveco, ASE und IVT ETH Zürich aufgebaut und basiert auf den gleichen Strukturdaten wie das GVM Region Basel (BFS STATPOP und BFS STATENT in der Schweiz; für das GVM Region Basel aufbereitete Strukturdaten in D und F). Das Modell ist ursprünglich als Innovationsprojekt gedacht, welches die neuen Möglichkeiten, welche durch ABM Modelle entstehen, abbilden und demonstrieren kann. Es wurden alle wesentlichen Modellkomponenten bei der Modellerstellung berücksichtigt. Dadurch ergibt sich ein vollständiges ABM Modell, welches Szenarien und auch Prognosen rechnen kann. Aufgrund des Ressourcenumfanges und der Bearbeitungszeit wurde auf eine detaillierte und manuelle Kalibrierung, wie sie jeweils in kantonalen Modellen durchgeführt wird, verzichtet. Insbesondere beim Modellvergleich (Kapitel 6) sind darum schon vorgängig gewisse Abweichungen zu erwarten. Trotz der fehlenden manuellen Arbeiten können Umfang und Funktionalität des ABVM Basel sehr gut aufgezeigt werden.

5.2.2 Übersicht Modell

Im Folgenden werden die Nachfrageberechnung und die Simulation spezifisch eingegangen, indem die einzelnen Modellkomponenten des ABVM Basels vorgestellt werden. Eine Übersicht über die Nachfrageberechnung ist in Abb. 30 dargestellt, die Übersicht über die Simulation erfolgt anschliessend.

Übersicht Nachfrageberechnung

Die Nachfrageberechnung basiert auf einer eigens für das ABVM erstellten synthetischen Population, welches die Basis für die spätere Zuweisung der Aktivitätenketten und Zielwahlmodelle bietet. Abb. 30 zeigt eine Übersicht über die einzelnen Modellschritte, welche im Folgenden erläutert werden. In der Übersicht ist zu sehen, dass die Zielwahl aufgeteilt wurde, nämlich in die primäre Zielwahl (Schritt 2) für die Zuweisung der Arbeits- und Ausbildungsplätze, welche eine längerfristige Entscheidungswahl widerspiegeln, und in die sekundäre Zielwahl (Schritt 4), welche kurzfristigere Entscheidungen für Einkaufs- und Freizeit-Ziele abbildet. Basierend auf Wohn- sowie Arbeits- oder Ausbildungsort werden Aktivitätenketten, Tageszeiten, Aktivitätendauer (Schritt 3) und Verkehrsmittelwahl zugewiesen (Schritt 5), um dann die die Fahrzeugfolgesimulation und die iterativen Rückkoppelungen in MATSim zu rechnen (Schritt 6). Die Rückkoppelungen ausserhalb MATSim sind in

Abb. 30 in gestrichelten Linien dargestellt. Sie wiedergeben den Einfluss der Simulationsergebnisse auf die Schritte der vorgelagerten Nachfrageberechnung, zum Beispiel durch die Reisezeiten, welche sich in der Simulation ergeben und Auswirkungen auf die Nachfrageberechnungen haben. Zentral sind die Effekte bei der Zielwahl und Verkehrsmittelwahl, welche im ABVM Basel berücksichtigt werden.

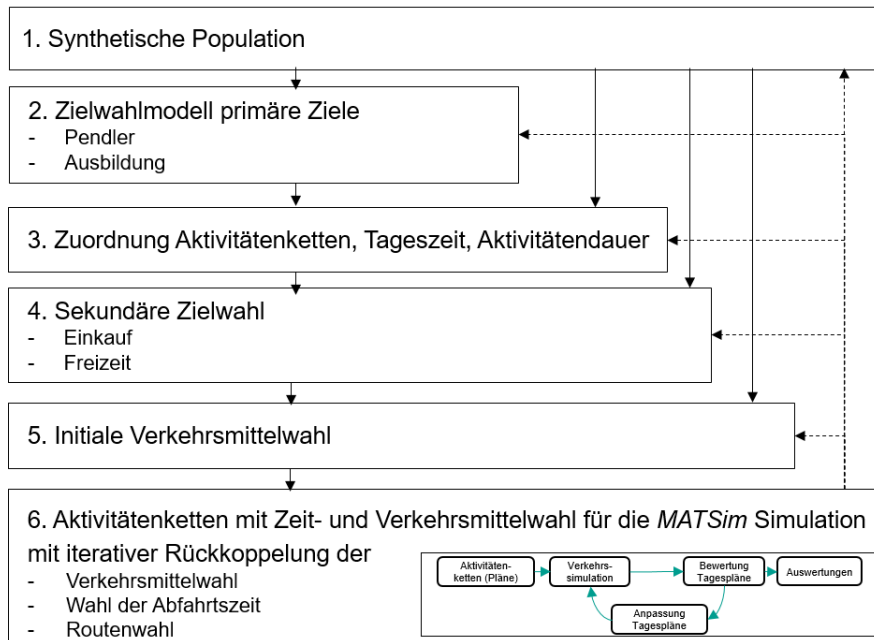


Abb. 30 Übersicht Nachfrageberechnung ABVM Basel, mit dem MATSim Rückkoppelungen in Schritt 6.

Synthetische Population (Schritt 1)

Die synthetische Population im ABVM Basel umfasst die demographischen und sozioökonomischen Angaben der Bevölkerung, verortet pro Person, resp. Agent, auf einen Wohnstandort. Die synthetische Population umfasst die relevanten Variablen Alter, Geschlecht, Voll- oder Teilzeit, Staatszugehörigkeit, Haushaltgrösse, Führerscheinbesitz, Autobesitz, GA-, TNW Abo- und Halbtax-Besitz. Die synthetische Bevölkerung wird mit einem Bayesian Network Ansatz (ähnlich Sun & Erath, 2015) generiert, wobei vorliegende Randsummendaten auf Hektar- und Gemeindeebene berücksichtigt werden. Die finale Verortung erfolgt auf Wohngebäude (Schwerpunkte), welche aus OpenStreetMap extrahiert wurden.

Nachfrageberechnung (Schritt 2 – 5)

Die Verkehrsnachfrage wurde als ABM modelliert: Zunächst wird für jeden Agenten (Person) der synthetischen Bevölkerung mit entsprechender Hauptbeschäftigung durch Anwendung eines Zielwahlmodells einen Arbeits- oder Ausbildungsort zugewiesen. Beim Zielwahlmodell kommt ein iteratives Verfahren zur Anwendung, welches die Berücksichtigung von harten Randsummenbedingungen erlaubt (Vitins et al., 2016). Es werden also nur so viel Erwerbstätige bei den Arbeitsplätzen zugewiesen wie es Plätze hat. Aufgrund der im Innovationsprojekt verfügbaren Ressourcen konnte kein neues Zielwahlmodell spezifisch geschätzt werden, wie z.B. im ABVM Singapur (Vitins et al., 2016). Das Zielwahlmodell wurde basierend auf dem im GVM Region Basel verwendeten Zielwahlmodell und den spezifizierten Parameter aufgebaut. Neben den alternativen-spezifischen Variablen wurden zusätzlich die Grenzwiderstände bei den Landesgrenzen berücksichtigt und vollständig in die Zielwahl integriert, basierend auf der vorhandenen grenzquerenden Erhebung (Vitins & Erath, 2019).

Die Zuweisung weiterer Aktivitäten zu vollständigen Aktivitätsketten erfolgte aufgrund Verhaltensdaten des MZMV 2015 sowie zusätzlicher Erhebungen in Deutschland und Frankreich (Transnationaler Eurodistrict Basel, 2013). Diese drei Datensätze wurden auch für die Generierung der wegbasierten Verkehrsnachfrage im GVM Region Basel verwendet.

Die Zuweisung von Zielen der Aktivitätstypen Einkaufen, Freizeit und weiteren Aktivitäten erfolgte über die Ziehung von Distanzen aus dem Mikrozensus, abhängig von vor- und nachgelagerten Aktivitäten und personenspezifischen Variablen, und erlaubt, die in den Verkehrstagebüchern beobachteten Distanzverteilungen zu reproduzieren. Die Aktivitätsketten werden unter Berücksichtigung der primären Zielwahl zugeordnet. Längere Pendlerwege werden bei der Erstellung der Wegeketten berücksichtigt. Es werden geroutete Wege verwendet und so auch für Freizeitwege und Einkaufswege die Netzeigenschaften und geographischen Gegebenheiten berücksichtigt. Dies ist gerade bei kurzen Wegen entscheidend. Zusätzlich werden die Attraktivität der Ziele, wie auch die Widerstände der Landesgrenzen (Kordonwiderstände) berücksichtigt. Falls die Attraktivität (zugeordnet über die Attraktivität der Hektarzonen) eines Zieltes hoch ist, wird es auch eher ausgewählt. Ein Beispiel einer Aktivitätskette ist in Abb. 31 dargestellt. Durch das Routing der gesamten Kette, die Berücksichtigung der Attraktivität und die Unterscheidung der primären und sekundären Ziele können die entsprechenden Wegeketten sehr genau abgebildet werden.

Die gesamte Nachfrageberechnung findet innerhalb einer Datenbankumgebung (post-gres/postgis) statt, welche sehr effizient ist für Modelle dieser Grössenordnung. Die Berechnungen erfolgen in Java und R, wobei die Zwischenresultate alle in der Datenbank zur Verfügung stehen. Dies ermöglicht eine detaillierte Auswertung der Zwischenergebnisse, für verschiedene verkehrs- und raumplanerischen Zwecke, und ist softwareunabhängig. Zusätzlich werden die lokalen Gegebenheiten wie die Kordonbetrachtungen bei den Grenzübergängen direkt im Modell integriert.

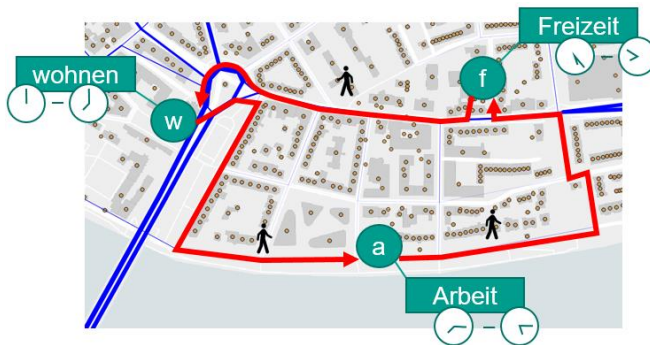


Abb. 31 Ein Beispiel einer Wegekette Wohnen – Arbeit – Freizeit mit den Wegen zwischen den einzelnen Aktivitätenstandorte.

Verkehrsangebot

Das MIV Netz wurde auf Basis von OpenStreetMap³² erstellt. Das OeV Angebot umfasst alle OeV Linien im Perimeter inkl. Frankreich und Deutschland und wurde deshalb aus verschiedenen Datenquellen kombiniert. Beide Datenquellen können über entsprechende Interfaces in MATSim eingelesen werden und dann für die Simulation verwendet werden. Aufgrund des Charakters des Innovationsprojektes wurde auf manuelle und aufwändige Fehlersuche im Verkehrsangebot und entsprechende Anpassungen im Strassennetz verzichtet. Zusätzlich wurden die Knotenwiderstände nicht berücksichtigt, können jedoch in der vorhandenen Umgebung nachgeführt werden (schon an einzelnen Beispielen geprüft). Der OeV Fahrplan setzt sich aus dem Hafas Fahrplan für die Schweiz und einem manuell aufbereiteten Fahrplan für die anliegenden deutschen und französischen Regionen zusammen. Somit ist der Fahrplan vollständig für den gewählten Perimeter. Das Angebot im Langsamverkehr (Fuss- und Veloverkehr) wurde aus Effizienzgründen nicht simuliert, die

³² www.osm.org

Distanzen und Wegzeiten werden anhand der euklidischen Distanz und Umwegfaktoren abgeschätzt. Hintergrund hierzu war der zusätzliche Bearbeitungsaufwand; der Rechenaufwand kann als machbar abgeschätzt werden, wegen der mehrheitlich kurzen Wege, dies müsste jedoch separat überprüft werden. Ausserhalb des Perimeters wird der Fahrplan ebenfalls vollständig abgedeckt für die Schweiz; in Deutschland und Frankreich werden die wichtigsten Linien abgedeckt. Im MIV wird das Angebot ausserhalb des Perimeters stufenweise ausgedünnt.

Das Modell wurde mit verfügbaren Zählstellendaten verglichen. Die Zuordnung der MIV Zählstellen geschieht richtungsgetreuen und vollständig automatisiert. Die Nacharbeiten fokussierten auf die korrekte Abbildung des grenzquerenden Verkehrs, ein wichtiger Bestandteil der trinationalen Region Basel. Die OeV Zählstellen basieren auf die Ein- und Aussteiger bei den OeV Haltestellen.

Simulation

Die Simulation findet in der MATSim Umgebung statt (Kapitel 3.1.2). Die MATSim Simulation optimiert standardmässig die Pläne der Agenten hinsichtlich Routen- und Verkehrsmittelwahl und Wahl der Abfahrtszeiten. Ein Vorteil ist die Modellierung verschiedener Elemente der Wegeketten während der Simulation, aufgrund der Nutzenparameter der Agenten. Es werden Routenwahl, Verkehrsmittelwahl oder die Abfahrtszeiten iterativ so gewählt, dass der Nutzen der Agenten maximiert wird. Die möglichen Optimierungsschritte können in Modulen bei Bedarf hinzugeschaltet oder für Analysezwecke ausgeschaltet werden. Diese Modularität ermöglicht eine projektspezifische Modularität aufgrund der spezifischen Anforderungen. Eine Übersicht über die iterative Optimierung ist in Abb. 32 dargestellt.

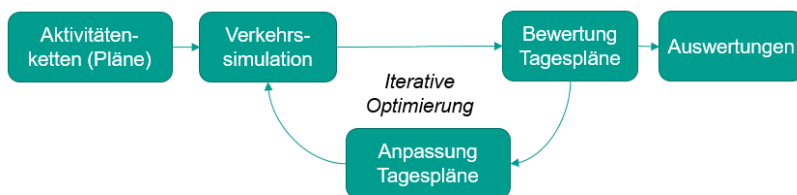


Abb. 32 Übersicht Simulation und Optimierungsstrategien innerhalb MATSim Framework.

Im ABVM Basel werden folgende Strategien implementiert, welche schon in anderen Projekten erfolgreich eingesetzt worden sind und sich etabliert haben:

- Routenwahl MIV zeitlich differenziert
- Berücksichtigung der Zugangszeit MIV und OeV
- Eingeschränkte Anpassung der Aktivitätendauer und Abfahrtszeit (innerhalb eines Zeitfensters von +/- 30 Minuten von der im Aktivitätsplan vorgesehenen Abfahrtszeit, damit Ausreisser vermieden werden)
- Detaillierter OeV Router „Raptor“ mit vollständigem Fahrplan zeitlich differenziert
- Verkehrsmittelwahl (MIV, OeV, Velo und Fussverkehr)

Bei der Routenwahl wird das Fahrzeug- respektive Personenverhalten sekundengenau und ereignisbasiert abgebildet und Staueffekte einzelner Fahrzeuge realitätsnah abgebildet. Zusätzlich werden die unterschiedlichen Zugangszeiten zum Fahrzeug berücksichtigt, welche in Abhängigkeit der geographischen Verortung des Startpunktes und Endpunktes abgeschätzt wurden.

Der OeV Router erfolgt fahrplangenau gemäss den Raptor Ansatz (M. Rieser et al., 2018). Die verschiedenen Bestandteile der OeV Wege können dabei separat bewertet werden, und nach dem Routing auch separat ausgewertet werden. Der gesamte OeV Fahrplan wird simuliert (siehe auch Abb. 45). Damit können alle Verbindungen und tageszeitlichen Schwankungen abgedeckt werden.

Parameterschätzung

Die Entscheidungswahlmodelle sind ähnlich wie in aggregierten Modellen, die werden jedoch für die einzelnen Agenten angewendet, im Vergleich zu verhaltenshomogenen Gruppen und deren kontinuierlichen Mengen an Verkehrsteilnehmer in aggregierten Modellen. Zusätzlich spielt die Eigenschaft der Wegeketten bei ABM Modellen eine zentrale Rolle. Im ABVM Basel werden die Zielwahl (primär und sekundär) umfangreich modelliert. Zusätzlich wird der Einfluss der Grenz-Kordone, sowie die Einhaltung der Randsummen, welche für ein Entscheidungswahlmodell eine deutliche Steigerung der Genauigkeit ermöglicht, berücksichtigt. Die Wegeketten bilden die Eigenschaften des MZMV Ergebnisse ab und integrieren auch raumspezifische statistische Daten des BfS (siehe auch Kapitel 6.3.1), hier wäre eine spezifische Neuschätzung dieses Modells hilfreich um die Prognosefähigkeit auf dieser Stufe zu optimieren.

Die Simulation in MATSim beinhaltet anschliessend die Verkehrsmittelwahl, Routenwahl und die Wahl der Abfahrtszeit. Der Simulation in MATSim liegt eine komplette Nutzenfunktion zugrunde. Die Auswahl der Wege wird in der ABVM Basel Implementierung in einem MNL Modell mit allen Variablen, welche für die Verkehrsmittelwahl, Routenwahl und die Wahl der Abfahrtszeit erforderlich sind, abgebildet. Die Nutzenfunktion wurde aus Ressourcengründen nicht nochmals neu geschätzt, könnte jedoch aus dem MZMV resp. aus Mobilitätstagebücher geschätzt werden. Aus diesem Grund wurden die Parameterwerte aus den Resultate der SP/RP Studien verwendet wie auch von bestehenden MATSim Anwendungen. Die Parameterverhältnisse entsprechen bei der Wahrnehmung von Reisekosten und -zeit der in der Schweiz gängigen Werte der vorhandenen SP/RP Studien. Dies erlaubt eine vollständige Bewertung der Wegeketten, sowie eine Genauigkeit, welche eine sehr feine Aggregation zulässt, e.g. Spitzen-10min oder sogar Spitzenminuten im OeV oder eine feine Tagesunterteilung (Abb. 33). Weitere Beschreibungen folgen dann im Modellvergleich (Kapitel 6).

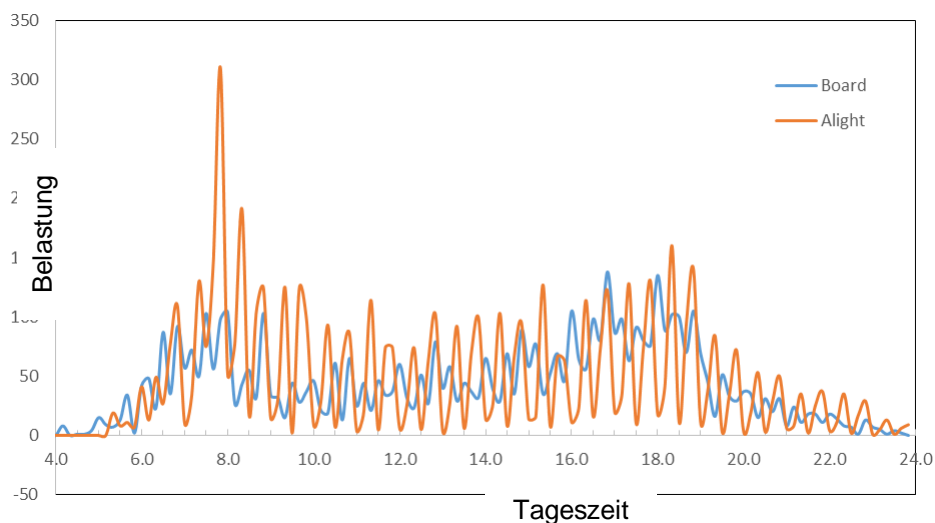


Abb. 33 Detaillierte Ganglinie eines Beispiel-Bahnhofs mit den fluktuierenden Ein- und Aussteigerwerten (board und alight), mit den Spitzenbelastungen aufgrund des Taktfahrplans.

Kalibrierung

Aufgrund des Charakters des Innovationsprojektes und den limitierten Ressourcen bei der Modellerstellung wurde beim ABVM Basel auf eine automatische Kalibrierung und eine Veränderung der Nachfrage verzichtet. Die Kalibrierung und der Umfang hängen auch stark von der Zielsetzung zusammen und müssen deshalb abgewogen werden. Der Vorteil bei einem Verzicht ist die vollständige Kontrolle über die Nachfrage und die Ursachen bei

Abweichungen, bei Szenarien wie auch Prognoseberechnungen. In MATSim sind verschiedene Kalibrierungsmöglichkeiten vorhanden. Möglichkeiten welche innerhalb des MATSim Frameworks erstellt wurden sind Cadyts und Optyds (Flötteröd, 2017; Flötteröd et al., 2012). Cadyts schlägt eine Veränderung der Anzahl Pläne auf gewissen Querschnitten vor, um die Vorgaben der Zählstellen anzunähern, und trotzdem konsistent mit den Eingabedaten zu bleiben (MZMV), unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen. Optyds verändert die Simulationsparameter innerhalb einer Bandbreite, um externe Zielvariablen anzunähern, z.B. ebenfalls Zählstellen.

Auswertungen

Die Wege, Etappen, Reise wie auch die Aktivitäten sind vollständig auswertbar in Raum und Zeit. Es sind deshalb alle Auswertungen möglich, welche sich auf die Tagespläne, Aktivitäten und Abläufe innerhalb der Simulation beziehen. Die Aktivitäten und Reisen der Agenten können in sekundengenauen Schritten verfolgt werden, immer in Verbindung mit den personenspezifischen und fahrzeugspezifischen Informationen. Die verschiedenen Ereignisse während eines Tagesplans werden ausgeschrieben und sind später verfügbar. Bewährt hat sich ein Format ähnlich wie der MZMV (MATSim Modul: travel summary) welches dann auch direkt einen Vergleich mit dem MZMV ermöglicht. Weiter ermöglichen die GIS Schnittstellen einen aggregierten Blick auf die Modellresultate, ähnlich zu den Auswertungen in TransCAD oder Visum. Ein Teil der Auswertungsmöglichkeiten sind unter <https://matsim.org/extensions/> publiziert.

- Auswertung mit „travel summary“ Modul
 - Tagespläne Format (Tabellen), ähnlich MZMV
 - Informationen aller örtlichen Informationen, Routen, Tageszeiten und Zeitdauer
- Graphische Standard-Auswertungen über GIS Interfaces, dis-/aggregiert
 - MIV Daten können zeitlich beliebig aggregiert werden, z.B. auf Stundenwerte. und als Belastungsplots und Differenzplots ausgegeben werden, sowie nach Unterscheidungsmerkmalen der Personen (e.g. Mobilitätswerkzeugbesitz), sowie Wege (e.g. Zweck).
 - Im OeV können liniengenaue und streckengenaue Auswertungen gemacht werden, disaggregiert oder aggregiert.
 - Ein- und Aussteiger sind im OeV wichtige Größen und können direkt aus der Simulation ohne Zwischenschritte ausgewertet werden.
 - Verkehrsspinnen (zeitlich und räumlich aggregiert), erweiterte Spinnen mit gesamter, gerouteter Wegekette über den Tag
 - Tabellen mit Fahrplan- und Verkehrsleistung
 - Aktivitätenräume der Personen
- Umrechnung von Kenngrößen in Matrizenformat auf beliebige Zonen-Zonen Beziehungen aggregiert
- Vergleich der Zählwerte und Simulationswerte
- Das lizenzierte Produkt Via ist von Simunto verfügbar (www.simunto.ch). Via ermöglicht vielfältige aggregierte und disaggregierte Auswertungen wie auch Video-Ausschnitte
- Die Bibliotheken von TU Berlin sind als Open-source Software frei verfügbar erfordern jedoch Programmierkenntnisse (<https://viz.vsp.tu-berlin.de/>)

6 Modellvergleich

6.1 Übersicht Modellvergleich

In diesem Kapitel wird anhand des GVM Region Basel und des ABVM Basel zwei verbreitete Modellansätze beispielhaft miteinander verglichen. Das Ziel ist es aufzuzeigen, wie sich die verschiedenen Teilschritte eines Modells bezüglich der Methodik und bei der Modellanwendung unterscheiden und wie sich diese Unterschiede auf die Resultate der jeweiligen Arbeitsschritte auswirken. Anhand der Beispiele lassen sich somit klarere und konkrete Unterschiede feststellen und thematisieren. Zusätzlich wird die räumliche Aggregation in einem separaten Modell überprüft. Der Modellperimeter ist identisch und umfasst die tri-nationale Region Basel. Neben der vorhergehenden Berichtsergebnisse dienen dann die Erkenntnisse dieses Kapitels ebenfalls der Synthese und der Entscheidungshilfe für die Praxis (siehe nachfolgendes Kapitel 0).

Aufgrund der vorhandenen Modellanwendungen können konkret zwei Modellansätze miteinander verglichen und thematisiert werden. Es ist jedoch hervorzuheben, dass die Modelle für einen bestimmten Zweck und eine bestimmte Region erstellt wurden und darum gewisse Modelleigenschaften besitzen. Das GVM Region Basel wird vom Kanton Basel-Stadt und –Landschaft betrieben und für Planungsaufgaben eingesetzt; das ABVM Basel wurde in einem Innovationsprojekt der SBB erstellt und für Anwendungen und Szenarioberechnungen eingesetzt, bei welchen eine ABM Funktionalität vorteilig ist. Es kann daher nicht gesagt werden, dass aufgrund einer fehlenden Modellkomponente diese zukünftig nicht doch integriert werden könnte. Es könnte sein, dass dies aus Gründen der Zielsetzung und Modellanwendung bis jetzt nicht erforderlich und zweckmässig gewesen wäre.

Die Wahl der Modellregion Basel erfolgt aus zwei Gründen: Einerseits ist das Gesamtverkehrsmodell bezüglich der hohen räumlichen Auflösung (hektarfeine Zonierung) in der Schweiz einzigartig. Dies lässt eine Analyse zu, in welcher der Vorteil einer potenziell höheren Modellgenauigkeit, der mit einem räumlich und zeitlich diskreten agenten-basierten Ansatzes möglich ist, auch mit einem weg-basierten, aber räumlich fein aufgelösten Modellansatz zu erreichen ist. Andererseits bietet sich durch die nachträgliche räumliche Aggregation im dritten Modell mit weniger Verkehrszonen auch die Möglichkeit, Unterschiede zwischen einem für die Schweiz „typischen“ makroskopischen Modell und einem aktivitätsbasierten Modell herauszuarbeiten und an Beispielen praxisnah anzuwenden. Es kommen deshalb insgesamt drei Modelle zum Einsatz welche auf derselben Region Basel und den gleichen Grundlagedaten beruhen:

- **Gesamtverkehrsmodell der Region Basel (GVM Region Basel)**, ein weg-basiertes Modell mit detaillierten Grundlagedaten und feiner, zonen-basierter Ziel- und Verkehrsmittelwahl und Umlegung
- **Aggregiertes Gesamtverkehrsmodell** gemäss Abschnitt 5.1.1: Ein weg-basiertes Modell analog zur GVM Region Basel Methodik, jedoch mit einer räumlichen Aggregation welche grobkörniger ist als diejenige des GVM Region Basel, die jedoch ähnlich ist wie andere in der Schweiz verwendeten regionalen Modelle. Das weg-basierte Modell mit der räumlichen Aggregation wird speziell für die Anbindungen und die dadurch entstehenden Effekte herbeigezogen, weil durch die Zonenanbindungen die grössten Unterschiede zu erwarten sind. Ansonsten wird auf den Vergleich zwischen den regulären (hektar-basierten) GVM Region Basel und dem ABVM Basel fokussiert.
- **Aktivitätenbasiertes Nachfragemodell** mit synthetischer Population, Aktivitätenketten-Berechnung, detaillierter Zielwahl **und agenten-basierter MATSim-Angebotssimulation** (aktivitätenbasiertes Verkehrsmodell Basel resp. ABVM Basel, siehe Abschnitt 5.2)

6.1.1 Ablauf Modellvergleich

Übersicht Modellvergleich

Abb. 34 gibt einen Überblick über die einzelnen Modellkomponenten. Die linke Hälfte der Abbildung beschreibt repräsentativ die makroskopischen Modellansätze und deren Modellkomponenten; die rechte Hälfte diejenigen der aktivitätenbasierten Modellansätze. Der Ablauf bei einer Modellberechnung erfolgt generell von oben nach unten, wobei Rückkopplungen ebenfalls möglich sind, angedeutet in Abb. 34 durch die Pfeile nach oben („grosse“ Schleife).

Beide Modellansätze haben zu einem grossen Teil dieselben oder ähnliche Grundlagedaten, mit gewissen spezifischen Unterschieden. Ein spezifischer Unterschied besteht bei der synthetischen Population welche für die ABM Modellierung notwendig ist. Diese basiert auf räumlich verteilten soziodemographischen Grundlagedaten und ist der eigentlichen Nachfrageberechnung zwischengelagert. Die Berechnung der Aktivitätenketten und die Verkehrsnachfrageberechnung erfolgen beim ABVM Basel auf Grundlage der synthetischen Population. Der zwischengelagerte Schritt der synthetischen Population ist im aggregierten Modell nicht zwingend notwendig; das aggregierte Modell schätzt die verkehrliche Nachfrage direkt aus den Strukturdaten und deren Variablen (Erzeugung und Attraktion). Danach erfolgen im aggregierten Modell die Zielwahl und die Verkehrsmittelwahl simultan oder sequentiell auf Basis der Nachfragesegmente. Im Gegensatz dazu werden im ABM die Aktivitäten- und Wegeketten berechnet, und zwar für jeden Agenten in der synthetischen Population. Die Wegeketten enthalten ebenfalls die Ziele resp. Standorte der einzelnen Aktivitäten, sowie die verwendeten Verkehrsmittel. Aufgrund der vielen Freiheitsgrade werden in einem ABM ebenfalls einzelne Modellschritte berechnet und nicht die gesamte Wegekette mit allen Ausprägungen in einem Schritt und simultan. Im ABVM Basel zum Beispiel wird die primäre und sekundäre Zielwahl sequentiell gerechnet. Methodisch begründet wird diese sequentielle Berechnung durch die Unterscheidung in längerfristige Entscheidungswahl (primäre Zielwahl), und kurzfristige Entscheidungswahl (sekundäre Zielwahl). Zusätzlich werden in einem ABM bei der Definition der Wegeketten die Tageszeiten der Aktivitäten resp. die Abfahrtszeiten bestimmt.

Die Routenwahl erfolgt beim aggregierten Modellansatz innerhalb der Umlegung, welche die Routen unter bestimmten Nebenbedingungen berechnet, getrennt für die einzelnen Verkehrsmittel. Eine agentenbasierte Simulation, wie sie einem ABM oft (aber nicht zwingend) nachgelagert ist, beinhaltet die Berechnung der Routen einzelner Agenten resp. Fahrzeuge, in Abhängigkeit der genauen Tageszeit und aller anderen Agenten, respektive Fahrzeuge. Statt der agentenbasierten Simulation könnte wie bei einem aggregierten Modell aufgrund der in den Aktivitätsplänen definierten Wege auch eine Umlegung gerechnet werden. Die Resultate aus der Umlegung respektive Simulation umfassen die Strecken-, Knoten- und Linienbelastung wie auch die Reisezeiten und -distanzen; bei der agentenbasierten Simulation kommt zusätzlich noch die Auswertung der Aktivitäten sowie die tageszeitliche Auswertung dazu (zum Beispiel die detaillierte Ganglinie). Das ganze Modell, ob aggregiert oder ABM, muss auf empirisch erhobene Daten kalibriert werden. Die Prognose sowie die Szenarienberechnungen erfolgen durch die Veränderung der Eingabedaten, insbesondere der Nachfrage oder Angebote, unter Berücksichtigung der Rückkopplungen.

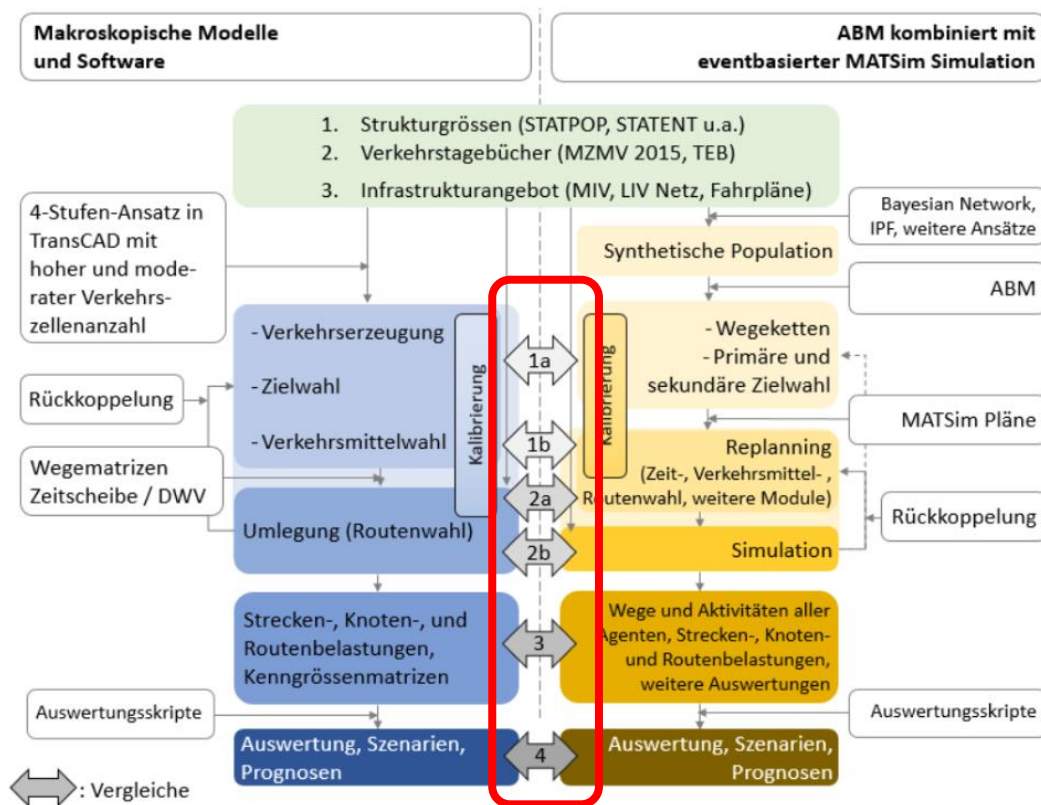


Abb. 34 Übersicht Modellvergleich mit den einzelnen Teilschritten 1a/b, 2a/b, 3, 4.

Inhalt und Gliederung des Modellvergleichs

Der folgende Modellvergleich fokussiert sich auf die einzelnen Komponenten des aggregierten Modells und des ABVMs (siehe auch Abb. 34). Für den Modellvergleich wurden exemplarisch bestimmte Modellkomponenten definiert, um diese detailliert zu vergleichen. Die Auswahl erfolgt anhand zwei Kriterien. Einerseits sollen die wichtigsten Modellkomponenten bei der Untersuchung berücksichtigt werden. Andererseits sollen diejenigen Komponenten untersucht werden, bei denen die grössten methodischen Unterschiede zwischen aggregierten und ABM Modellen vorliegen. Modellkomponenten, welche sich nicht oder nur wenig zwischen den Modellen unterscheiden, wurden nicht detailliert untersucht. Der Vergleich orientiert sich zusätzlich an der Forschungsarbeit „Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen“ (N. Rieser, Tasnady, de Vries, et al., 2018); Kenngrößen zur Qualitätsbeurteilung wurden aus dieser Forschungsarbeit übernommen.

Für den Modellvergleich wurden aus den obigen Gründen folgende Elemente untersucht:

- Teil 1: Vergleich der Modelleingabedaten
 - Anbindungslängen
 - Synthetische Population (nur ABVM)
 - Zonengranularität (nur GVM Region Basel)
- Teil 2: Vergleich der Nachfrageberechnung
 - Erzeugung: Mittlere Anzahl Wege pro Person
 - Reiseweitenverteilung
 - Vergleich produzierte und angezogene Wege
 - Verkehrsmittelwahl
- Teil 3: Vergleich der Simulation
 - Verkehrsleistung und Verkehrszeitaufwand
 - Verkehrsstärken
 - Konvergenz und Abbruchkriterium
- Teil 4: Konvergenzanalysen
 - Konvergenz beim MIV

- Grosse Schlaufe
- Teil 5: Realitätstests
 - MIV Szenario: Streckensperrung
 - OeV Szenario: Taktverdoppelung
- Teil 6: Szenarienvergleich
 - Flächennutzungsszenario (Fokus umfassende Modellanwendung)
 - Maut (Fokus Umlegung/Simulation)
 - Homeoffice Szenario (Fokus Nachfrage)
- Fazit Modellvergleich

6.1.2 Kriterien für den Modellvergleich

Es werden im Folgenden fünf verschiedene Kriterien untersucht: Methodik und Funktionalität, Datengrundlagen, Aufwandabschätzung, Rechenzeit und Verfügbarkeit der Software. Die Methodik, Funktionalität und die notwendigen Datengrundlagen werden in den einzelnen Kapiteln und Modellschritten beschrieben. Die Aufwandabschätzung, Rechenzeit und Verfügbarkeit der Software werden anschliessend zusammenfassend erläutert (Kapitel 6.8.1, 6.8.2, 6.8.3).

- **Methodik und Funktionalität:** Für alle Modellschritte werden Methodik und Funktionalität überprüft, dies geschieht im Folgenden spezifisch für die einzelnen untersuchten Teilschritte. Es wird die angewendete Methodik beschrieben und untersucht, ob die Methodik für den Modellschritt geeignet ist.
- **Erforderliche Datengrundlagen:** Die Anforderungen an die Datengrundlagen werden für alle Teilschritte untersucht. Es wird gegebenenfalls erwähnt, ob zukünftig weitere Daten beschafft werden müssen und in welchem Zusammenhang diese Daten stehen.
- **Aufwandabschätzung:** Es wird der für die Teilschritte der notwendige Bearbeitungsaufwand geschätzt und zwischen den Modellen verglichen. Dies geschieht über alle Modellschritte und am Schluss des Modellvergleichs.
- **Rechenzeit:** Die Rechenzeit für die Teilschritte der einzelnen Modellansätze unterscheidet sich aufgrund der methodischen Unterschiede teilweise beträchtlich. Der Rechenzeitbedarf wird deshalb detailliert aufgelistet, inklusive den Realitätstests und den Szenarien. Dies geschieht über alle Modellschritte und am Schluss des Modellvergleichs.
- **Verfügbarkeit der Software:** Die Verfügbarkeit und Funktionalität lizenzierter und Open-Source Softwarelösungen und deren Anwendungsfreundlichkeit wird für die Teilschritte der verschiedenen Modellansätze untersucht.

6.1.3 Kenngrössen für die Modellgüte

Verschiedene Kenngrössen können die Qualität eines Verkehrsmodells quantitativ untersuchen. Oft spielen dabei unabhängige Vergleichsgrössen eine wesentliche Rolle. Die bestehende Literatur zu den quantitativen Kenngrössen wurde umfassend im SVI Projekt „Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen“ (N. Rieser, Tasnady, de Vries, et al., 2018) untersucht, es wurde deshalb die Theorie verwendet und die Kenngrössen entsprechend ausgewertet.

Scalable Quality Value (SQV)

Der SQV Wert (Scalable Quality Value) ist ein Gütemass zur Bewertung von Einzelwerten und Mengen von Einzelwerten, welches durch seine Skalierbarkeit auf verschiedene Wertebereiche anwendbar ist. Die Skalierbarkeit ist eine wichtige Neuerung gegenüber anderen Gütemasse. Der SQV kann mit der folgenden Formel berechnet werden, wobei c der Messwert ist, m die Standardabweichung und f der Skalierfaktor:

$$g_{sqv} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{a^2}{f * c}}} \quad a = |m - c|$$

Der Skalierfaktor f muss je nachdem, für welche Werte der SQV berechnet wird, angepasst werden. Eine Übersicht der verschiedenen f -Werten und deren Gebrauch sind in *Tab. 6* ersichtlich.

Tab. 6. Abschätzung des Skalierfaktors f

Kenngrösse	Grössenordnung	f
Zahl der Personenwege Tag (gesamt, pro Modus, pro Zweck)	10^0	1
Mittlere Wegelänge in Kilometer	10^1	10
Zeitdauer aller Wege pro Tag in Minuten	10^2	100
Verkehrsstärke Stunde	10^3	1'000
Verkehrsstärken Tag	10^4	10'000

In *Tab. 7* ist eine Übersicht der Qualitätsbereiche des SQV-Wertes, welche man für die Ermittlung der Genauigkeit eines Modells zu Hilfe ziehen kann.

Tab. 7 Qualitätsbereiche des SQV

g _{SQV}	Beurteilung
0.90	Sehr gute Übereinstimmung. Diese Werte könnten z.B. nach einer Matrixkorrektur gefordert werden.
0.85	Gute Übereinstimmung
0.80	Akzeptable Übereinstimmung
0.75	Ausreichende Übereinstimmung. Diese Abweichung ist insbesondere dann angemessen, wenn die Qualität der Messwerte eingeschränkt ist

Coincidence Ratio (CR)

Mit dem CR kann untersucht werden, wie gut sich zwei Verteilungen überdecken. Dazu werden die Werte in Klassen eingeteilt. Die jeweiligen relativen Einzelhäufigkeiten einer Klasse sind die Eingangsgrössen für die Berechnung. Da es sich um relative Werte handelt, liegt der CR-Wert immer zwischen 0 und 1.0. 1.0 entspricht dabei einer vollständigen Übereinstimmung und 0 keinerlei Übereinstimmung.

Laut (N. Rieser, Tasnady, de Vries, et al., 2018) wird ab einem Wert von 0.7 von einer guten Übereinstimmung gesprochen.

$$CR(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^K \min\{p_k, q_k\}}{\sum_{k=1}^K \max\{p_k, q_k\}}$$

Mit

$$p_k = \frac{x_k}{\sum_{k=1}^K x_k} \quad \text{und} \quad q_k = \frac{y_k}{\sum_{k=1}^K y_k}$$

K = Klassenzahl

x_k bzw. y_k Häufigkeit in der Klasse k ($k \in \mathbb{Z}^* +$)

6.2 Teil 1: Vergleich der Modelleingabedaten

Die Modelleingabedaten sind zwischen den Modellen grundsätzlich ähnlich. Aufgrund der methodischen Unterscheidung zwischen dem aggregierten Modell und dem ABVM wurden drei Aspekte verfeinert untersucht, nämlich die *Anbindungslängen* (GVM und ABVM), die *Zonengranularität* (GVM Region Basel), und die *synthetische Population* (ABVM).

6.2.1 Anbindungslängen

Methodik und Funktionalität

Im Folgenden werden die Anbindungen MIV zwischen den Modellen GVM Region Basel und ABVM Basel verglichen. Die Anbindung wird hierzu definiert als Verbindung zwischen dem Centroid / Bezirk (aggr. Modell) resp. Facility, also zum Beispiel Wohnort (ABVM), und dem Verkehrsangebot.

Im GVM Region Basel erfolgt die Anbindung senkrecht zur nächstgelegenen Strecke des MIV Netzes. Die Strecke wird dabei falls notwendig geteilt. Aufgrund der hochaufgelösten, hektarfeinen Zonen ist eine einzelne Anbindung ausreichend genau hinsichtlich der räumlichen Aggregation.

Im vorliegenden ABVM Basel erfolgt die Anbindung MIV zur nächstgelegenen Strecke im rechten Winkel, wo das Fahrzeug das erste Mal in der Simulation berücksichtigt wird. Der Fahrweg umfasst dabei den direktesten Weg (Luftlinie) zur nächstgelegenen Strecke ohne Berücksichtigung anderer Fahrzeuge. Die Anbindung OeV erfolgt in einem definierten Umkreis gemäss Einstellungen des Routing-Algorithmus, ebenfalls auf dem direktesten Weg (Luftlinie) (Optional kann die Verbindung zum Bahnhof auch über Fusswege geroutet werden, dies wurde jedoch im ABVM Basel bisher nicht umgesetzt.). Die Zuordnung zu den Aktivitätsstandorten (Gebäude) erfolgt in der synthetischen Population. (Falls vorhanden können bei Arbeits- und Freizeitstandorten auch die Öffnungszeiten definiert werden.) Sobald diese Verortung erfolgt ist, kann angenommen werden, dass die Zuordnung zu den Strassenabschnitten (MIV) sowie zu den OeV Haltestellen aufgrund des kürzesten Weges plausibel ist und eine separate Aufteilung auf verschiedene Strecken (wie bei aggregierten Modellen oft mit angenommenen Anteilen umgesetzt) nicht mehr erforderlich ist.

Erforderliche Grundlagedaten

Für das GVM Region Basel umfassen die Grundlagen die vorgängige räumliche Definition aller Zonen, die Definition des Centroiden („Schwerpunkt“) sowie das zugrundeliegende Angebot MIV, OeV oder Langsamverkehr. Das Zonenformat erfolgt direkt aus den Hektar-raster Erhebung des BFS (Statpop / Statent).

Für die Anbindungen im ABVM Basel werden die genauen Zuordnungen der Agenten zu den Aktivitätenstandorten verwendet, welche durch die synthetische Population und die Zielwahl gegeben sind. Für den OeV Zugang zu Fuss kann ein Fussverkehrsnetz definiert werden (wurde noch nicht im ABVM umgesetzt).

Resultate

Die durchschnittliche, absolute und relative Anbindungslänge über alle Distanzen sind in Tab. 8 ersichtlich, separat für das GVM Region Basel und das ABVM Basel ausgewertet. Zusätzlich hinzugefügt wurde eine Auswertung des räumlich aggregierten GVM Region Basel, welches grössere Zonen aufweist (siehe Kapitel 6.2.2 für weiter Erläuterungen). Für diese Berechnungen wurden die absoluten Distanzen sowie die relativen (Anbindungslänge / Gesamtlänge) verglichen.

Tab. 8 Vergleich der durchschnittlichen Anbindungsängen

	Relativ [%]	Absolut [m]
ABVM Basel	0.86	26
GVM Region Basel	0.44	31
GVM Region Basel räumlich aggregiert	0.84	63

Tab. 8 zeigt, dass die Anbindungsängen bei beiden Modellen sehr gering sind, absolut und im Vergleich zur Gesamtwegedistanz. Bei beiden Modellen liegt diese bei ca. 30 m, dies entspricht einer relativen Anbindungslänge von unter einem Prozent. Die durchschnittlich kurze Anbindungslänge beim aggregierten GVM Region Basel ergibt sich aufgrund der kleinen Zonengrösse, insbesondere die grosse Zahl der verwendeten Hektaren, welche eine sehr detaillierte Modellierung ermöglicht. Beim ABVM ist die Anbindung generell sehr kurz, weil die Verortung der Aktivitäten auf die Gebäude erfolgt und diese oft nahe an das MIV Verkehrsnetz angeschlossen sind. Es wird vermutet, dass der etwas höhere relative Wert beim ABVM auf die grössere Anzahl kurzer Wege (keine „innerzonalen“ Wege beim ABVM) zurückzuführen ist.

Eine separate Auswertung für das ABVM Basel ist in Abb. 35 dargestellt, hinsichtlich der Anteile der Anbindungsstrecke an die gesamte Wegedistanz. Es wurde pro Distanzklasse die Anzahl Wege ermittelt sowie die durchschnittliche absolute Anbindungslänge in Metern. In einer zweiten Auswertung wurde anstelle der absoluten die relative durchschnittliche Anbindungslänge in Prozent dargestellt. Für die Darstellung aller Wege wurde eine Klassengrenze von 5 km gewählt. Bei der Darstellung kurzer Distanzen (bis maximal 5 km) wurde diese Klassengrenze auf 0.25 km gesetzt. Es ist generell ersichtlich, dass die Anteile der Anbindungsstrecken im Vergleich zu gesamten Wegedistanz sehr klein sind, absolut wie auch relativ.

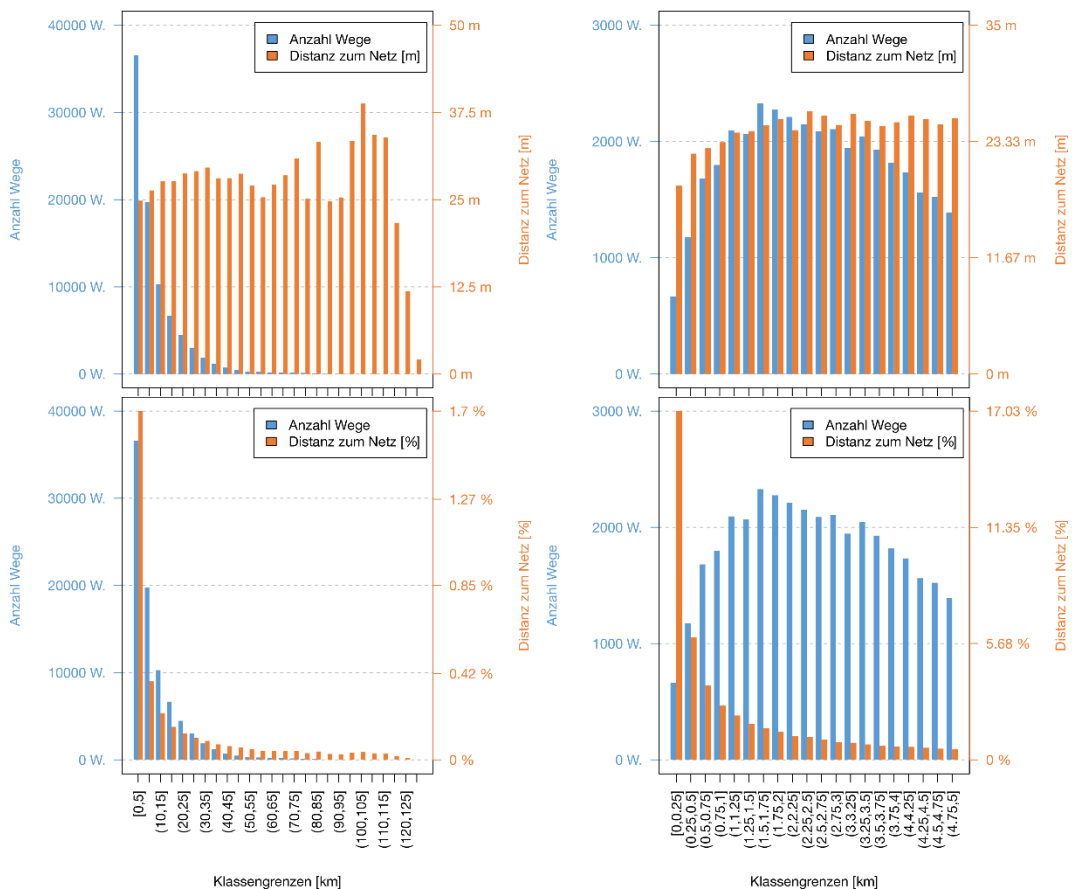


Abb. 35. Die Anteile der Anbindungsstrecke im Vergleich zur gesamten Wegedistanz ist absolut (oben) und relativ (unten) ausgewertet, über alle Wege (links) und mit Fokus auf die kurzen Wege (rechts).

Fazit

Es ist ersichtlich, dass die Methodik und die Grundlagedaten in beiden Modellen vorhanden sind. Beide Ansätze haben Vorteile wie auch gewisse Herausforderungen aufgrund der verwendeten Methodik. Die Herausforderung im GVM ist die konzentrierte Einspeisung über eine Anbindung welche im Vergleich zu einem vollständig automatischen Verfahren einen händischen Zusatzaufwand bedeutet. Die Herausforderung im ABVM ist die Feinverteilung auf die eigentlichen Gebäude, welche ebenfalls einen rechnerischen und händischen Zusatzaufwand bedeutet, gegenüber einem vollständig automatischen Verfahren.

6.2.2 Unterschiedliche Zonenaggregation

Der Hintergrund dieser Auswertung ist die sehr feine Zonierung, welche beim GVM Region Basel zum Tragen kommt, insbesondere im Vergleich zu den vorhandenen Modellen in anderen Regionen der Schweiz ähnlicher Grössenordnung.

Der Inhalt der Analyse zum Genauigkeitsverlust durch Zonenaggregation bezieht sich auf:

- a) Intrazonale Wege, die nicht auf das Netz umgelegt werden
- b) Veränderungen der berechneten Kenngrössen durch die Zonenaggregation
- c) Verlust der Prognosefähigkeit bei Anwendungen/Szenarien am Beispiel einer Siedlungsverdichtung, einer neuen ÖV-Haltestelle und kleinräumiger Erschliessung beim Langsamverkehr

Die Methodik der Zonenaggregation wird in Kapitel 5.1.1 erläutert, die Auswertungen basieren im Folgenden auf dieser Aggregation und den gewonnenen Resultaten.

Erforderliche Datengrundlagen

Für die Aggregation der Verkehrszonen braucht es lediglich einen Zonenlayer mit der gewünschten Zonenaggregation. Am besten geschieht die Zonenaggregation in einem GIS oder einem Programm mit GIS-Funktionalitäten (wie z.B. TransCAD).

Resultate

Als Resultat der Zonenaggregation können folgende Erkenntnisse festgehalten werden:

- Intrazonale Wege (Zellbinnenverkehr):

Die räumliche Aggregation der Zonen führt zu mehr intrazonalen Wegen, die nicht auf das Verkehrsnetz umgelegt werden können (Tab. 9). So steigt der Anteil bei den MIV-Weegen von 0.8% auf 6.5%, bei den mit dem Velo zurückgelegten Wegen von 2.5% auf 12.1% und bei den Fusswegen auf rund 28% aller Wege innerhalb der gleichen Zone. Beim ÖV gibt es (praktisch) keine intrazonalen Wege. Der Grund liegt darin, dass bei der aggregierten Zonierung des NPVM für jede ÖV-Haltestelle eine eigene Zone generiert wurde.

Tab. 9 Anteil der intrazonalen Wege (Modell-Kernzone des GVM Region Basel).

Modus	GVM Region Basel	Aggr. GVM Region Basel	Abw.
MIV	0.8%	6.5%	+5.7%
OEV	0.0%	0.1%	+0.1%
VELO	2.5%	12.1%	+9.6%
FUSS	6.3%	28.0%	+21.7%

- Unterschiede bei den Kenngrössen:

Eine zu grobe Zonierung und ungenügende Auflösung der Netze kann zu Unschärfen in der Abbildung der Kenngrössen und der darauf basierenden Verkehrsnachfrage führen. Diese Unterschiede wurden jedoch in dieser Studie nicht quantitativ ausgewertet.

Beim MIV führt die Zonenanbindung im aggregierten Modell teilweise zu punktuellen Überlastungen im Strassennetz und dadurch zu unrealistischen (zu hohen) Fahrzeiten. Die Feinverteilung der MIV-Fahrten von/in die Zonen läuft über Anbindungen anstatt über das untergeordnete Strassennetz. Bei kürzeren Fahrten laufen ausserdem die Wege teilweise nur über Zonenanbindungen.

Beim ÖV werden kürzere Verbindungen, oder die "letzte Meile" von/zur Zielzone teilweise nur über Zonen-Anbindungen erreicht. Damit wird jedoch in diesen Fällen die Fahrzeit im ÖV, die Startwartezeit, Umsteigewartezeit und Umsteigezahl bei den Kenngrössen gar nicht berücksichtigt. Liegen mehrere ÖV-Haltestellen in der gleichen Zone, so werden Kenngrössen für Beziehungen zwischen diesen Haltestellen nur über die Anbindung abgebildet.

- Verlust an Prognosefähigkeit:

Bei der Modellierung von Entwicklungsschwerpunkten (ESP) kann es vorkommen, dass alle ESP in derselben Verkehrsmodellzone liegen. Die Zugangszeiten resp. Zugangswiderstände zum Bahnhof resp. ÖV-Haltestelle sind dann für alle ESP-Standorte gleich gross. Die effektiven unterschiedlichen Zugangswiderstände können dann in den Kenngrössen nicht differenziert abgebildet werden. Analog zu oben wurden Unterschiede qualitativ ausgewertet.

Eine neue ÖV-Haltestelle führt im aggregierten Modell ohne Modellanpassungen (neue Anbindung, Splitten von Zonen, etc.) zu keiner korrekten ÖV-Nachfrage, da die Wege weiterhin im Zonenschwerpunkt starten resp. enden anstatt bei der neuen Haltestelle. In der Folge werden die Kenngrössen nicht korrekt abgebildet und damit die ÖV-Nachfrage verzerrt. Ohne vorgängige Modellanpassung sind neue ÖV-Haltestellen und Verdichtungsgebiete nicht prognosefähig abbildbar.

Fazit

In beiden Modellen führt eine grobe Zonierung und ungenügende Auflösung der Netze zu Unschärfen in der Abbildung der Kenngrössen und modellierten Verkehrsnachfrage. Ein Modell mit möglichst feiner Zonierung kann den Zonenbinnenverkehr stark reduzieren und die Kenngrössen als Grundlage u.a. für die Ziel- und Verkehrsmittelwahl exakter abbilden. Zudem kann mit einer Verfeinerung der Zonenstruktur, der nicht aufs Netz umlegbare Zonenbinnenverkehr stark reduziert und eine realitätsnähere Anbindung der Zonen an das Netz abgebildet werden.

Bei einer hektarfeinen Zonierung entsteht bei der Modellerstellung gegenüber herkömmlichen kantonalen Modellen, abgesehen von der Disaggregation von nicht hektarfein vorliegenden Daten, insgesamt kaum Mehraufwand. Insbesondere kann der Anbindungsaufwand reduziert werden. Bei Modellanwendungen ist jedoch durch die hohe Anzahl an OD-Beziehungen aber mit einer längeren Umlegungszeit und grösserem Speicherbedarf zu rechnen.

6.2.3 Synthetische Population

Methodik und Funktionalität

Die synthetische Population wurde im Rahmen des ABVM Basels erstellt, und zwar als Grundlage für alle weiteren Modellschritte (Übersicht in Abb. 30). Die synthetische Population umfasst die diskrete geographische Verteilung der Einwohner im Modellgebiet, inklusive ausgewählten, personenspezifischen Eigenschaften (Alter, Mobilitätswerkzeuge,

...), welche durch statistische Methoden zugeteilt wurden (im Vergleich zu einer Vollerhebung). Im Vergleich zum GVM Region Basel und der Zonierung und zugeordneten Variablen (Anzahl Personen, Anteil Mobilitätswerkzeuge) besteht eine diskrete Verortung der Personen innerhalb der synthetischen Population. Die Verortung geschieht innerhalb der Hektare zufällig auf den richtigen Gebäudetyp. Falls für das Gebäudevolumen oder die Anzahl Personen pro Gebäude eine andere Variable verfügbar ist und es der Datenschutz erlaubt, welche die Grösse beschreibt, dann kann diese für eine verfeinerte Zuordnung verwendet werden. Diese diskrete Verortung der Individuen führt zu einer zusätzlichen Information, welche durch neue, umfassende Datenquellen möglich wird und welche die verfeinerte, agentenbasierte Modellierung des ABVM ermöglicht.

Die Vorteile einer synthetischen Population sind vielseitig. Als unmittelbares Resultat können beliebige und kombinierte (Kreuz-)Auswertungen hinsichtlich der vorhandenen Variablen durchgeführt werden, ebenso für beliebige räumliche Aggregationen. Es müssen dabei im Voraus keine Nachfrageschichten oder verhaltenshomogene Gruppen definiert werden, um die Charakteristika der Bevölkerung eingeschränkt auf diese Gruppen abzubilden, die danach rigide weitergeführt werden müssen. Zusätzlich können anhand der synthetischen Population verschiedene, umfangreiche Modellrechnungen und Auswertungen getätigt werden, unter anderem aktivitätenbasierte und aggregierte Verkehrsmodelle und Flächennutzungsmodelle. Es können zukünftige Szenarien und Prognosen gerechnet und für verschiedene Anwendungen eingesetzt werden. Als weiterer Vorteil kann hinzugefügt werden, dass die synthetische Population auch Herausforderungen mit dem Datenschutz lösen kann. So können sensible Daten in einer Genauigkeit dargestellt werden, welche die Rückverfolgung auf ein Individuum verunmöglicht. Die Nachteile der synthetischen Population sind der Erstellungsaufwand und der zusätzlich erforderliche Datenaufwand; zusätzlich können Scheingenauigkeiten entstehen welche später in den Auswertungen berücksichtigt werden müssen (gilt auch für feinaufgelöste Zonen).

Die synthetische Population für das ABVM Basel umfasst die Variablen Altersklasse, Geschlecht, Beschäftigungsart- und grad (voll- oder teilzeitarbeitend), Staatszugehörigkeit, Haushaltgrösse, Führerscheinbesitz, Autobesitz, GA-, TNW Abo- und Halbtax-Besitz. Die synthetische Bevölkerung wird mit einem Bayesian Network Ansatz (ähnlich) generiert mit Randsummendaten auf Hektar- und Gemeindeebene. Die finale Verortung erfolgt auf Wohngebäude (Schwerpunkte), welche aus OpenStreetMap extrahiert wurden.

Erforderliche Datengrundlagen

Die Grundlagedaten für eine synthetische Population sind auf verschiedenen Aggregationsstufen vorhanden. Innerhalb der Schweiz besteht eine sehr hohe Datenqualität auf Hektarebene und Gemeindeebene. Wie bei der synthetischen Population des ARE sind die Daten ausreichend vorhanden, und ergänzend können noch Modellrechnungen für eine erweiterte Abschätzung der Variablen durchgeführt werden. Es muss jedoch, wie schon oben vermerkt, beachtet werden, dass die Aggregationsstufe auch in den Auswertungen berücksichtigt werden muss, um eine Scheingenauigkeit zu vermeiden. Für den Perimeter Basel bestand die Schwierigkeit, dass drei verschiedene Länder involviert sind, welche unterschiedliche Datengrundlagen und Aggregationsstufen umfassen. Die Modellerstellung des GVM Region Basel hat hier ebenfalls sehr viel und umfangreiche Vorarbeit geleistet.

Resultate

Aufgrund der Tatsache, dass für das GVM Region Basel keine synthetische Population erforderlich ist, kann hier keinen Vergleich zwischen den Modellansätzen gemacht werden. Trotzdem werden im Folgenden gewisse Abbildungen zur Veranschaulichung gezeigt. Abb. 36 zeigt einen Ausschnitt aus dem Modellgebiet. Zu sehen sind das Strassennetz in blau sowie die synthetische Population als rote Punkte. Die einzelnen Agenten der synthetischen Population sind wie oben beschrieben auf die Schwerpunkte der einzelnen Gebäude verteilt.

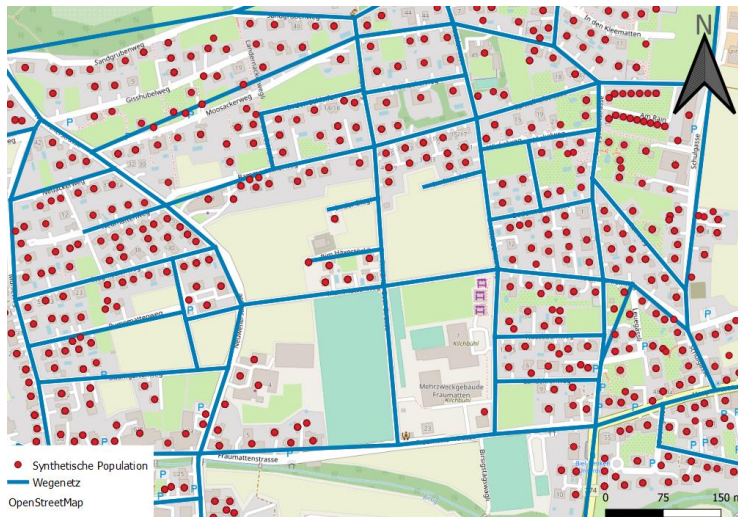


Abb. 36. Beispielausschnitt Modellgebiet mit Darstellung des verwendeten Wegenetzes sowie der synthetischen Population.

Abb. 37 zeigt die verschiedenen Auswertungsmöglichkeiten welche durch die synthetische Population ermöglicht wird. Die Bevölkerung wird unterteilt in Alter und Geschlecht und jeweils ausgewertet nach Führerausweis, Abonnementsbesitz und Beschäftigungsgrad. Weitere Auswertungen sind möglich, in Abhängigkeit der Fragestellung. Zusätzlich können diese Auswertungen dann über die gesamte Wegekette durchgeführt werden, weil der Bezug zu den Agenten der Population über alle Modellschritte bestehen bleibt.

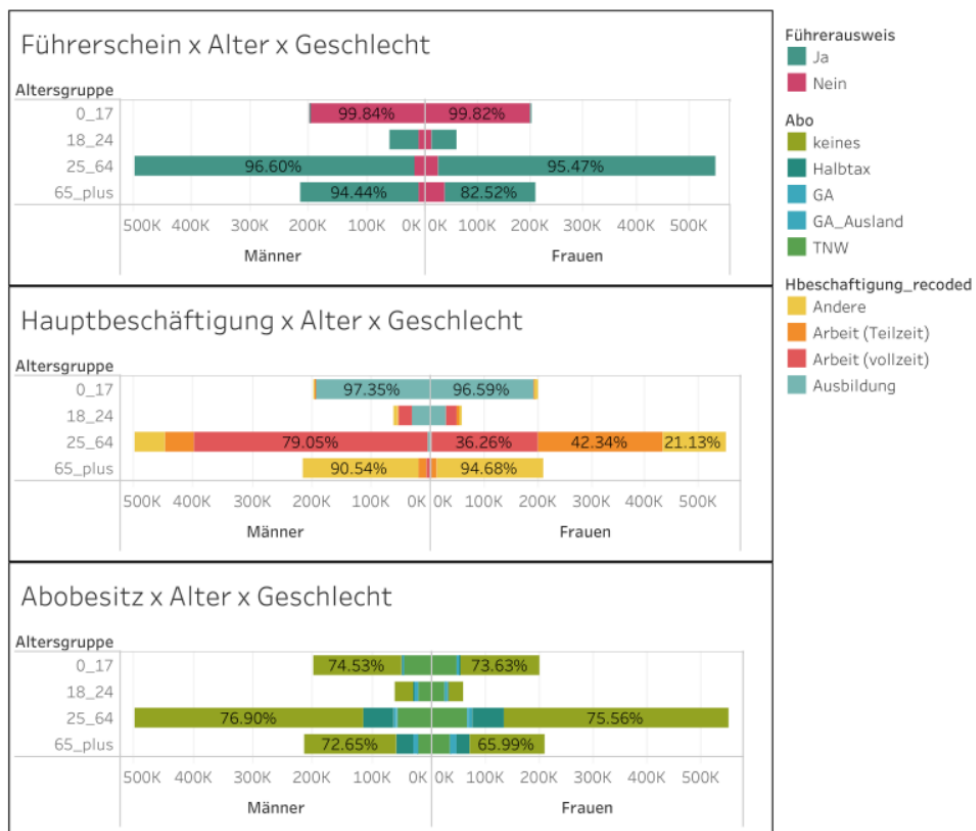


Abb. 37. Auswertung der synthetischen Population (gesamtes Modellgebiet) hinsichtlich Führerschein, Hauptbeschäftigung und Abobesitz unterteilt nach Altersklassen und Geschlecht.

Fazit

Die Erstellung der synthetischen Population ist ein Zusatzaufwand welcher für die ABM Methodik erforderlich ist. Der zusätzliche Nutzen einer synthetischen Population ist sehr vielseitig und beinhaltet verschiedenste Verkehrs- und raumplanerische Anwendungen (siehe oben die differenzierten Vorteile). Aufgrund der Bestrebungen verschiedener Akteure, eine synthetische Population zu erstellen und dann auch anzuwenden lässt sich der Aufwand begründen. Auch aggregierte Modelle (z.B. das aktuelle NPVM) können auf einer synthetischen Population basieren und können deren Resultate nutzen.

6.3 Teil 2: Vergleich Verkehrsnachfrageberechnung

Der Vergleich der Nachfrageberechnung umfasst im GVM Region Basel die Schritte der *Verkehrserzeugung*, *Verteilung* und *Verkehrsmittelwahl*, welche im Folgenden anhand spezifischer Auswertungen mit den Auswertungen des ABVM Basel verglichen werden. Im ABVM Basel geht die Nachfrageberechnung einher mit der Bestimmung der Aktivitäten der einzelnen Agenten (Tagesplan) und den tageszeitlichen Abläufen. Das ABVM Basel umfasst deshalb die Generierung der Aktivitätsketten inkl. Zielwahl für Arbeit und Bildung (primäre Zielwahl) sowie die präferierten Zeitpunkte zum Durchführen, die *zeitliche Abfolge* und die *Zielwahl für weitere Aktivitäten in Abhängigkeit des Wohn-, Arbeits- und Ausbildungsorts (sekundäre Zielwahl)* und die *Verkehrsmittelwahl* für die verschiedenen Wegezwecke. Das Ziel ist im Folgenden die Modellschritte und deren Resultate zu vergleichen, dabei werden die einzelnen Modellschritte wie auch die Abhängigkeiten ausgeleuchtet. Der folgende Vergleich der Modellschritte hat jedoch nicht das Ziel diese Abhängigkeiten in jedem Detail auszuleuchten. Es wird deshalb an den entsprechenden Stellen auf die vorhandene Literatur hingewiesen.

6.3.1 Erzeugung der Wege und Wegeketten

Die Erzeugung erfolgt grundsätzlich unterschiedlich bei einem aggregierten und einem agentenbasierten Modell. In einem aggregierten Modell werden die Erzeugungsraten für vordefinierte, verhaltenshomogenen Gruppen und Zonenaggregationen geschätzt und ausgewiesen. Zusätzlich wird der Zielverkehr für jede Zone geschätzt. In einem agentenbasierten Modell werden die Wegeketten aufgrund der soziodemographischen Eigenschaften und weiteren Variablen der synthetischen Population einzelnen Agenten zugeordnet. Bleibt ein Agent zu Hause, entfällt die Wegekette.

GVM Region Basel

Methodik und Funktionalität

Im GVM Region Basel werden einzelne Wege gemäss verschiedener Quelle-/Zielgruppen berücksichtigt. Mehrgliedrige Wegeketten (z.B. WAE) werden aufgesplittet (in WA und AE). Weiter wurde die Annahme getroffen, dass die Hin- und Rückfahrten in den gespiegelten Quelle-/Zielgruppen über den ganzen Tag symmetrisch sind. Das heisst, dass z.B. die Anzahl Wege Wohnen-Arbeiten der Anzahl Wege Arbeiten-Wohnen entspricht. Dieses Vorgehen kann ein grosser Nachteil bei wegbasierten Modellen sein da sie mehrgliedrige Touren nicht modelliert werden können.

Die produzierten Wege pro Zone wurden durch Multiplikation der Mobilitätsraten mit der Anzahl Bezugspersonen berechnet. Grundlage zur Quantifizierung der Mobilitätsraten bildet der bundesweite Mikrozensus Mobilität und Verkehr, dessen Stichprobe auch in der Region Basel verdichtet wurde.

Innerhalb der Quelle-/Zielgruppen variiert die Wegehäufigkeit nach Altersklassen teilweise stark. Daher wurden bei den Einkaufswegen und Freizeitwegen die Mobilitätsraten auch nach 3 Altersklassen (<25, 25-64 und >65 Jahren) differenziert. Durch die Altersklassierung lassen sich im Prognosefall zudem sog. Kohorteneffekte beim Verkehrsverhalten abbilden (z. B. Effekte durch Alterung).

Die Summe aller im Modellgebiet produzierten Wege pro Tag entspricht der Summe aller angezogenen Wege pro Tag. Als Bezugsgrößen in den Zielzonen (Zielattraktion) wurden folgende Variablen verwendet:

- WA: Anzahl Arbeitsplätze total
- SA: Anzahl Arbeitsplätze total, Einkaufsflächen [m²], Einwohner
- WB: Anzahl Arbeitsplätze Bildung
- SB: Anzahl Arbeitsplätze Bildung, Einkaufsflächen [m²], Einwohner
- WE: Anzahl Einkaufsflächen [m²]
- SE: Anzahl Einkaufsflächen [m²], Einwohner
- WN: Anzahl Arbeitsplätze total
- SN: Anzahl Arbeitsplätze total, Einkaufsflächen [m²], Einwohner
- WF: Anzahl Arbeitsplätze Freizeit, Arbeitsplätze Rest, Einkaufsflächen [m²], Einwohner
- SF: Anzahl Arbeitsplätze Freizeit, Arbeitsplätze Rest, Einkaufsflächen [m²], Einwohner

Das Modell enthält auch Spezialzonen mit verkehrsintensiven Anlagen wie Flughäfen, Zoos, Museen, Freizeitanlagen und Parks. Diese Zonen ziehen mehr Wege an als die oben angegebene Mobilitätsrate und Bezugsgröße ausweisen würden.

Durch den Einbau von singulären Verkehrserzeugern stimmen die totale Anzahl wegfahrender und ankommender Wege pro Zone nicht mehr exakt überein. Am Ende der Verkehrserzeugung wurde daher eine iterative Wegeausgleichsrechnung durchgeführt, damit für jede Zone die Anzahl wegfahrender Wege gleich der Anzahl ankommender Wege ist. Dazu wurde die Vector Balancing Methode in TransCAD verwendet. Bei dieser Methode werden pro Quelle-/Zielgruppe die produzierten Wege konstant gehalten und die angezogenen Wege iterativ mit einem Korrekturfaktor multipliziert. Dies wird solange durchgeführt, bis die Summe der angezogenen Wege gleich der Summe aller produzierten Wege ist.

Erforderliche Datengrundlagen

Für das Erzeugungsmodell braucht es die Strukturdaten pro Zone wie Einwohner und Arbeitsplätze. Diese können direkt beim Bundesamt für Statistik hektarfein bezogen werden. Zur Schätzung der Mobilitätsraten pro Quelle-/Zielgruppe kann der Mikrozensus Verkehr verwendet werden.

Resultate

Tab. 10 zeigt für das GVM Region Basel die modellierten Anteile der Wege nach Hauptverkehrszwecken im Vergleich mit dem Mikrozensus. Die Anteile im Modell decken sich fast vollständig mit den aggregierten Wegzweck-Anteilen aus dem Mikrozensus.

Tab. 10 Modellierte Anzahl Personenwege und Anteile nach Wegezwecken 2016, DWV, Gebiet Schweiz.

	Modelliert In Mio.	Anteile modelliert In %	Anteile MZVM 2010 In %
Alle Wege	3.535	100	100
Arbeiten	0.867	24.5	23.9
Bildung	0.317	8.9	9.0
Einkaufen	0.807	22.8	24.9
Nutzfahrt	0.126	3.5	3.4
Freizeit	1.418	40.1	38.8

ABVM Basel

Methodik und Funktionalität

Das Verfahren bei der Bestimmung der Wegekette ist im ABVM zweistufig. Als erster Schritt wird bestimmt zu welchen Agenten eine Wegekette zugeordnet wird („out-of-home“) und ob diese eine primäre Aktivität umfasst (Arbeiten oder Ausbildung). Im zweiten Schritt werden dann die Wegekette anhand der soziodemographischen Merkmale zugeordnet, inklusive der dazugehörigen Standorte der primären Aktivitäten, falls vorhanden. Die „out-of-home“ Zuweisung geschieht im ABVM Basel über ein Entscheidungsmodell, welches auf personenspezifischen Variablen und Variablen des Wohnsitzes beruht. Das Entscheidungsmodell ist anhand des MZMV geschätzt und verwendet folgende Variablen, mehrheitlich aus der synthetischen Population:

- Mobilitätswerkzeuge
 - Führerschein
 - PW Verfügbarkeit
- Alterskategorie
- Anzahl Personen im Haushalt
- Alterskategorie und Geschlecht
- Hauptbeschäftigung
- Unterscheidung Schüler und Pensionierte
- Räumliche Dichte

Die Zuordnung der Wegekette geschieht dann über eine Zuordnung der Ketten für jeden Agenten aufgrund der jeweiligen Ausprägungen folgender Variablen:

- Mobilitätswerkzeuge
 - Führerschein
 - PW Verfügbarkeit
 - Abobesitz
- Land
- Alter und Geschlecht
- Hauptbeschäftigung
- Räumliche Dichte
- Distanz zum primären Ziel (Arbeit resp. Ausbildung)
- Anzahl Personen im Haushalt

Zusätzlich zur „out-of-home“ Zuweisung werden als Teil der Aktivitätsketten Rückwege generiert. Die Zuweisung der Wegekette und der sekundären Ziele erfolgt erst nach der Verortung der primären Aktivitäten in einem zweiten Schritt. So wird gewährt, dass die

Distanz zwischen Wohn- und Arbeits- respektive Ausbildungsort bei der Zuweisung der Aktivitätsketten berücksichtigt werden kann; dies wird weiter unten im Kapitel 6.3.2 beschrieben.

Die Zuordnung der Wegeketten erfolgt durch ein Samplingverfahren (fingerprinting). Das Samplingverfahren hat den Vorteil einer effizienten und robusten Implementierung. Folgende Variablen werden dabei bei der Erstellung und Zuordnung der Wegeketten berücksichtigt: Land, Geschlecht, Hauptbeschäftigung, räumliche Dichte, Alterskategorie, Wegedistanz der primären Aktivität, Führerscheinbesitz, PW Verfügbarkeit, Abo und Anzahl Personen im Haushalt. Die Samplingmethodik ist hier sensitiv auf diese Variablen, wobei gewisse Variablen prioritär behandelt werden („Anzahl sekundäre Aktivitäten“, „Dauer“, „Wegedistanz“). Ein Vorteil ist, dass bei primären Aktivitäten, welche weiter weg vom Wohnort entfernt sind, kürzere Ketten mit kürzeren Distanzen zugeordnet werden. Alternativ zum Sampling Verfahren kann ein Entscheidungsmodell geschätzt werden, welches die Wirkung zukünftige Raumentwicklungsszenarien auf die Aktivitätsketten noch besser abbilden kann.

Erforderliche Datengrundlagen

Bei der Erzeugung kann als Grundlage direkt auf die synthetische Population zurückgegriffen werden. Zusätzlich werden für das Sampling oder Entscheidungsmodell die Daten der beobachteten Aktivitätsketten des Mikrozensus verwendet. Falls Daten weiterer Wegtagebuchbefragungen zur Verfügung stehen können diese ebenfalls verwendet werden.

Resultate

Abb. 38 zeigt für das ABVM Basel die Anteile der Wege für die einzelnen Verkehrszwecke im Vergleich mit dem Mikrozensus. Über alles gesehen stimmen die Verteilungen der Kennwerte der mit dem Samplingverfahren generierten Aktivitätsketten gut mit den Daten des Mikrozensus überein. Verbesserungen wären mit einer detaillierteren Analyse und dann mit einem Entscheidungsmodell-basierten Verfahren zur Generierung der Aktivitätsketten möglich.

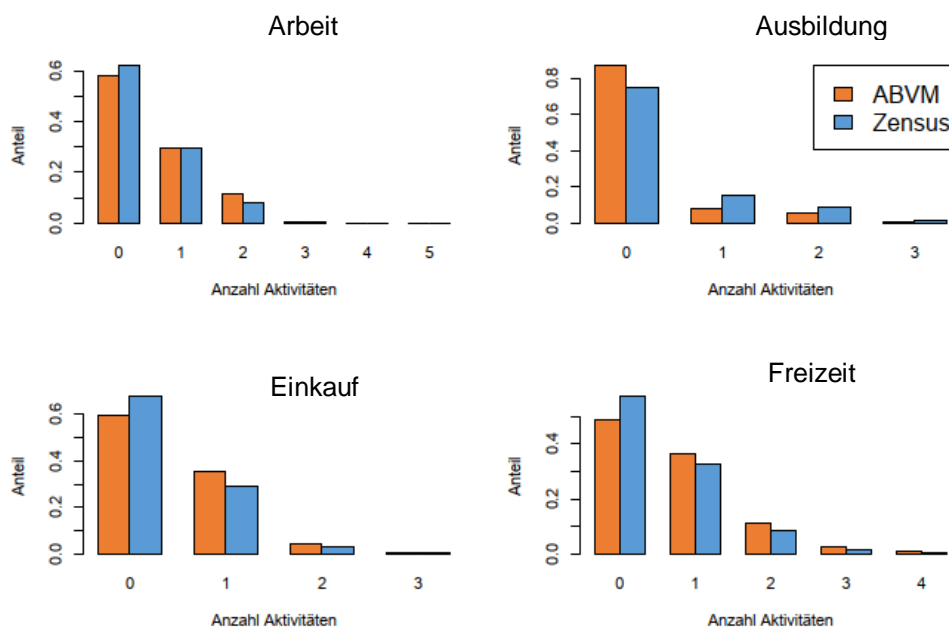


Abb. 38 Anzahl Wege in Abhängigkeit der Anzahl Aktivitäten für die verschiedenen Verkehrszwecke Arbeit, Ausbildung, Einkauf, Freizeit.

Fazit

Die Erzeugung resp. die „out-of-home“ Zuordnung sowie die Definition der Aktivitäten- und Wegeketten erfolgen für beide Modellansätze auf Basis des Mikrozensus und abhängig vom eigentlich erstellten resp. verwendeten Modellansatz. Beim GVM Region Basel geschieht die Erzeugung aufgrund einer erweiterten Regression, welche auf Basis des Zensus geschätzt wird. Beim ABVM werden die gesamten Wegeketten berechnet, inklusive Rückwege. Es kann jedoch kein systematischer Vorteil beim einen oder anderen Ansatz festgestellt werden. Das Entscheidungsmodell ist jedoch etwas näher an der ökonometrischen Verhaltenstheorie. Wie sich diese Eigenschaft dann auswirkt ist jedoch nicht untersucht worden. Das deterministische Modell zur Zuweisung der Aktivitätsketten im AVMB (fingerprinting) kann zukünftig ersetzt werden mit einem neu geschätzten Entscheidungsmodell. Dann können zusätzlich zur räumlichen Dichte auch die Erreichbarkeit mitberücksichtigt werden, welche ebenfalls auf die Anzahl Touren, Wege pro Tour und deren Dauer ausser Haus einen Einfluss haben (Korrelation möglich). In den in der US-Praxis eingesetzten Modellen werden die Aktivitätsketten zusätzlich aufgrund von nested logit Modellen zugewiesen.

6.3.2 Verteilung (Zielwahl) und Wegeketten

GVM Region Basel

Methodik und Funktionalität

Beim GVM Region Basel beruht das Zielwahlmodell auf einem Gravitationsmodell und einem Matrix-Iterationsverfahren für den Randsummenausgleich. Zur Bestimmung der Zielwahl wurden die von einer Quellzone erreichbaren potenziellen Ziele zueinander bewertet. Die Attraktivität einer Zielzone wird einerseits durch das Zielpotenzial beschrieben, das sich aus den Strukturdaten in der Zielzone errechnet (z.B. Arbeitsplätze, Einkaufsflächen, Einwohner etc.) und andererseits durch eine Widerstandsfunktion. Dabei wird der Raumwiderstand in generalisierten Kosten ausgedrückt der u.a. die Reisezeit, Reisekosten und Umsteigesituationen beim ÖV berücksichtigt. Der Raumwiderstand berücksichtigt ausserdem das bei der Zielwahl benutzte Verkehrsmittel (=kombiniertes Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodell). Das Gravitationsverfahren und das Matrix-Iterationsverfahren kombinieren dann die Zielattraktivität und die Raumwiderstände. Das Resultat ist eine kontinuierlich verteilte Nachfrage auf die einzelnen Zielzonen.

Der Raumwiderstände werden in vergleichbare generalisierte Reisekosten umgewandelt. Dazu musste jedes Widerstandselement durch die Reisenden in Abhängigkeit seines Wegzwecks bewertet resp. gewichtet, und diese Zahlungsbereitschaften über den ganzen Weg aufsummiert werden. Die Gewichtung erfolgte mit der vom Bund (Bundesamt für Raumentwicklung ARE) durchgeführten *stated preference* Erhebungen über das Verkehrsverhalten. Aus dieser Erhebung können sogenannte Zahlungsbereitschaften für die Wegwiderstandselemente abgeleitet werden.

Die Konstanten des Gravitationsmodells wurden iterativ bestimmt: Vor der Anwendung des Zielwahlmodells mussten die Modell-Parameter a, b und c der Wegwiderstandsfunktion geschätzt werden. Sie bestimmen die Struktur der Reiseweitenverteilung. Die Eichung erfolgte zum Start mit bekannten Parametern aus anderen Modellen und wurden iterativ solange verändert, bis die Reiseweiten der berechneten Wegematrizen bei allen fünf Haupt-Wegzwecken der Reiseweitenverteilung, der im Mikrozensus Mobilität und Verkehr erhobenen Wegen bestmöglich übereinstimmte. Es wurden Wegwiderstandsfunktionen für 10 Quelle-Ziel-Gruppen geschätzt.

Erforderliche Datengrundlagen

- Modellparameter für die Nutzenfunktionen aus *stated preference* Erhebung des Bundes.

- Verwendete Variablen: Fahrzeit MIV und OeV, Distanz OeV, MIV Suchzeit, MIV Parkkosten, Treibstoffkosten, Parkkosten, OeV Fahrzeit, OeV Zugangszeit, OeV Preis, Umsteigezahl, OeV Intervall, personenspezifische Variablen (PW-Besitz, GA / Verbundabo, Htax Besitz)
- Erhobene Reiseweitenverteilungen zur Kalibration der Gravitationskonstanten.
- Verkehrszweckspezifische Reibungsfaktoren für grenzüberschreitende Wege

ABVM Basel

Im ABVM Basel wird zwischen der primären Zielwahl, welche die Ziele für Arbeitende und Auszubildende zuordnet, und der sekundären Zielwahl, welche die restlichen Aktivitäten verortet, unterschieden. Diese Unterscheidung ermöglicht die Aufteilung der Zielwahl in längerfristige Entscheidungen, welche die primäre Zielwahl umfassen (Arbeit und Ausbildung), und Entscheidungen der sekundären Zielwahl, welche auch in Abhängigkeit von Wohn-, Arbeits- oder Ausbildungsort gefällt werden (z.B. Einkauf und Freizeit). Der Nutzen resp. die Kosten werden von den Personen unterschiedlich bewertet und werden darum auch unterschiedlich berechnet. Es wird auch eine Abhängigkeit abgebildet, indem angenommen wird, dass die primäre Zielwahl (e.g. Arbeitsweg) der sekundären Zielwahl (e.g. Einkauf) übergeordnet wird. Dies erlaubt auch eine sequenzielle Abfolge³³. Zwischen der primären und der sekundären Zielwahl werden die vollständigen Aktivitätsketten zugewiesen und somit die Anzahl und Art der sekundären Aktivitäten bestimmt (aber noch nicht verortet). Diese Zuordnung der Aktivitätsketten geschieht in Abhängigkeit der primären Zielwahl. Somit kann berücksichtigt werden, dass bei längeren Arbeitswegen eher Ketten mit weniger Aktivitäten resultieren. Abb. 39 zeigt die einzelnen Schritte (Ausschnitt aus Abb. 30). Ein ähnliches, zweistufiges Verfahren wird zum Beispiel auch bei MobiTopp eingesetzt (Mallig et al., 2013).

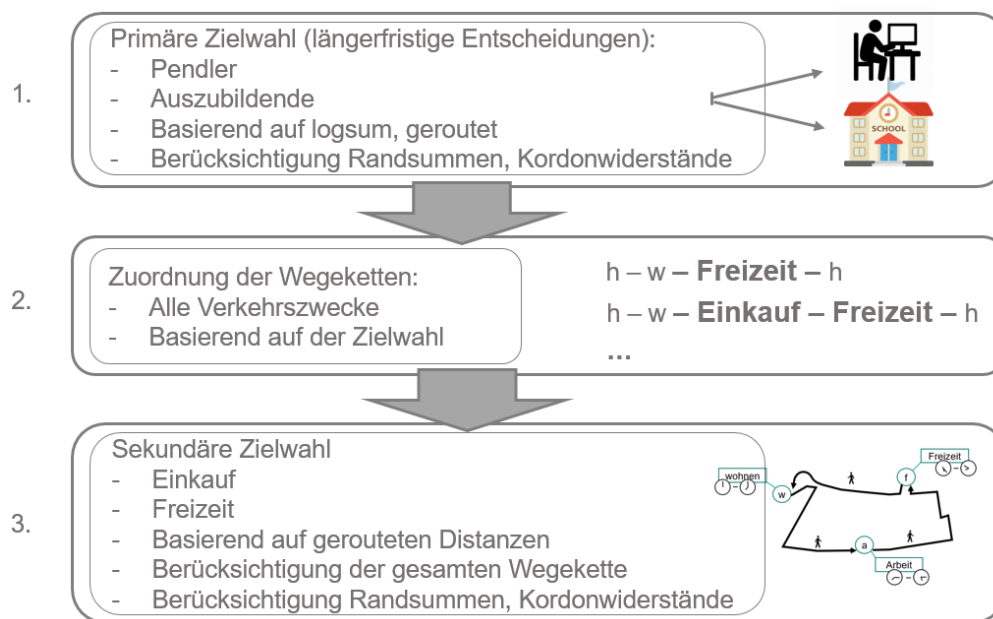


Abb. 39 Unterteilung der Zielwahl und Integration der Wegeketten.

³³ Es könnte auch eine vollständige Entscheidungsfunktion für die gesamte Wegekette erstellt werden, dies wäre jedoch viel aufwändiger und aufgrund der Abhängigkeiten und vielen Freiheitsgraden auch komplexer (und viel schwieriger zu schätzen (e.g. notwendige Stichprobengröße!))

Methodik und Funktionalität „Primäre Zielwahl“

Beim ABVM Basel beruht die Methodik auf einem MNL Modell mit Randsummenausgleich und Ausgleich der Grenzströme (Kordonströme) zwischen den Ländern CH, D und F, welche in Basel zentral sind. Die Methodik wurde ursprünglich in erweiterter Form für das ABVM Singapur entwickelt (Vitins et al., 2016), kann aber auch für aggregierte Modelle angewendet werden und wurde auch schon für andere Projekte und Perimeter eingesetzt. Aus Ressourcengründen wurde beim ABVM auf eine Parameterschätzung für ein neues Zielwahlmodell verzichtet und der Raumwiderstand aufgrund der im GVM Region Basel für das Zielwahlmodell verwendeten Grundlagen und Parameter bestimmt. Die neue Methodik integriert einen vollständigen Randsummenausgleich, bei welchem die Konvergenz nachgewiesen worden ist und zuverlässig die Randsummen ausgleicht. Die Methodik ist aus Perspektive der Verkehrsökonomie nachgewiesen und es kann auf einen numerischen Ausgleich (e.g. Gravitationsansatz oder Bilanzfaktoren im EVA Ansatz) verzichtet werden. Das Resultat ist eine diskrete Verortung der Ziele innerhalb der entsprechenden Wegeketten.

Als weitere methodische Erweiterung wurden im ABVM Basel alle Kordonquerschnitte zwischen der Schweiz, Deutschland und Frankreich in der Zielwahl mitberücksichtigt. Der Ansatz ermöglicht, beliebige Kordonquerschnitte zu definieren und die entsprechenden Zähl-daten dann in der Zielwahl zu berücksichtigen. Dieses Verfahren erlaubt es, eine oftmals nachträglich und manuell durchgeführte Korrektur zwischen räumlichen Gebieten zu vermeiden, wie zum Beispiel politische, geographische oder sprachliche Grenzen. Die Methodik kann für aggregierte und disaggregierte Modelle eingesetzt werden und verbessert die Zielwahl um bis zu 100% bei den Kordonquerschnitten sehr deutlich. Der Ansatz wurde ausführlich in (Vitins & Erath, 2019) für das ABVM Basel beschrieben; zurzeit ist der Ansatz in den gängigen Softwareprodukten noch nicht umgesetzt (z.B. bietet ActivitySim z.B. nur die Funktionalität des Randsummenausgleichs an) und der Einsatz ist nur in einer offenen Daten- und Codierungsstruktur möglich, wie sie im ABVM Basel eingesetzt wird.

Der Modellansatz welcher im ABVM Basel eingesetzt wurde, ist in erweiterter Form im ABVM Singapur erfolgreich implementiert und bietet zusätzliche Flexibilität, welche im Folgenden erläutert wird und zukünftig auch im ABVM Basel möglich ist. Die Wahl dieses Ansatzes hat dadurch auch den Vorteil einer zukünftigen Erweiterung. Speziell die Schätzung der Parameter und dann die Anwendung sind auch bei einer grossen Anzahl Alternativen möglich. Die ursprüngliche Anwendung in Singapur hat gezeigt, dass es möglich ist eine grosse Anzahl Alternativen mit einer generalisierten Nutzenfunktion zu schätzen, ohne Ziehung aus Stichproben (Vitins et al., 2016). Die Ziehung aus Stichproben würde zwar die Rechenressourcen reduzieren, es müsste jedoch eine ausreichend grosse Stichprobe vorhanden sein (25% oder mehr je nach Modellansatz (Frejinger et al., 2009)) um statistisch plausible Resultate zu generieren. Die neue Schätzung der Nutzenfunktion für Singapur für das Entscheidungsmodell ermöglichte zusätzlich die direkte Bewertung der β -Parameter für die Attraktivität der Ziele und gleichzeitig die generalisierten Kosten zum Erreichen der Ziele. Der Nutzen der Reisen und der Attraktivität stehen also im direkten Bezug zueinander. Zusätzlich können die personenspezifischen Eigenschaften mit den Eigenschaften der Ziele gekoppelt werden. Zum Beispiel können die Wirtschaftssektoren einen Zusammenhang haben je nach Ausprägung der persönlichen Variablen (Ausbildung, Einkommen). Die Methodik kann für aggregierte (mit Quell-Ziel-Gruppen Unterteilung) und agentenbasierte Modelle angewendet werden; weitere Vorteile werden in Vitins et al., (2016) beschrieben. Es bestehen also Vorteile im Vergleich zum Gravitationsansatz welcher ohne spezifische Bewertung der Ziele in der Nutzenfunktion und ohne Möglichkeiten der methodischen Erweiterung angewendet wird.

Methodik und Funktionalität „Zuordnung der Wegeketten“

Die Zuordnung der Wegeketten geschieht über ein Sampling Verfahren, welche den Mikrozensus verwendet und die Wegeketten anhand der vorhandenen Variablen und Ausprägungen zuordnet. Die Methodik und die Vor- und Nachteile werden in Kapitel 6.3.1 beschrieben und wird auch in anderen Anwendungen beschrieben (e.g. Bösch, Müller, & Ciari (2016)). Insbesondere ist die Anzahl Aktivitäten abhängig von der Distanz zum primären Ziel, falls vorhanden.

Methodik und Funktionalität „Sekundäre Zielwahl“

In der sekundären Zielwahl werden die Aktivitätenstandorte für die Freizeitaktivitäten und Einkaufsaktivitäten zugeordnet. Es werden die Anzahl der Ziele sowie die Distanz des schon definierten primären Zieles berücksichtigt. Weiter entfernte primäre Ziele führen zu einer geringeren Anzahl sekundärer Aktivitäten, welche dann auch weniger weit vom primären Ziel, oder vom Wohnstandort aus entfernt liegen (siehe oben die Zuordnung der Wegeketten). Die Zielwahl wird mit dem sogenannten *Rubber-Banding* durchgeführt, welches die Standorte vor- und nachgelagerten Aktivitäten aus der primären Zielwahl mitberücksichtigt. So werden zum Beispiel Einkaufsaktivitäten eher in der Nähe des Arbeits- oder Wohnortes durchgeführt, und somit die empirischen Beobachtungen abgebildet. Aufgrund der Wegedistanz, welche aus der Zuordnung der Wegeketten erfolgt, wird im Umkreis dieser Distanz ein Ziel ausgesucht. Zusätzlich erfolgt die Berücksichtigung der Attraktivität, welche analog zum GVM Region Basel über die Raumstrukturdaten ermittelt wird.

Erforderliche Datengrundlagen

Für die Zielwahl werden im ABVM Basel die Kosten der Wege für die primäre Zielwahl als umfassende Logsum-Terme ausgewiesen, analog zum GVM Region Basel mit denselben Variablen (siehe oben) aus den SP/RP Studien des ARE. Für die sekundäre Zielwahl werden zurzeit die gerouteten Distanzen berücksichtigt wie auch die Attraktivität der Ziele, welche ebenfalls analog des GVM Region Basel auf den Strukturdaten basiert. Die Zuordnung der Ziele gleicht der statistischen Distanzverteilung im Zensus. Die Nutzenfunktionen können bei Bedarf weiter verfeinert werden, zum Beispiel kann ein umfassendes Entscheidungsmodell neu geschätzt werden.

Zusätzlich müssen die Randsummen-Bedingungen eingegeben werden, welche in beiden Modellen vollständig berücksichtigt werden. Die Grundlagedaten für die Arbeits- und Ausbildungsplätze (harte Randsummen) sind dabei detailliert erfasst wie auch die weichen Randsummen (Einkauf, Freizeit). Im ABVM Basel sind die weichen Randsummen analog wie beim GVM Region Basel erfasst.

Die ABVM Basel Methodik umfasst analog zum GVM Region Basel die singulären Verkehrserzeuger, wie Zoos, oder andere Freizeiteinrichtungen, und Flughafen etc. Wege von und zu diesen Einrichtungen werden nachträglich Agenten mit passenden Aktivitätsketten (home – Freizeit – home) anhand eines vereinfachten Verfahrens zugeordnet.

Resultate

Die Auswertungen der Verteilungen der beiden Modellansätze sind in Abb. 40 und Abb. 41 ersichtlich. Aufgrund der anteilmässig vielen kurzen Wege erfolgt die Auswertungen in der äquiquantiler Auswertung. Aufgrund der unterschiedlichen Datenverfügbarkeit sind die Klassengrößen nicht identisch, die vergleichende Auswertung im Mikrozensus entspricht jedoch ebenfalls der spezifischen Klassengrößen und kann so verglichen werden. Zusätzlich werden die CR Werte für die einzelnen Auswertungen angegeben (siehe Kapitel 6.1.3 für eine Erläuterung der CR Werte). Das GVM Region Basel hat grundsätzlich eine bessere Übereinstimmung hinsichtlich der Distanzverteilung des MZMV als das ABVM Basel. Speziell bei den Pendlerströmen und den Ausbildungswegen hat das ABVM grössere Abweichungen als das GVM Region Basel. Gründe sind die fehlende Modellschätzung und die begrenzten Ressourcen, welche eine Verbesserung ermöglichen würden. Die Methodik an sich wurde schon mehrfach angewendet und ist grundsätzlich robust, speziell das Entscheidungsmodell kommt der Zielwahl als grundlegende Methodik sehr nahe. Zusätzlich ist hervorzuheben, dass in beiden Ansätzen die Randsummen eingehalten werden. Abb. 41 zeigt die Vergleiche für die Wege im Einkaufs- und Freizeitverkehr. Das GVM Region Basel hat hier wieder eine bessere Übereinstimmung als das ABVM, das ABVM erzielt jedoch im Vergleich zur primären Zielwahl eine bessere Übereinstimmung.

Die Auswertungen zeigen, dass grundsätzlich die Distanzverteilungen eingehalten werden, beim GVM Region Basel etwas näher beim Zensus als beim ABVM Basel. Aufgrund der anteilmässig vielen kurzen Wege werden diese in der äquiquantiler Auswertung hervorgehoben, im Vergleich zu den längeren Wegen. Der Vergleich mit anderen Auswertungen

(N. Rieser, Tasnady, de Vries, et al., 2018), siehe Zürich, Stuttgart und Neuchâtel) zeigt, dass die Abweichungen keine Eigenheiten der beiden Modelle oder der Region Basel sind.

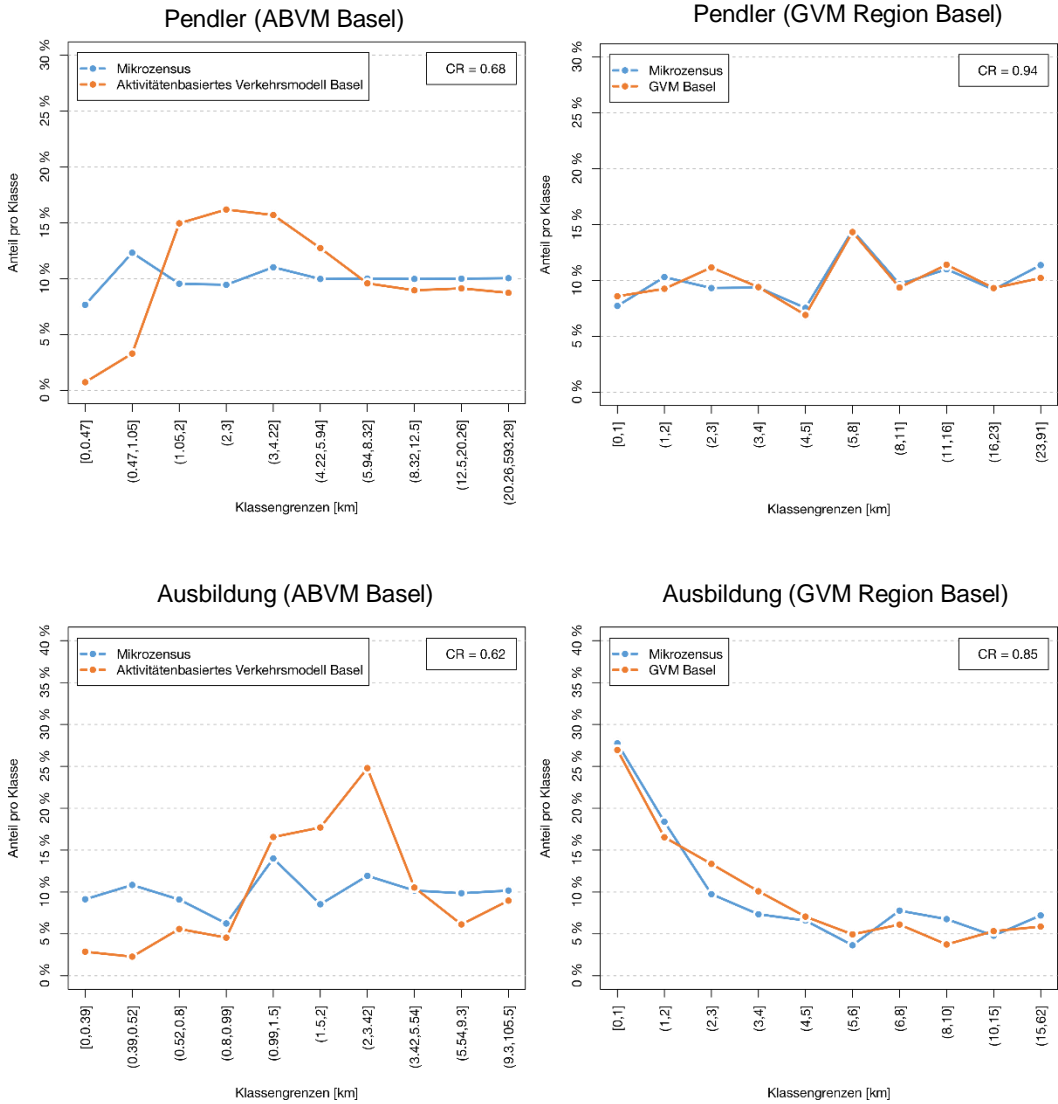


Abb. 40: Distanzverteilung der primären Zielwahl in Abhängigkeit der Verkehrszwecke (Pendler oben, Ausbildung unten) für das ABVM Basel (links) und das GVM Region Basel (rechts), aufgrund der unterschiedlichen Datenauflösung ergeben sich unterschiedliche Klasseneinteilungen.

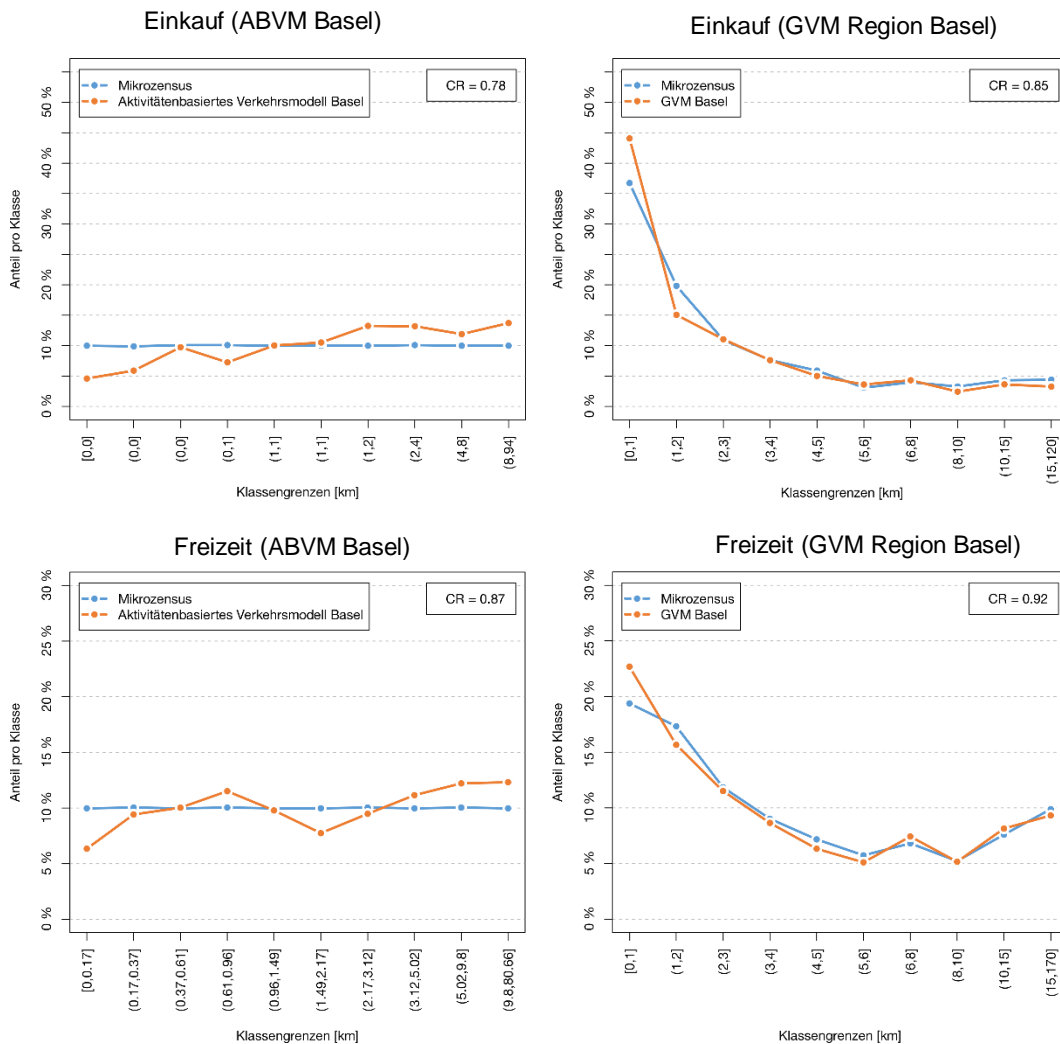


Abb. 41 Distanzverteilung der sekundären Zielwahl in Abhängigkeit der Verkehrszwecke (Einkauf oben, Freizeit unten) für das ABVM Basel (links) und das GVM Region Basel (rechts).

Fazit

Die beiden Modelle unterscheiden sich bezüglich der Verkehrsverteilung grundsätzlich in der übergeordneten Methodik. Das GVM wendet den Gravitationsansatz an, in welchem die Fahrtenmatrizen anhand der Widerstände zwischen den Zonen, wie auch anhand der Randsummen erstellt werden. Der Gravitationsansatz bietet eine robuste Variante, welche auch die besseren Resultate im Modellvergleich erzielte. Der Gravitationsansatz ist jedoch durch die Gravitationskonstante und die Analogie mit dem Gravitationsgesetz etwas starr in der Methodik. Die Gravitationskonstante hat einen grossen Einfluss auf die Zielwahl und die Verteilung, die Gravitationskonstante kann jedoch nicht direkt geschätzt werden und erfolgt in Abhängigkeit der empirischen Distanzverteilungen. Der Ansatz des ABVM Basel ist näher am Entscheidungsprozess der einzelnen Personen, im Vergleich zum Gravitationsansatz. Im GVM Region Basel werden Reibungsfaktoren für Grenzverkehre verwendet, im ABVM Basel werden die Kordonwiderstände für die Grenzverkehre im Entscheidungsmodell berücksichtigt. Aus methodischer Sicht gesehen spricht die zukünftige Entwicklung eher für ein diskretes Entscheidungswahlmodell, solange die statistischen Anforderungen aufgrund der hohen Anzahl Alternativen berücksichtigt werden; es können so die ökonomischen Verhaltensmodelle deutlich besser angewendet werden.

Die sequenzielle Entscheidung der primären und sekundären Zielwahl entspricht eher der tatsächlichen Entscheidungsprozesse der Verkehrsteilnehmer und erlaubt es auch Einkaufs- und Freizeitziele unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Wohnorts und Arbeits-/Ausbildungsorts zuzuweisen. Generell ist der Ansatz des ABVM Basel eine konsequenterer Umsetzung der Wegeketten-Definition, wie sie in der Empirie vorzufinden ist. Es ist zu vermuten, dass bei weiterer Ausarbeitung wahrscheinlich auch verbesserte Resultate beim ABVM Basel möglich sind, der praktische Nachweis steht jedoch noch aus.

Für beide Modellansätze bestehen Verbesserungspotenzial bei der Parameterschätzung der Zielwahl vorhanden. Speziell die diskrete Entscheidung bei der Zielwahl und die damit verbundene Rückkoppelung mit der Ausprägung der Ziele und der Individuen ist in beiden Modellen verbesserungsfähig. Hier bietet der ABM Ansatz grösseres Potential, jedoch wäre auch im GVM Region Basel ein diskretes Entscheidungsmodell anwendbar.

6.3.3 Verkehrsmittelwahl

GVM Region Basel

Methodik und Funktionalität

Die Berechnung der Verkehrsmittelwahl wird im GVM Region Basel nach der Zielwahl berechnet. Es wird ein diskretes Entscheidungswahl-Modell angewendet. Die Modellparameter der Nutzenfunktion des Verkehrsmittelwahlmodells werden direkt aus der stated preference Erhebung des Bundes für den Raum Basel ausgewertet.

Eine Besonderheit im GVM Region Basel nimmt die Modellierung von kombinierten Personenwegen wie Park&Ride und Bike&Ride ein, im Vergleich zu anderen kantonalen Modellen welche diese Funktionalität bisher noch nicht einsetzen. Bei solchen Wegen reist eine Person von einer Quellzone mit dem Velo/Auto zu einem Parkhaus/Parkplatz, geht via Strassen- oder Fussweglink zur ÖV-Haltestelle, fährt mit dem ÖV bis zur Zielhaltestelle und läuft zu Fuss zur Zielzone (Abb. 42).

Für die Kenngrößen werden die Nutzenfunktionen des ÖV um den Nutzen der verkehrsmittelspezifischen Zugangsalternative erweitert. Die Auswahl der P+R Station wird in Abhängigkeit des Startortes und der Wegekette aus Zugangsweg (max. 30 Minuten) und der verfügbaren ÖV-Verbindungen mit dem kleinsten Widersand zum Zielort gewählt. Der Rückweg führt dabei über die gleiche P&R Station wie beim Hinweg.

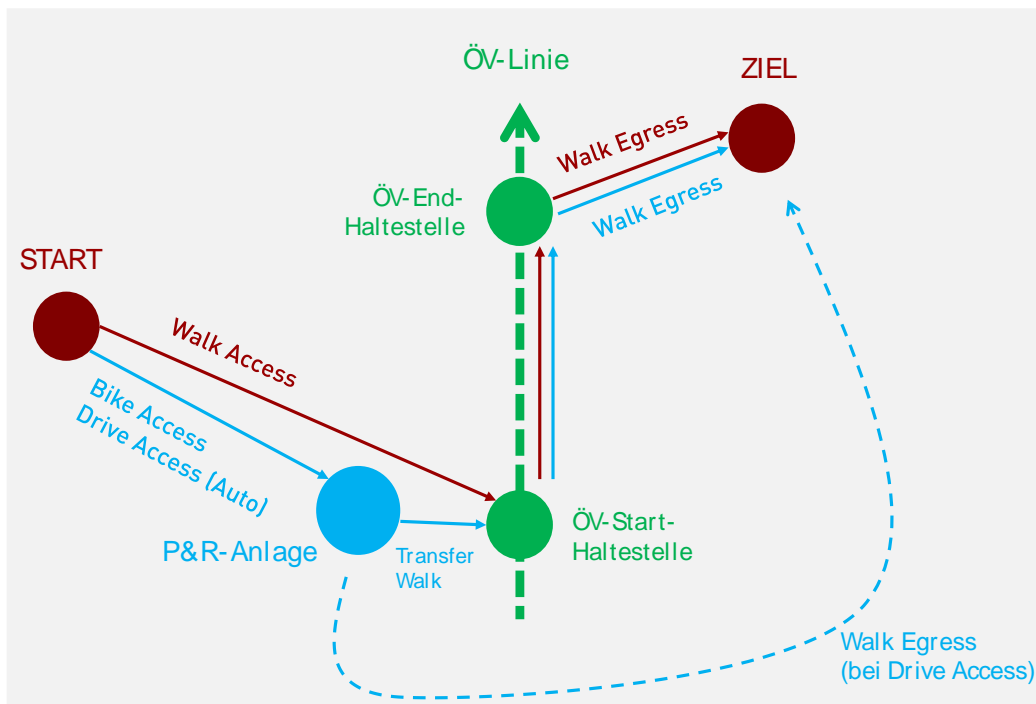


Abb. 42 Schema eines kombinierten Hin-Weges (von Start- zu Zielzone) mit Park&Ride, inkl. Wegetappen.

Erforderliche Datengrundlagen

- Modellparameter für die Nutzenfunktionen aus *stated preference* Erhebung des Bundes.
- Zonendaten
- Erhobene Reiseweitenverteilungen zur Kalibration der Gravitationskonstanten.

Folgende Variablen fließen in die Verkehrsmittelwahl ein:

- Reisezeiten im belasteten Netz
- MIV Reisekosten auf Basis der Reisedistanz (Treibstoffkosten, Parkkosten)
- Umsteigeanzahl, Umsteigewartezeit, Umsteigegezeit
- Zu- und Abgangszeit OeV und MIV (ABVM: räumlich nach Gebieten aufgeteilt, GVM Region Basel: verkehrsmittelspezifischer ÖV-Zu-/Abgang)
- MIV Parksuchzeit (räumlich nach Gebieten abgestuft, nur GVM Region Basel)
- Ticketkosten OeV (km-basiert)
- Intervall / Takt mit Bahnhof-spezifischen Umsteigewiderstände
- Besitz PW, Verbundabonnement, Halbtaxabo und Generalabo

Im GVM Region Basel werden wegzweckspezifische Nutzenparameter verwendet. Die Parameter wurden aus der *stated preference* Erhebung des Bundes zum Mobilitätsverhalten für das Teilgebiet Nordwestschweiz geschätzt. *Tab. 11* zeigt die dazugehörigen Zahlungsbereitschaften für das Verkehrsmittelwahlmodell.

Tab. 11 Zahlungsbereitschaften zum Verkehrsmittelwahlmodell GVM Region Basel.

	Pendler	Bildung	Einkaufen	Nutzfahrt	Freizeit
VTTS MIV	17.8	23.3	29.0	38.5	14.7
VTTS OeV	14.4	17.2	16.9	21.4	30.0
Kosten*/Umsteigen	1.0	2.1	4.7	2.5	1.9
VTTS Zugangszeit OeV	23.6	20.3	52.9	21.5	8.8

* Bezogen auf Treibstoffkosten

ABVM Basel

Methodik und Funktionalität

Die Berechnung der Verkehrsmittelwahl ist im ABVM im Vergleich zu einem aggregierten Modell unterschiedlich in der gesamten Nachfrageberechnung eingegliedert. Die Verkehrsmittelwahl ist im ABVM Basel in die MATSim Simulation integriert und wird deshalb als Strategie bezeichnet (welche für spezifische Auswertungen auch ausgeschaltet werden kann). Die angewendete MATSim Simulation ermöglicht dadurch die Einbettung der Verkehrsmittelwahl direkt in den Iterationen der Simulation (siehe auch (Horni et al., 2016)). Grundsätzlich können dabei verschiedene Entscheidungsmodelle angewendet werden. Im konkreten Fall des ABVM Basels wird eine zufällige Mutation innerhalb des genetischen Algorithmus (GA) durchgeführt. Dabei wird immer wieder ein alternatives Verkehrsmittel zugewiesen. Aufgrund einer vollständig parametrisierten Nutzenfunktion werden die mit verschiedenen Verkehrsmitteln simulierten Wegen und Wegeketten bewertet. Tagespläne mit einem schlechten Nutzwert werden über mehrere Iterationen nicht mehr berücksichtigt und somit schlussendlich nur für den jeweiligen Tagesplan und für das optimale Verkehrsmittel eingesetzt.

Das Verfahren erlaubt es Abhängigkeiten der gewählten Verkehrsmittel in den Wegeketten abzubilden. Zum Beispiel kann innerhalb einer Tour (oder Subtour) nur ein Fahrzeug gewählt werden, wenn auch auf den anderen Wegen des (Sub-) Tour dasselbe Fahrzeug gewählt wird. Zusätzlich erlaubt die übergeordnete Bewertung des ganzen Tagesplans auch die Beibehaltung einzelner, unvorteilhafter Wege, solange im gesamten Tagesablauf trotzdem einen hohen Nutzen generiert wird.

Erforderliche Datengrundlagen

Die Definition der Nutzenfunktion im ABVM erfolgt in einer ähnlichen Struktur wie die Nutzenfunktion eines aggregierten Modells. Die übergreifende Nutzenfunktion respektive die Parameterwerte stehen im Verhältnis zu den Nutzenparametern der SP Studien vom ARE. Aufgrund der umfassenden Nutzendefinition in MATSim, welche alle Strategien und mehrere Modellschritte abdeckt (Verkehrsmittel- und Routenwahl, Wahl der Abfahrtszeit), wurde speziell darauf geachtet, dass die Verhältnisse der beta-Parameter (Substitutionsraten) den empirischen Beobachtungen entsprechen. Eine Definition nach verhaltenshomonogenen Gruppen ist nicht notwendig, weil wie bei den vorherigen Modellschritten direkt auf alle personen- und weg-spezifischen Variablen zugegriffen werden kann. Es kann zusätzlich auch garantiert werden, dass zum Beispiel die Auto-Verfügbarkeit über die gesamte Wegekette gewährleistet wird, und dass bei einer neuen Verkehrsmittelwahl diese komplett umgesetzt wird. Eine Schätzung der Parameter aufgrund des Mikrozensus Verkehr ist möglich, wurde jedoch aus zeitlichen Gründen verworfen; eine neue Schätzung der Parameter für das Modellgebiet würde natürlich die Nutzenfunktion verbessern.

Folgende Variablen fließen über die übergeordnete Nutzenfunktion in die Verkehrsmittelwahl ein:

- Reisezeit belastetes Netz aus der letzten Iteration, tageszeitabhängig [min]
- MIV Reisekosten auf Basis der Reisedistanz (Treibstoffkosten, Abschreibung)
- Umsteigeanzahl, Umsteigewartezeit, Umsteigegehezeit
- Zu- und Abgangszeit OeV und MIV (MIV: in Abhängigkeit der räumlichen Dichte)

- MIV Parkplatzsuchzeit (räumlich nach Gebieten abgestuft, nur GVM Region Basel)
- Ticketkosten OeV (km-basiert, Halbtax-, GA-anhängig)
- Fahrplangenaue Umsteigezeiten und -distanzen
- Besitz PW, Verbundabonnement, Halbtaxabo und Generalabo

Die verwendeten VTTS (Value of Travel Time Savings) Werte werden in **Tab. 12** aufgelistet. Während der Modellerstellung wurde aus projektspezifischen Gründen auf die Mobilitätswerkzeuge fokussiert, welche bei der Bewertung der Tagespläne eine zentrale Rolle einnehmen, die Unterteilung der Bewertungsparameter in die Personengruppen *PKW verfügbar*, *GA und PKW verfügbar*, *GA verfügbar*, *Halbtax verfügbar* und *Weitere* ermöglicht eine direkte Untersuchung nach diesen Gruppen. Aufgrund des unterschiedlichen Mobilitätsverhaltens unterscheiden sich die Verhältnisse geringfügig von den Mittelwerten, wie sie bei den SP/RP Studien des ARE vorliegen. Dies ist aufgrund des Vergleichs mit den Beobachtungen und der unterschiedlichen Wahrnehmung begründet. Die offene Struktur der MATSim Nutzenfunktion ermöglicht ebenfalls eine effiziente Bewertung nach Fahrzweck wie sie im GVM verwendet oder in den SP/RP Studien des ARE geschätzt wurden. Aufgrund der realistischen Reisezeiten und -nutzen (e.g. Abb. 45, Abb. 46) sind auch in einem solchen Ansatz plausible Resultate zu erwarten, ersten Auswertungen des ABVM haben dies auch bestätigt.

Tab. 12 Zahlungsbereitschaften im ABVM Basel.

	PKW	GA und PKW	GA	Halbtax	Weitere
VTTS MIV	15.7	22.0	20.3	18.0	17.3
VTTS OeV	15.0	-	-	15.6	16.3
Kosten*/Umsteigen	1.3	1.3	-	1.3	1.3
VTTS Zugangszeit OeV	22.5	-	-	18.0	22.5

* Bezogen auf Treibstoffkosten

Resultate

GVM Region Basel:

Folgende Abb. 43 zeigt die Verkehrsmittelanteile jeweils im Vergleich der Verkehrsmittelanteile im GVM Region Basel zu den Anteilen im MZMV. Das GVM Region Basel hat einen starken Fokus auf den Verkehrszweck, die Auswertungen wurden deshalb nach Verkehrszweck verfeinert ausgewertet. Es besteht eine sehr gute Übereinstimmung der Verkehrsmittelanteile.

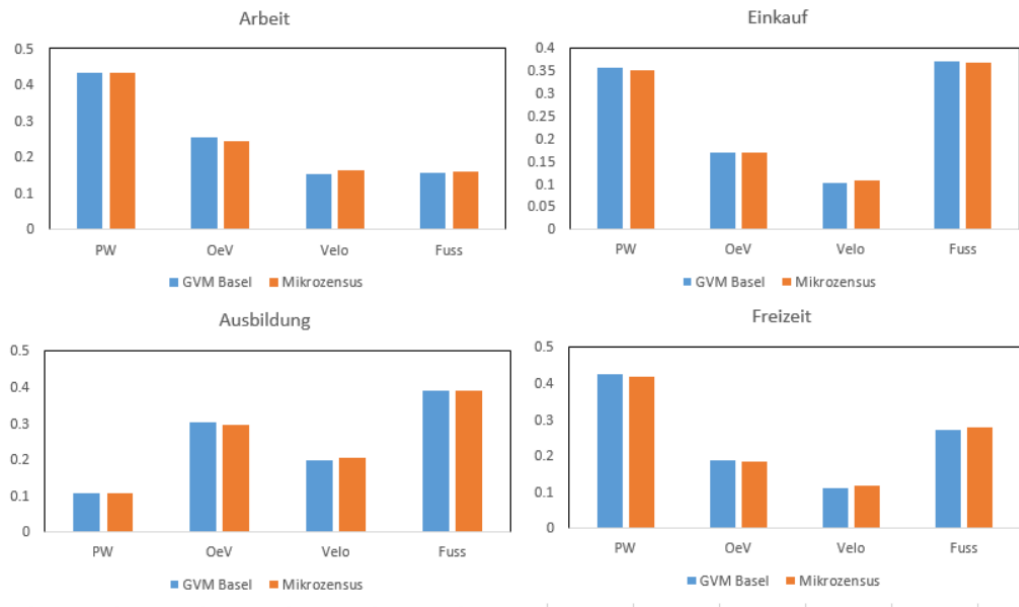


Abb. 43 Verkehrsmittelwahl für die einzelnen Wegezwecke im GVM Region Basel.

ABVM Basel:

Das ABVM Basel hat in der aktuellen Version einen starken Fokus auf die Unterscheidung gemäss Mobilitätswerkzeugen. Aus diesem Grund wurden die Verkehrsmittelanteile simultan mit der Distanzverteilung anhand dieser Unterteilung detailliert ausgewertet, in Abhängigkeit der Distanzverteilung. Abb. 44 zeigt grundsätzlich eine sehr gute Übereinstimmung der Distanzverteilung mit dem Zensus. In den Referenzdaten (Mikrozensus) sind noch gewisse Fluktuationen zu erkennen; diese sind jedoch auf die regionale Datenverfügbarkeit zurückzuführen.

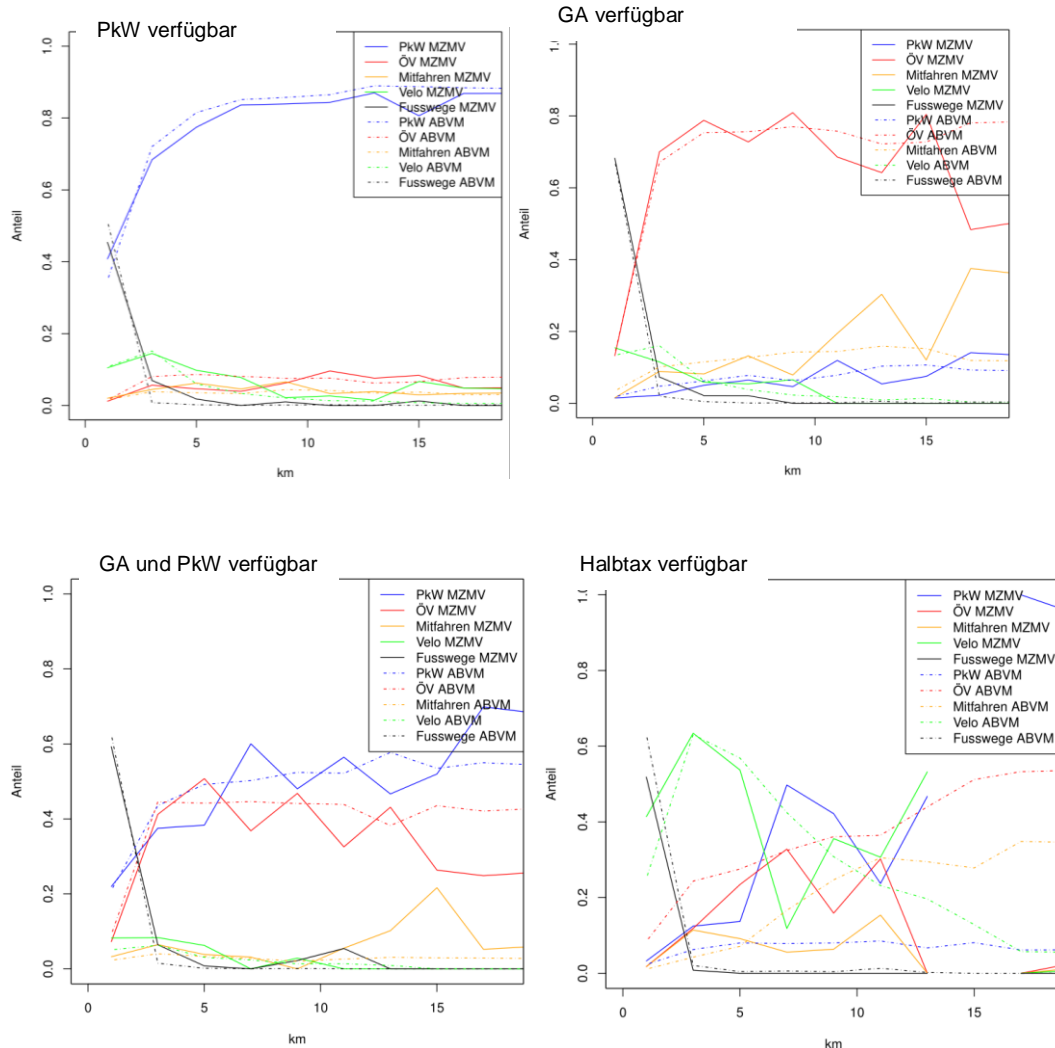


Abb. 44 Verkehrsmittelwahl für die einzelnen Subpopulationen nach Mobilitätswerkzeugen.

Alle weiteren Aggregationen können ebenfalls erstellt werden, je nach Anforderungen bei den Anwendungen. Die aggregierte Verteilung der Verkehrsmittelwahl nach Wegzwecken wurde im ABVM nicht genauer untersucht. Es gilt generell auch dort eine gute Übereinstimmung, mit einzelnen Abweichungen in gewissen Kategorien (Ausbildung). Hier zeigen sich die methodischen Vorteile eines ABVMs; es werden alle Kombinationen an Auswertungen ermöglicht, während im GVM Region Basel gewisse Kombinationen (z.B. die Unterteilung nach Mobilitätswerkzeug) nicht direkt oder nur eingeschränkt möglich sind.

Fazit

Die Implementierung der Verkehrsmittelwahl ist grundsätzlich unterschiedlich: Im GVM Region Basel erfolgt die Implementierung als separater und losgelöster Schritt. Im ABVM Basel ist die Verkehrsmittelwahl integriert in die Simulation und dessen Rückkoppelungsprozesse der Routenwahl und Wahl der Abfahrtszeit. Dies erlaubt eine Interaktion mit allen anderen Entscheidungen („triple convergence“, siehe Kapitel 6.5.2). Die Implementierung erfolgte im ABVM Basel hinsichtlich Mobilitätswerkzeuge und im GVM hinsichtlich Zweck. Beim ABVM kann die Verkehrsmittelverfügbarkeit personen- und tourspezifisch umgesetzt werden.

6.4 Teil 3: Vergleich Umlegung und Simulation

6.4.1 Routenwahl

GVM Region Basel

Methodik und Funktionalität

Mit der Routenwahl und Umlegung werden die erzeugten Wegematrizen für den MIV, OEV und Velo auf das Verkehrsnetz berechnet und damit die Verkehrsmengen auf dem Strassen- und auf dem Schienennetz abgebildet.

MIV

Die Berechnung der Routen erfolgt mit einem Kürzesten-Wege Algorithmus (Frank and Wolfe 1956). Für die Schätzung der Parameter des Routenwahlmodells (Fahrzeit, Fahrkosten, Maut) wurde die *stated preference* Erhebung des Bundes verwendet. Das Vorgehen der Parameter-Schätzung erfolgt, analog dem Vorgehen beim Verkehrsmittelwahlmodell, mit einem linearen Multinomialen Logit Ansatz. Es werden distanz- und zeitabhängige Parameter mit einbezogen.

Knotenwiderstände werden im GVM Region Basel durch fixe, nicht-belastungsabhängige Zeitzuschläge berücksichtigt. Die Zeitzuschläge sind abhängig von der Abbiegerichtung (geradeaus, links, rechts) und dem Rang der Vorgänger und Nachfolgerstrecke, so dass Einbiegen einen höheren Widerstand als Abbiegen bekommt.

OEV

Das Routenwahl-Verfahren legt in einem ersten Schritt jede OD-Beziehung auf die ÖV-Verbindung mit den minimalen generalisierten Kosten. Die generalisierten Kosten einer ÖV-Verbindung wird dabei berechnet aus der Reisezeit im ÖV, der Zugangszeit zur Haltestelle, der Wartezeit an der Haltestelle, dem Intervall, dem Fahrpreis und der Anzahl Umsteigegeh- und Wartezeiten sowie anderer Angebotscharakteristiken wie z.B. der Pünktlichkeit. Die Gewichtung der einzelnen Angebotsmerkmale durch die ÖV-Nutzer stammt aus der vom Bund für das Jahr 2015 durchgeführten *stated preference* Erhebung, welche die Reaktionsweisen der ÖV-Nutzer bzgl. Veränderungen beim ÖV-Angebot ermittelt und bewertet.

Bei der ÖV-Umlegung werden die Wege von der Quellzone zur Zielzone auf die verschiedenen ÖV-Verbindungen (resp. ÖV-Routen) umgelegt. Dabei wird auch der effektive Zugangsweg zu und von den Haltestellen (zu Fuss, mit Velo oder mit Auto) berücksichtigt (sog. Kombinierte Fahrten).

Um auch Prognosezustände im ÖV abbilden zu können, ohne den ganzen minutenfeinen Fahrplan bereits zu kennen, wurde ein taktbasiertes Verfahren verwendet, dass jedoch fahrplanfeine (minutenscharfe) Umsteigewartezeiten an OEV-Knoten zwischen Bahn-Bahn und Bahn-Bus verwendet.

Als Grundlage für die Schätzung der Parameter für das Routenwahlmodell der ÖV-Wege wurde die *stated preference* Erhebung des Bundes ausgewertet.

Erforderliche Datengrundlagen

Als Eingangsdaten werden neben den Wegematrizen, die Verkehrsnetze, Streckencharakteristiken und Streckenperformance-Funktionen (sog. CR-Funktionen, zur Berechnung der belastungsabhängigen Durchflussgeschwindigkeit), Besetzungsgrad der Fahrzeuge und beim ÖV die gewichteten Verbindungsqualitäten zwischen Start- und Zielort benötigt.

ABVM Basel

Methodik und Funktionalität

MIV

Die Routenwahl ist wie auch die Verkehrsmittelwahl und die Wahl der Abfahrtszeit ein Bestandteil der MATSim-Simulation und wird als Strategie innerhalb der iterativen Rückkopplung (Replanning) bezeichnet. Die Routenwahl ist abhängig den tageszeit-/belastungsabhängigen Fahrzeiten auf den Strecken. Es kann also sein, dass bei unterschiedlichen Abfahrtszeiten anderen Routen gewählt werden, wie auch empirisch zu beobachten ist. Dabei findet immer eine neue Berechnung der Route statt, auch dann, wenn im Replanning das Verkehrsmittel oder die Abfahrtszeit gewechselt wurde. Die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer Iteration ein Agent die Route, das Verkehrsmittel oder die Abfahrtszeit neu wählt, erfolgt gemäss der eingegebenen iterativen Replanningstrategie (siehe unten).

Das MIV Routing geschieht über einen wählbaren Routing Algorithmus. Meistens wird aus Effizienzgründen ein A*Landmarks Algorithmus gewählt. Die Simulation erfolgt über ein Fahrzeug-Folgemodell und berücksichtigt die Fahrzeuglängen und Kapazitäten der Strecken. So können verschiedene Fahrzeugtypen auf demselben Netz geroutet werden und auch miteinander interagieren. Das verwendete Fahrzeug-Folgemodell ist vielseitig in anderen Projekten im Einsatz; die Standardausführung, wie sie im ABVM Basel eingesetzt wurde, beinhaltet jedoch keine spezifischen Fahrspurenwechsel-Parameter und Rückstau-Entwicklung. Das ÖV Angebot wurde im ABVM Basel bisher aber nicht mit dem MIV Netz vereint, daher werden mögliche Interaktionen zwischen ÖV und MIV im Rahmen der Simulation nicht berücksichtigt, und es werden die vorgegebenen Fahrzeiten im ÖV-Fahrplan verwendet.

Die Knotenwiderstände sind in der Simulation zusätzlich definierbar; die Knotenwiderstände sind in der aktuellen ABVM Basel Version nicht umgesetzt, jedoch punktuell an Beispielen in der Innenstadt erfolgreich implementiert und verifiziert. Diese Implementierungen erfolgten mit pauschalen Widerständen je nach Abbiegebeziehung, und könnten relativ effizient im Modell mit einem Makro automatisiert werden. Die technische Umsetzung erfolgt aufgrund der Auflösung der Knoten in Teilknoten, um die Abbiegewiderstände zu erfassen (e.g. in Anlehnung an (Sheffi, 1985) oder wie in aggregierten Modellen). Alternativ können zusätzlich detaillierte Knotenwiderstände und dazugehörige Abhängigkeiten implementiert werden, wie sie bei LSA, Kreisverkehre oder vortrittsgeregelten Knoten vorkommen (Grether, 2014), diese Methoden werden jedoch (noch) nicht standardmässig eingesetzt.

Die Nutzenfunktion zur Bewertung der Tagespläne und somit der wahrgenommenen Raumwiderstände mit verschiedenen Verkehrsmitteln, Routen und Tageszeiten ist frei wählbar, insbesondere können zur Berechnung der Routen distanz- und zeitabhängige Variablen mit einbezogen werden. Die Parametrisierung geschieht über die Reisezeit und Reisekosten sowie über die MIV Zugangszeit (insbesondere Zugangszeit zum Parkplatz). Diese werden in eine gesamtheitliche Nutzenfunktion zusammengeführt. Die Gewichtung für Reisezeit und Reisekosten sind aus den VTTS Werten der SP Studien des ARE abgeleitet. Aus Ressourcengründen sind keine neuen Parameter geschätzt wurden. Die Wahl der Abfahrtszeit erfolgt innerhalb eines Zeitfensters (± 30 min der zugeordneten Aktivität wurde als Annahme verwendet), ansonsten erfolgt ein sehr hoher Kostenzuschlag und der Aktivitätenplan wird verworfen. Grundsätzlich ist es jedoch so, dass die Reisezeiten, welche aus der Simulation resultieren, sehr ähnlich sind mit den empirischen Reisezeiten, dies erfolgt auch aufgrund des standardisierten, angewendeten A* Algorithmus; ebenfalls begründet in den empirischen Vergleichen, welche schon gemacht wurden (Abb. 45, Abb. 46). Der Einbezug der MIV Zu- und Abgangszeit erfolgt in Abhängigkeit zur räumlichen Dichte, und umfasst aufgrund der hohen räumlichen Auflösung der Nachfrage (auf Gebäudeebene) in der Regel nur kurze Distanzen bis zur nächsten Strecke im Netzwerk. Die Höhe des berücksichtigten Widerstands folgt dem im GVM Region Basel verwendeten Wert.

OEV

Für den öffentlichen Verkehr wurde in MATSim Basel der SwissRailRaptor Algorithmus angewendet (M. Rieser et al., 2018). Der SwissRailRaptor Algorithmus wurde von der SBB entwickelt und später in den open source MATSim Code direkt integriert. Das Routing basiert auf einer Nutzenfunktion, welche eine Vielzahl von Variablen umfasst, insbesondere Fahrzeit, erwartete Abfahrts- und Ankunftszeit und Anzahl Umsteigevorgänge. Bei mehreren gleichwertigen Routen erfolgt die Auswahl zufällig (MATSim Basel). Der Algorithmus bietet die Möglichkeit erweitert zu werden, zum Beispiel mit einem Entscheidungswahlmodell. Folgende Einstellungen sind zurzeit möglich:

- Auswahl des Zeitfensters zur Berechnung der Route
- Wegzeit-abhängige Umsteigewiderstände
- Suchradius zur Erfassung der relevanten Haltestellen (ausgehend von Startpunkt resp. Aktivitätenstandort und vom Verkehrsmittel, welches zum Bahnhof verwendet wird).
- Unterscheidung der Einstellungen nach Subpopulationen; es kann also sein das gewisse Personengruppen unterschiedliches Verhalten aufweisen.
- Unterscheidung der Kostenfunktion nach zusätzlicher Unterteilung der OeV Verkehrsmittel, e.g. Tram, Zug, touristischen Züge, sowie nach den personenspezifisch vorhandenen Mobilitätswerkzeugen.
- Fahrzeuge können unabhängig voneinander und strikt nach Fahrplan verkehren, oder sie teilen sich das Verkehrsnetz untereinander und mit anderen Verkehrsmitteln (e.g. MIV) und können dann auch Verzögerung generieren.
- Ein taktbasiertes Verfahren, welches wie im GVM Region Basel auf dem OeV Takt beruht statt dem Fahrplan, ist zurzeit nicht in MATSim implementiert, und setzt eine Extraktion des Taktes aus einem Fahrplan voraus.

Zusätzliche Methoden, welche schon in einem separaten Projekt ausserhalb des ABVM angewendet wurden, sind intermodale Zugangswege. So können Verkehrsmittel (Fahrrad, autonome Fahrzeuge) zum Bahnhof verwendet werden, welche dann auch geroutet werden. Das Einzugsgebiet der einzelnen OeV Haltestellen kann sich dann vergrössern.

Für die Auswertungen des Algorithmus wird hier auf die Arbeiten der SBB verwiesen, die mit dem aktivitäten- und agentenbasierten Verkehrsmodell SIMBA MOBi erstellt worden sind. Diese zeigen, dass der Algorithmus sehr plausible Resultate liefert, im Vergleich mit der Fahrplan-Abfrage (Abb. 45) sowie mit externen Routing Algorithmen von HERE (<https://wego.here.com>) (Abb. 46). Die Auswertungen sind ähnlich zu weiteren Studien und Anwendungen aus e.g. Schweden oder Deutschland (Bischoff et al., 2019; Horni et al., 2016).

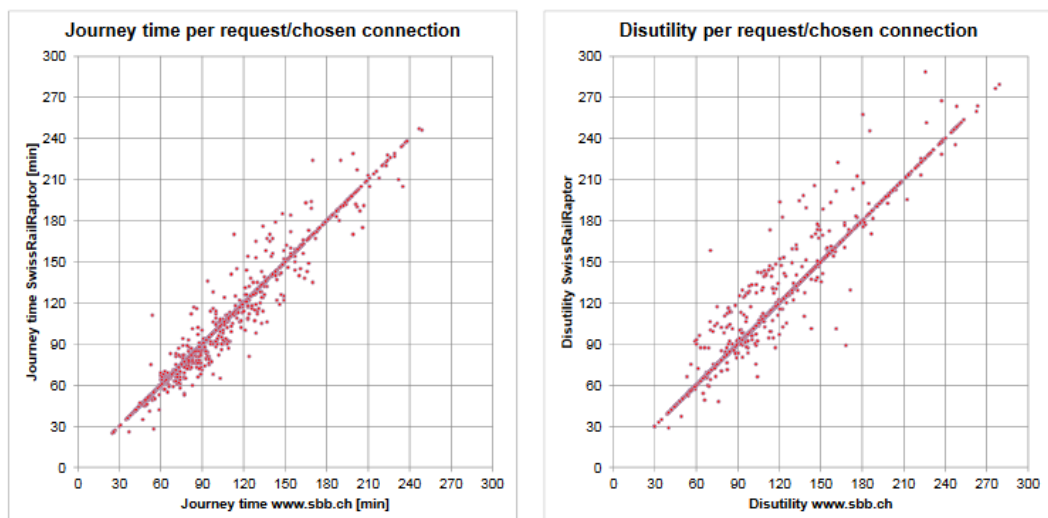


Abb. 45 Vergleich der gerouteten Verbindungen anhand des Routing-Algorithmus für SIMBA MOBi, mit den auf sbb.ch abgefragten Verbindungen (M. Rieser et al., 2018).

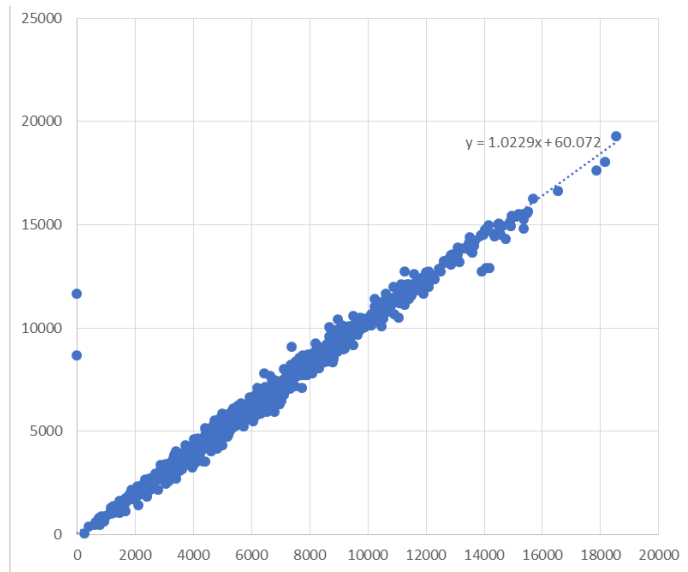


Abb. 46 Vergleich der gerouteten Verbindungen MIV anhand des Routing-Algorithmus, mit den Reisezeiten aus SIMBA MOBi (gemäss Nachfrage bei SBB, 2020).

Fazit

Die grundlegende Methodik der Routenwahl ist bei beiden Modellen unterschiedlich. Im ABVM besteht eine tageszeitliche Abhängigkeit, welche speziell im MIV ein zentraler Unterschied ist. Im OeV werden in beiden Modellen die Tageszeiten im Angebot abgebildet, die Auslastung hat jedoch methodisch keinen Einfluss in den Modellimplementationen.

Die Widerstandsfunktionen (cr-Funktion respektive das Fahrzeug-Folgemodell) sind ebenfalls unterschiedlich. Knotenwiderstände sind im GVM Region Basel als pauschale Widerstände umgesetzt; aufgrund der Ressourcen fehlt diese Umsetzung im ABVM Basel, ein pauschaler Widerstand ist jedoch ebenfalls möglich. Weitere, detailliertere Knotenwiderstände (e.g. mit Umlaufzeiten) erfordern eine vertiefte Auseinandersetzung mit der Methodik und Konvergenz, im aggregierten Ansatz wie auch in der Fahrzeug-Simulation.

Die Parameter der Nutzenfunktion werden in beiden Modellen aus der SP Studie abgeleitet. Die Implementierung des GVM passt insbesondere zu den SP-Studien des AREs und der Unterteilung nach Verkehrszweck. Das ABVM hat eine umfassendere Nutzenfunktion, welche die Verhältnisse der beta-Parameter aus den SP-Studien abdeckt.

6.4.2 Umlegung und Simulation

GVM Region Basel

MIV

Für die Umlegung auf das Strassennetz wird die „User Equilibrium“ Methode verwendet. Bei dieser Methode wird mit einem iterativen Prozess ein Gleichgewichtszustand zwischen Verkehrsnachfrage und dem Verkehrsangebot erreicht, bei dem im Gleichgewichtszustand kein Reisender seine Reisezeit (resp. generalisierten Kosten) senken kann indem er eine andere Route wählt. Bei Stauerscheinungen wird somit ein Teil des Verkehrs dynamisch auf Ausweichrouten umgelegt.

Die PW-Matrix wird simultan mit der (nicht modellierten) Lieferwagenmatrix mit der sog. Multi-Modal Multi-Class Assignment (MMA) umgelegt. Damit können u.a. bei Bedarf auch unterschiedliche Zeitwerte pro Verkehrsmittel oder Strassenmauten einbezogen werden. Die schweren Güterfahrzeuge (Lastwagen, Last- und Sattelzüge) werden mit der „All or

Nothing“ Methode umgelegt und als Vorbelastung auf das Netz addiert. Berücksichtigt werden auch Abbiegewiderstände.

OEV

Für die Umlegung der ÖV-Wege wird die Pathfinder Methode von TransCAD angewendet. Bei der ÖV-Umlegung werden die Wege von der Quellzone zur Zielzone auf die verschiedenen ÖV-Verbindungen (resp. ÖV-Routen) umgelegt. Dabei wird auch der Zugangsweg zu und von den Haltestellen (zu Fuss, mit Velo oder mit Auto) berücksichtigt (sog. kombinierte Fahrten). Die technische Beschreibung dieses Ansatzes befindet sich in der TransCAD Online-Hilfe für TransCAD 8.0.

Da es in ÖV-Netzen oftmals mehrere mögliche Verbindungsalternativen gibt, werden zur oben beschriebenen „günstigsten“ Verbindung weitere Verbindungsalternativen aufgenommen und die Personenflüsse darauf aufgeteilt. Dazu werden entlang der ÖV-Verbindung mit den geringsten generalisierten Kosten Verbindungsabschnitte mit mehreren ÖV-Linien zu sog. Verbindungsbündeln zusammengefasst. Auf solchen durch mehrere Linien bedienten Abschnitten wird bei den Ein- und Umsteigepunkten eine, vom kombinierten Bedienungsintervall abhängige, reduzierte Wartezeit berechnet. Weitere Verbindungen werden in das Verbindungssset nur dann aufgenommen, wenn dadurch die gesamten generalisierten Kosten auf der OD-Beziehung gegenüber dem oben genannten einzelnen Bestweg reduziert werden. Auf diesem kombinierten ÖV-Netz mit Verbindungsbündeln wird dann wiederum der Weg mit den minimalen generalisierten Kosten berechnet. Dazu wird die Methode „optimal strategies“ angewendet: Diese Methode berechnet für jeden Entscheidungspunkt bei der Wahl der ÖV-Linie die generalisierten Kosten des verbleibenden Weges bis zum Zielpunkt und wählt die Verbindung mit den insgesamt minimalen generalisierten Kosten zwischen Start und Ziel.

Bei der Umlegung werden die Personenflüsse auf die oben beschriebenen Verbindungsbündel in Funktion der Bedienungshäufigkeit auf die ÖV-Linien aufgeteilt.

ABVM Basel

Methodik und Funktionalität

Während der Simulation übernehmen vordefinierte Strategien die Anpassungen von Aktivitätenplänen (Horni et al., 2016). Wie in zahlreichen anderen MATSim Anwendungen verfolgen die Agenten in ihren Strategien auch im ABVM Basel das Ziel der Nutzenmaximierung. Die Neuplanung der Aktivitätenpläne und der Wege für jeden Agenten führt zu Änderungen der verkehrlichen Situationen und beeinflusst dadurch die Nutzenwerte der Agenten in jedem Iterationsschritt. Zusätzlich werden neue Pläne in Abhängigkeit der Ausprägung des Agenten generiert, welche danach den Agenten zur Wahl stehen. Die Auswahl der getätigten Strategien zur Planänderung (ob Verkehrsmittelwahl, Routenwahl oder Wahl der Abfahrtszeit) wird für jede Iteration anhand Wahrscheinlichkeiten bestimmt. Verwendet wurden dazu folgende Gewichtungen, in Anlehnung an die meisten praktischen MATSim Anwendungen:

- Bewertung und Wahl der vorhandenen Pläne aufgrund der Nutzenfunktion (70%)
- Wahl der Abfahrtszeit und Routenberechnung (20%)
- Verkehrsmittel- und Routenwahl (10%)

Die Modularität von MATSim ermöglicht je nach Anwendung weitere Strategien hinzuzufügen.

Die MATSim Nutzenfunktion setzt sich in praktisch jeder MATSim Anwendung aus den Nutzen der Aktivitäten (S_{act}) und der Nutzen der Wege (S_{trav}) zusammen; für den Gesamtnutzen des gesamten Tagesplans (S_{plan}) werden dann die Nutzen der einzelnen Elemente aufaddiert:

$$S_{plan} = \sum_{q=0}^{N-1} S_{act,q} + \sum_{q=0}^{N-1} S_{trav,mode(q)}$$

Die Nutzen respektive Kosten der Wege setzen sich zusammen aus den Zeitkosten und Kosten des Verkehrsmittels.

$$S_{trav,q} = C_{mode(q)} + \beta_{trav,mode(q)} \cdot t_{trav,q} + \beta_m \cdot \Delta m_q + (\beta_{d,mode(q)} + \beta_m \cdot \gamma_{d,mode(q)}) \cdot d_{trav,q} + \beta_{transfer} \cdot x_{transfer,q}$$

Die Auswahl der Wege erfolgt dann anhand deren Nutzen. Die Nutzenparameter sind unterschiedlich je nach Mobilitätswerkzeuge. Für die Nutzenfunktion in MATSim wurden die folgenden Parameter verwendet: Reisezeit (unterschieden nach Verkehrsmittel und Mobilitätswerkzeuge), Reisekosten (unterschieden nach Verkehrsmittel und Mobilitätswerkzeuge). Für den OeV werden Zugangszeit, Abgangszeit, Umsteigewiderstand und Wartezeit berechnet, teilweise unterschieden nach Mobilitätswerkzeuge.

Resultate

Die Resultate aus der Simulation werden in *Tab. 13* dargestellt, ausgewertet nach den Reisedistanzen und Reisezeit; es werden die Mittelwerte mit dem Zensus verglichen, wie auch die Abweichungen anhand der SQV Werte (siehe Kapitel 6.1.3). Die Mittelwerte weichen in beiden Modellansätzen etwas ab, wobei beim GVM Region Basel die Abweichung etwas grösser ist als beim ABVM Basel. Die SQV Werte sind alle bei über 0.85, und entsprechen also mindestens einer guten Qualität. Einzig bei der Reiseweite OeV im GVM Region Basel fällt der Wert auf unter 0.8 (0.74).

Tab. 13 Mittelwert und Abweichung der Simulation (ABVM Basel) und der Umlegung (GVM Region Basel).

	Zensus Mittelwert	ABVM Mittelwert	ABVM SQV	GVM Mittelwert	GVM SQV
Reiseweite [km]					
VTTS MIV	9.32	9.29	1	8.09	0.89
VTTS OeV	10.04	9.98	0.99	6.50	0.74
Reisezeit [min]					
VTTS Zugangszeit OeV	18.21	14.33	0.92	10.64	0.85
VTTS Zugangszeit OeV	31.85	35.16	0.94	27.15	0.92

Abb. 47 zeigt die Distanzverteilung der beiden Modellimplementierungen nach der Umlegung (GVM Region Basel) respektive nach der Simulation (ABVM Basel), jeweils für den OeV und den MIV. Zusätzlich sind in den Abbildungen noch die CR Werte als übergeordnete Vergleichsgrösse eingeblendet (Beschreibung der CR Bewertungsfunktion im Kapitel 6.1.3). Es ist ersichtlich, dass die meisten Distanzverteilungen gut übereinstimmen; wiederum fällt auf, dass die OeV Distanzverteilung etwas abfällt ($cr = 0.73$) (diese hat für den ÖV Nutzer eine geringe Bedeutung).

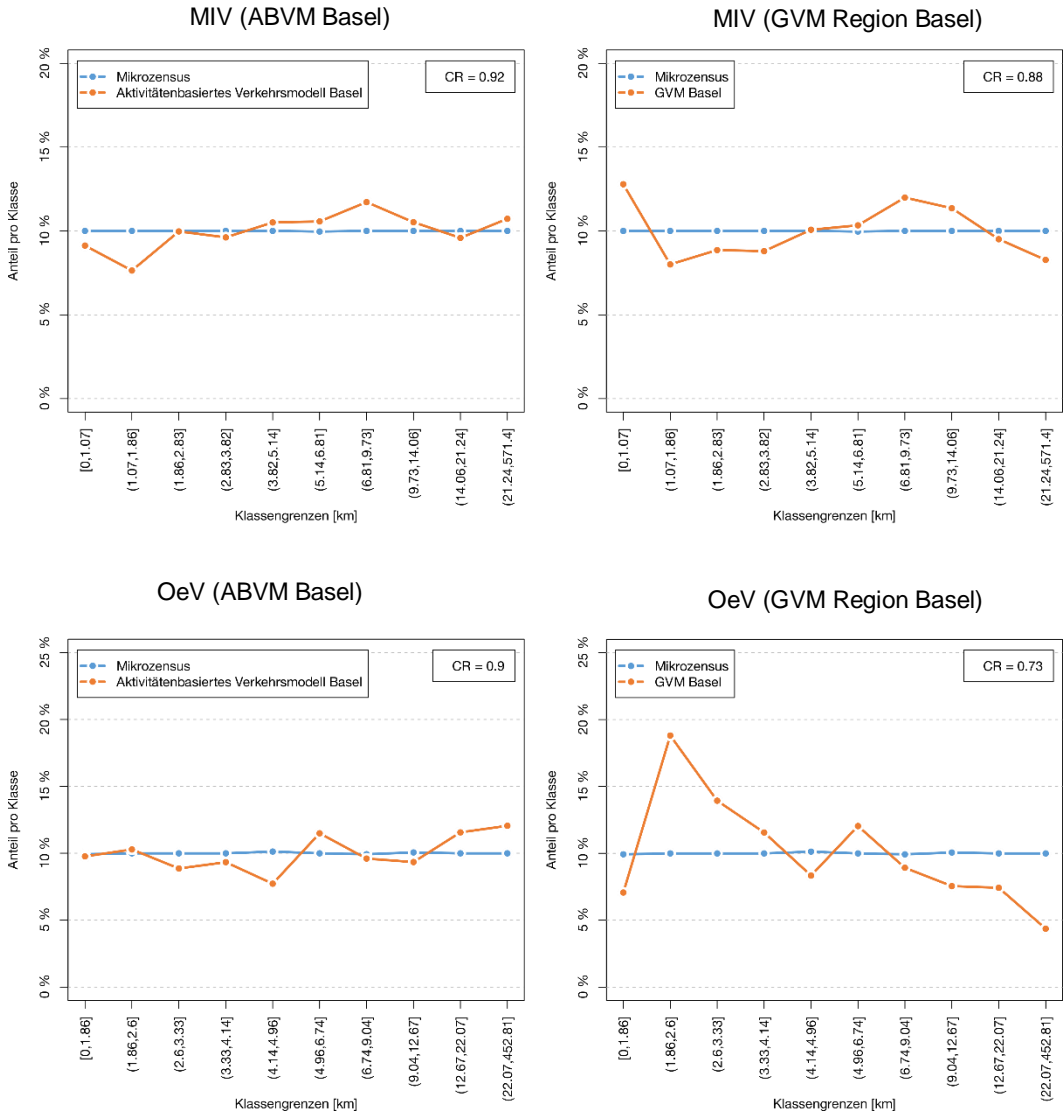


Abb. 47 Distanzverteilung der Simulationsergebnisse in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl (MIV oben, OeV unten) für das ABVM Basel (links) und das GVM Region Basel (rechts).

Abb. 48 zeigt die Reisezeitverteilung der beiden Modellimplementierungen nach der Umlegung respektive Simulation, jeweils für OeV und MIV. Aufgrund der verfügbaren Daten sind die Klassengrößen nicht genau äquiquantil, was zu Schwankungen der Klassengrößen bei den Modellgrößen und Vergleichsgrößen (MZMV) führt. Die Abweichungen sind hier etwas grösser, als in der Distanzverteilung. Der Grund ist das in der Auswertung beim GVM die Wege mit Velo-Zugang und Auto-Zugang nicht in der Auswertung dabei sind.

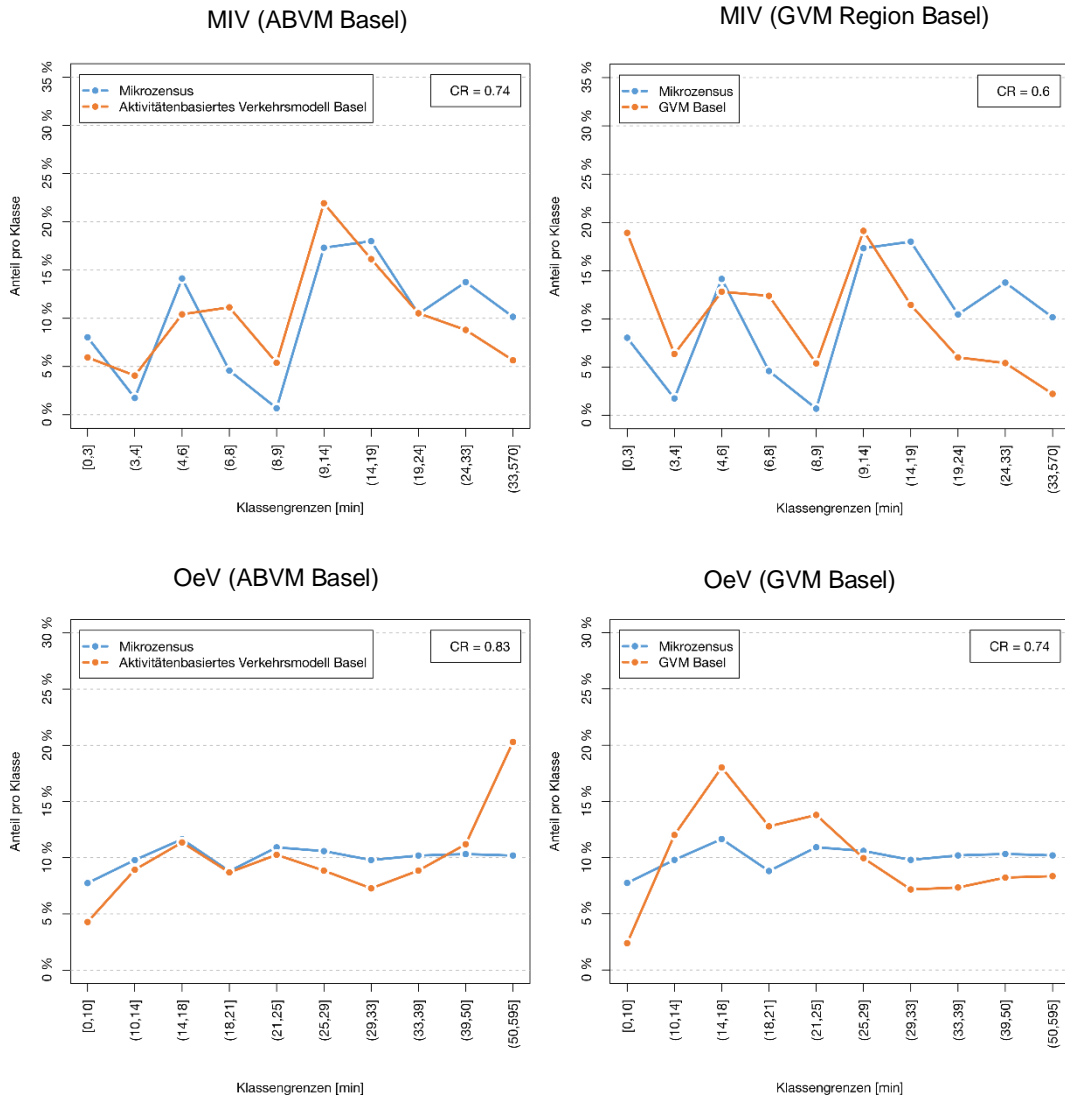


Abb. 48 Wegezeitenverteilung der Simulationsergebnisse in Abhängigkeit der Verkehrsmittelwahl (MIV oben, OeV unten) für das ABVM Basel (links) und das GVM Region Basel (rechts).

Die MIV Zählstellen werden für den DWV mit den Modellergebnissen verglichen. Der Vergleich geschieht vor und nach der Kalibrierung. Da das ABVM in der aktuellen Version nicht auf Zählstellen kalibriert wurde, wurde nur ein Vergleich zwischen den unkalibrierten Zuständen gemacht. Abb. 49 zeigt den Zählstellenvergleich für das ABVM Basel (links) und das GVM Region Basel (rechts), zusätzlich mit den 15% und 30% Abweichungsgrenze. Es ist zu beachten, dass zusätzliche Zählstellen im GVM ausgewertet wurden, welche beim ABVM aus Ressourcengründen nicht ausgewertet wurden. Der visuelle Eindruck (welcher weiter unten noch quantifiziert wird) zeigt, dass fast alle Zählstellen in beiden Modellen innerhalb der 30% Abweichungsgrenze liegen. Einzelne Ausreißer liegen ausserhalb der 30% Linie, es ist jedoch keine Systematik zu erkennen. Auch im Vergleich zu anderen Modellen ausserhalb der Modellregion Basel sieht das Gesamtbild ähnlich aus.

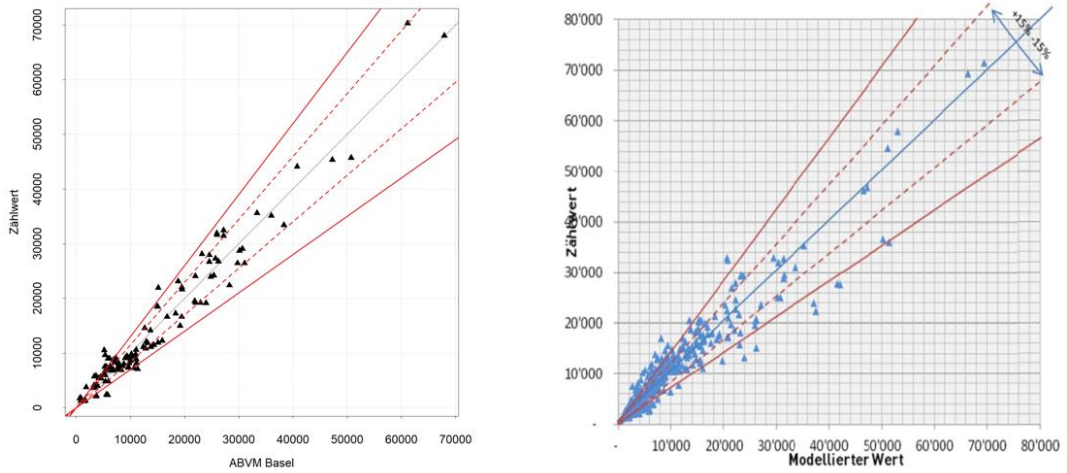


Abb. 49 Zählstellenvergleich MIV DWV beim ABVM Basel (links) und beim GVM Region Basel (rechts)

Die Auswertung der SQV Werte für die MIV Zählstellen quantifiziert den visuellen Eindruck der obigen xy-Darstellung. Abb. 50 zeigt die SQV Werte kategorisiert für die unkalibrierte Auswertung, wie oben erwähnt hat das GVM zusätzliche Zählstellen berücksichtigt im Vergleich zum ABVM. Für kalibrierte Modelle wäre > 0.8 ist eine sehr gute bis befriedigende Übereinstimmung, < 0.8 besteht eine unbefriedigende Übereinstimmung für kalibrierte Modelle. Für einen unkalibrierten Zustand sind das gute Auswertungen, welche natürlich dann nach der Kalibrierung noch besser werden. **Tab. 14** zeigt die Resultate nach der Kalibrierung für das GVM Region Basel.

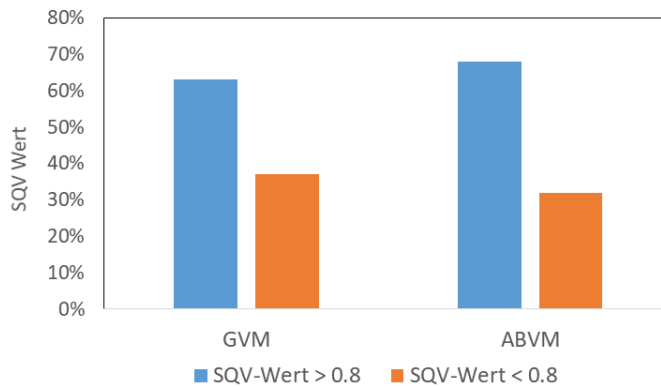


Abb. 50 Zählstellenvergleich MIV unkalibriert DWV anhand SQV Werte beim GVM Region Basel (links) und beim ABVM Basel (rechts).

Tab. 14 Relative Abweichung der Modellwerte (Querschnittswerte) und SQV vom GVM Region Basel vor und nach der Kalibrierung.

Modellzustand	Abweichung gewichtet	Abweichung ungewichtet	Mittlere Niveaudifferenz gewichtet	Qualität SQV \geq 0.8
MIV 2016, DWV, unkalib.	+/-19.6%	+/-23.5%	-4.2%	63%
MIV 2016, DWV, kalib.	+/-5.4%	+/-5.8%	+1.4%	98%

Fazit

Die Verfahren beim GVM Region Basel und beim ABVM Basel sind grundsätzlich unterschiedlich und schwierig in der Methodik zu vergleichen. Trotzdem lässt sich ein Vergleich der berechneten Belastungen durchführen, wenn es zur Gegenüberstellung der Modellresultate mit den empirischen Werten kommt. Es wurden dazu zwei unterschiedliche Auswertungen durchgeführt, nämlich die Verteilung der berechneten Distanzen und den Vergleich mit den empirisch erhobenen Zählwerten, als Übersicht und aggregiert (SQV) und graphisch als xy-Abbildung. Die Unterschiede in diesen Auswertungen sind gering und lassen keine Rückschlüsse auf die angewendete Methodik zu.

Aus methodischer Sicht sind die Umlegung und die Simulation grundsätzlich unterschiedlich. Hier kann erwähnt werden, dass die beiden Ansätze verschiedene Vor- und Nachteile haben. Bezüglich Konvergenzverfahren (triple convergence) fehlt im GVM Region Basel die tageszeitliche Abhängigkeit, welche als Nachteil aufgeführt werden kann.

6.4.3 Vergleich kalibrierte Zustände

Die Kalibrierung wird im Folgenden definiert als die automatische Korrektur der Nachfragematrix (GVM) respektive der Nachfragepläne (ABVM). Die Möglichkeiten der Kalibrierung werden im Folgenden separat für das GVM Region Basel wie auch für das ABVM Basel untersucht, aufgrund deren methodischen Unterschiede.

Die Kalibrierung erfolgt je nach Anwendung unterschiedlich in der Methodik und im Umfang. Falls die finale Nachfrage (Nachfragematrizen resp. Tagespläne) angepasst wird, muss beachtet werden, dass die Methodik der Matrixkorrektur respektive die Korrektur der Tagespläne die vorgelagerte Nachfrageberechnung nicht mehr berücksichtigt; das Kalibrierungsergebnis erlaubt also keinen Rückschluss mehr auf die Herleitung der Nachfragewerte. Dies ist insbesondere bei Szenarien und bei Prognoseberechnungen zu beachten, weil in diesen Anwendungen die Kalibrierung nicht angewendet werden kann. Zusätzlich ermöglicht es keinen Rückschluss bei personenspezifischen oder wegezweck-spezifischen Fragestellungen. Es müssen aus diesem Grund auch immer „Workarounds“ erstellt werden, damit trotz Kalibrierung die Szenarien und Prognoseresultate gerechnet werden können. Unabhängig von den „Workarounds“ muss detailliert untersucht werden, ob auch Fehler im Angebot, den Raumstrukturdaten und in der Nachfrageberechnung vorhanden sind, welche eine Abweichung der Zählwerte hervorrufen.

Kalibrierung GVM Region Basel

Bei der Modellerstellung GVM Region Basel wurden die MIV und OEV Nachfragematrizen anhand den Zählstellen in einem letzten Schritt des Modellaufbaus automatisch kalibriert, für den DWV und die Spitzenstunden. Dabei wurde prioritär die Verteilung der Wege-Distanzen als Nebenbedingungen eingegeben. Aufgrund der Kalibrierung schneidet der Vergleich mit den Zählstellen besser ab (Abb. 51) als im unkalibrierten Zustand.

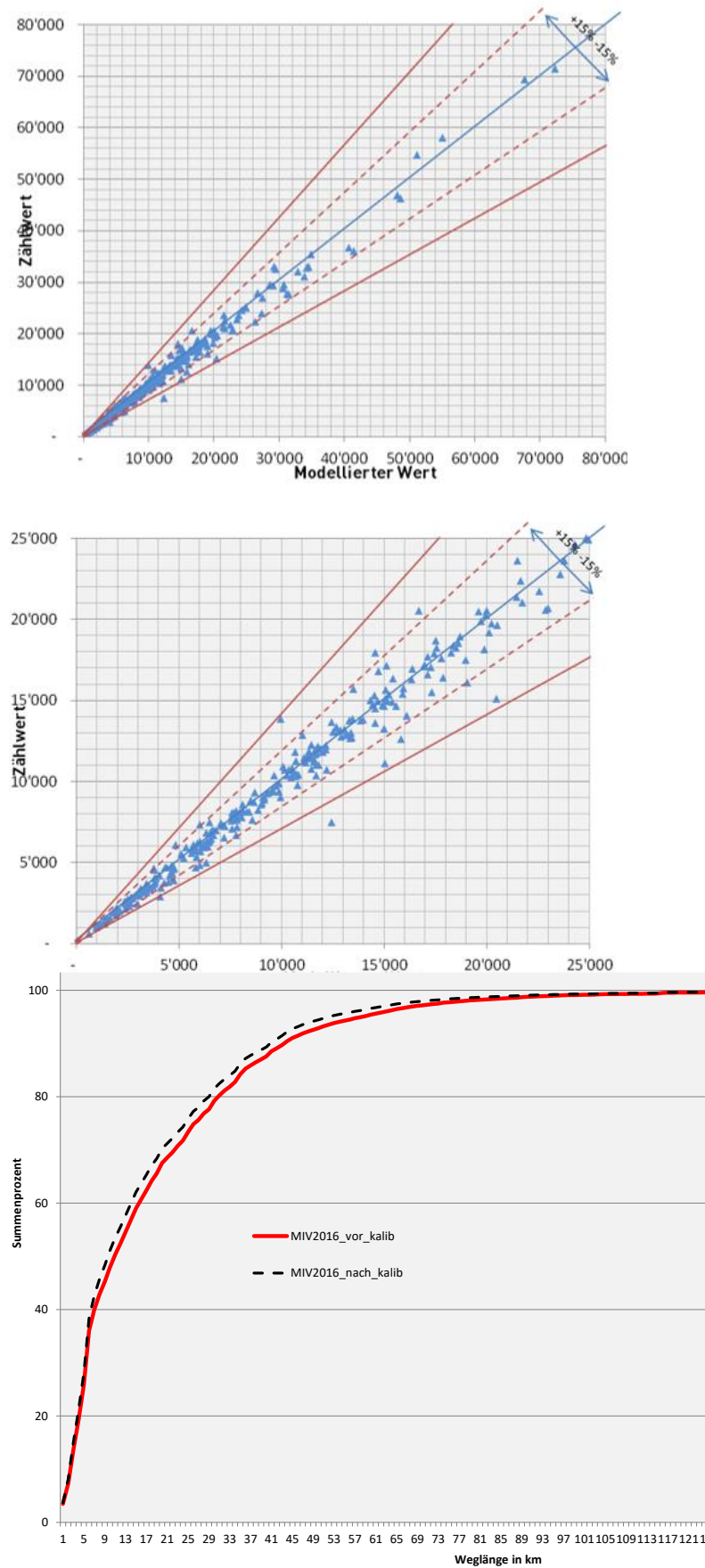


Abb. 51 Zählstellenvergleich kalibriert für den DWV global (oben), Fokus kurze Wege (Mitte) und die Distanzverteilung (unten)

Während der automatischen Kalibrierung können die zu wenig oder zu viel im Modell abgebildeten Restmengen an Wegen korrigiert werden. Das heisst, es werden Teilmengen (aus sog. Spinnen an den Zählquerschnitten) der Wegematrizen iterativ solange erhöht und/oder abgemindert, bis die modellierten Belastungen bestmöglich den Werten der Zählstellen entsprechen. Dabei wird darauf geachtet, dass die Distanzverteilung der Wege vor und nach der automatischen Kalibration in etwa gleichbleibt.

Es gilt zu beachten, dass die durch die automatische Kalibration vorgenommene Korrektur nicht prognosefähig ist. Die Differenzmatrix nach automatischer Kalibration minus vor automatischer Kalibration (=Deltamatrix) muss daher bei jeder Neuberechnung der Wegematrix hinzuaddiert werden. Dies führt zu Abweichungen bei Szenarien- und Prognoseberechnungen, im Vergleich zu einem Modell ohne Differenzmatrix. Dies hat natürlich auch Einfluss auf die Randsummen und die Einhaltung der Randsummen in Szenarien und Prognoseberechnungen. Bei einem Vergleich von zwei Szenario-Vergleichen (mit z.B. einem Differenzplot der Verkehrsbelastungen) fällt der Korrekturanteil aus der Kalibration jedoch weg und spielt keine Rolle mehr.

Kalibrierung ABVM Basel

Das Gegenstück der Matrixkorrektur des aggregierten Modells ist beim ABVM die Korrektur der Pläne, also das Hinzufügen respektive Löschen gewisser Tagespläne. Es wurde bisher für das GVM Region Basel keine Kalibrierung respektive Korrektur der Tagespläne durchgeführt, wegen der fehlenden Notwendigkeit bis zum Zeitpunkt dieses Berichtes. Dies könnte jedoch gemacht werden, aufgrund der weiter unten beschriebenen Methoden. Der Vorteil eines unkalibrierten Modells ist, dass dadurch die Möglichkeiten der vollständigen Rückschlüsse auf die Nachfrageberechnung wie auch auf die Simulationsresultate bestehen bleiben; es können vollständig alle Personen- und Wege-spezifischen Informationen ausgewertet werden.

In der MATSim Simulationsumgebung stehen zwei Verfahren zur Verfügung, welche ähnlich wie beim aggregierten Modell die Fahrten an die Zählstellenwerte angleicht. Beide Verfahren, Cadyts wie auch Opdyts, wurden von Prof. Gunnar Flötteröd entwickelt (Flötteröd, 2017; Flötteröd et al., 2012). Das erste Verfahren, Cadyts, vervielfacht die Tagespläne, ähnlich wie die Nachfragematrizen im aggregierten Modell. Aufgrund der Tagespläne, welche hinzuaddiert oder entfernt werden, können die Zählwerte angenähert werden. Cadyts wurde schon mehrfach und erfolgreich in verschiedenen Anwendungen verwendet, in MATSim Umgebungen und ausserhalb (e.g. SUMO). Opdyts verändert die Simulationsparameter aufgrund empirischen Eingabewerten innerhalb der eingegebenen Unsicherheit. Opdyts wurde später entwickelt und wurde noch nicht so oft angewendet wie Cadyts. Der Vergleich der Kalibrierungsmethoden zwischen aggregierten Umlegungsmodellen und einer Fahrzeugfolge-Simulation ist in der Literatur noch ausstehend und ist auch hier aus Ressourcengründen nicht möglich.

6.4.4 Berechnung der Spitzenstunden

GVM Region Basel

Methodik und Funktionalität

Für die tageszeitlichen Teilmatrizen wurden die Tagesmatrizen pro Verkehrsmittel und Verkehrszweck in Stundenscheiben aufgeteilt. Die Stundenanteile wurden pro Verkehrsmittel und Wegzweck über die Ankunfts- und Abfahrtszeiten aus der Erhebung Mikrozensus Mobilität und Verkehr bestimmt.

Mit diesen Stundenanteilen können die Tagesmatrizen in stundenfeine Matrizen aufgelöst werden und auf die gewünschte Tagesperiode aggregiert werden. In TransCAD steht dazu die Routine „PA Matrix to OD Matrix“ zur Verfügung. Durch die Berücksichtigung der Ankunfts- und Abfahrtszeiten werden auch die Lastrichtungen/Nichtlastrichtungen bei den Infrastrukturbelastungen korrekt abgebildet. Insgesamt bleibt mit dieser Methode die Konsistenz zur Tagesmatrix (0-24h) vollständig gewahrt.

Notwendige Grundlagedaten

Stundenanteile der startenden und ankommenden Wege, nach Wegzweck aus dem Mikrozensus Verkehr.

ABVM Basel

Methodik und Funktionalität

Im ABVM werden die die ganzen Tagespläne in Abhängigkeit der Zeit und der verkehrlichen Belastungen simuliert. Die Wahl der Abfahrtszeit ist dabei integriert in der Simulation, wie auch die damit verbundene Dauer der Aktivitäten wie Arbeits-, Freizeitaktivität oder die Zeit zu Hause. Es können somit Auswertungen über unterschiedliche zeitliche Aggregationen gemacht werden. Als Grundlage und Input dienen dabei die zeitliche Verteilung wie sie aus dem Mikrozensus erhoben wurde. Gewisse zeitliche Grenzen werden in der jetzigen Version mitgegeben, damit zum Beispiel Einkaufsaktivitäten im DWV Tagesablauf nicht unrealistisch verzögert werden. Weitere Entscheidungswahlmodelle wären zukünftig hilfreich, um die Aktivitätendauer noch genauer berechnen zu können, insbesondere für Prognoseberechnungen. Verfrühtes Ankommen oder Verspätungen werden in Abhängigkeit eines Toleranz-Intervalls angepasst. Dies ermöglicht die Berücksichtigung der triple convergence in einer einheitlichen Funktion.

Notwendige Grundlagedaten

Die Eingabe der Startlösung der Tageszeiten und Aktivitätendauer erfolgt auf Basis des Zensus bei der Erstellung der Wegeketten für jeden einzelnen Agenten.

6.4.5 Auswertungsmöglichkeiten

Die Auswertungsmöglichkeiten sind für jeden Modellschritt unterschiedlich. Im Folgenden wird auf die Resultate fokussiert, wie sie nach einer Umlegung respektive nach einer Simulation vorliegen, also mit den Streckenbelastungen und den Kenngrößen (Reisezeiten, Reisedistanzen). Es wird im Folgenden in zwei Ebenen unterschieden, nämlich die Ebene des Verkehrsnetzes und des Linienfahrplans, und die Ebene der Kenngrößen.

Auf der *Netzebene* können natürlich die Streckenbelastungen und die Linienbelastungen nach Tageszeit ausgewertet werden. Für ein aggregiertes Modell stehen die berechneten Zeitscheiben zur Verfügung, welche je nach Berechnungsmethode auch eine Wechselwirkung darstellen können. Im GVM Region Basel werden die Stundenanteile pro Verkehrsmittel und Verkehrszweck über die Ankunfts- und Abfahrtszeiten aus der Erhebung MZMV ermittelt. Durch die Berücksichtigung der Ankunfts- und Abfahrtszeiten werden auch die Last-/Nichtlastrichtungen bei der Infrastrukturbelastung korrekt abgebildet. Insgesamt bleibt mit dieser Methode die Konsistenz der Tagesmatrix (0-24h) vollständig gewahrt. Beim ABVM Basel kann eine beliebige zeitliche Aggregation ausgewertet werden; die tageszeitlichen Wechselwirkungen sind durch die MATSim Simulation vollständig abgebildet, auch hinsichtlich Verwendung der gewählten Verkehrsmittel. Dieselben Wechselwirkungen gelten auch für den OeV. Zusätzlich können beim ABVM Basel Rückschlüsse auf alle initialen personenspezifischen Variablen und deren Ausprägungen durchgeführt werden.

Neben den totalen OeV Belastungen können diese in beiden Modellen auch differenziert ausgewertet werden nach OeV-Produktgruppen (S-Bahn, Fernverkehr, Tram und Bus) oder nach Personenwagen, Lieferwagen und schweren Güterfahrzeugen. Im GVM Region Basel werden in Kombination mit dem OeV zusätzlich noch die Zugangswege zu den Haltestellen geroutet (Fusswege bis Haltestelle, MIV-Wege bis P&R-Anlage, Velowege bis B&R-Anlage). Dies ist beim ABVM Basel nicht umgesetzt, wäre jedoch technisch möglich. Beim MIV können Knotenströme nach einer Umlegung aus dem GVM ebenfalls herausgelesen werden, im ABVM Basel ist dies ebenfalls möglich, es können hierzu vorhandene Visualisierungen genutzt werden.

Bei ABVM Basel können beliebige Subpopulationen getrennt ausgewertet werden, gefiltert nach Wegezweck oder personenspezifischen Attributen. Zusätzlich kann die gesamte Wegekette dargestellt und auch ausgewertet werden (siehe Beispiel in Abb. 52 für einen bestimmten Querschnitt). In MATSim stehen zusätzlich noch die Resultate der Fahrzeugsimulation zur Verfügung, zum Beispiel Fahrgeschwindigkeiten. Diese können in einem aggregierten Modell wie das GVM Region Basel aus der Auslastung abgeleitet werden.

Auf der Ebene der *Kenngrossen* unterscheiden sich die beiden Modellansätze. Beim GVM Region Basel und allgemein bei aggregierten Modellen werden die gesamten Kenngrossen für alle Zonen – Zonen Verbindungen berechnet und können ausgewertet werden. Bei grossen Modellen entsteht dadurch einen relativ hohen Speicherbedarf, weil die Grösse der Matrizen im Quadrat zur Zonenanzahl wächst. Beim ABVM sind die Kenngrossen auf der Ebene der gerouteten Wegekette verfügbar, also überall dort wo auch tatsächlich eine Nachfrage vorhanden ist. Für eine vollständige Kenngrossenmatrix, wie sie beim GVM berechnet wird, müssen die zusätzlichen Verbindungen, welche nicht geroutet werden, nachgerechnet werden, im belasteten oder unbelasteten Zustand. Es werden dazu Start- und Endpunkte sowie Abfahrtszeiten bestimmt. Für einen Tagesdurchschnitt können mehrere Zeiten und mehrere Start- und Endpunkte definiert werden. Dieses Verfahren ist für die Rückkoppelungen erforderlich, um die Kenngrossen für diskrete Entscheidungsmodelle zu schätzen (e.g. bei einer Anwendung NISTRA).

Die wichtigsten Kenngrossen werden für beide Modelle im Folgenden aufgelistet:

- Reisezeit belastet und unbelastet
- Reisedistanz
- Umsteigeanzahl, Umsteigewartezeit, Umsteigegezeit
- Zu- und Abgangszeit OeV und MIV (räumlich nach Gebieten aufgeteilt, GVM Region Basel: verkehrsmittelspezifischer ÖV-Zu-/Abgang)
- MIV Parksuchzeit (räumlich nach Gebieten abgestuft, nur GVM Region Basel)
- Fahrzeugkosten, Treibstoffkosten, Parkkosten
- Ticketkosten OeV (km-basiert)
- Intervall / Takt (im GVM Region Basel enthalten, ABVM Basel erfolgt die Routenwahl aufgrund des Fahrplans)
- Besitz PW, Verbundabonnement, Halbtaxabo und Generalabo (im GVM Region Basel enthalten, ABVM werden die Mobilitätswerkzeuge über die Subpopulationen unterschieden)

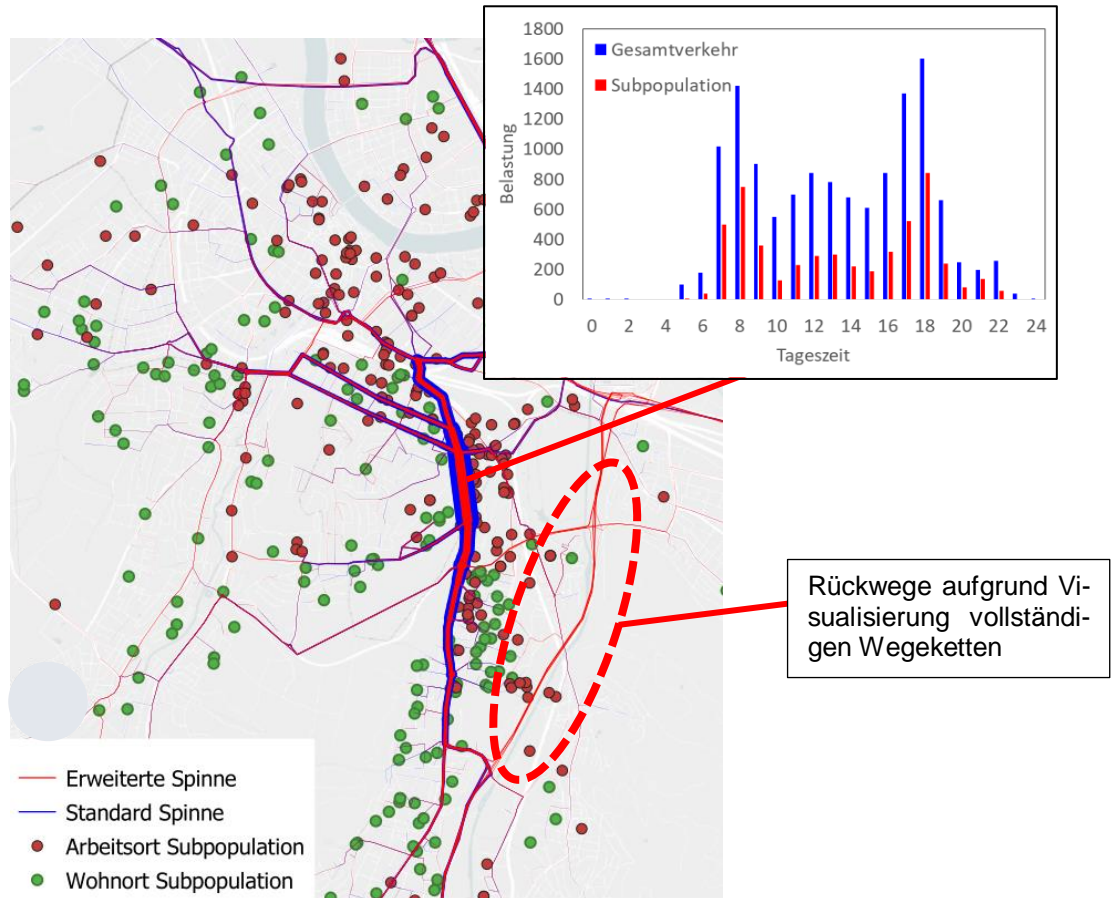


Abb. 52 Querschnittsbelastung mit einer erweiterten Spinne, welche die ganzen Wegeketten abbildet, und Tagesganglinie, inklusive Auswertung einer ausgewählten Subpopulation (hier 25-64 Jahre, männlich).

6.5 Teil 4: Konvergenzanalysen

Aus den verschiedenen möglichen Sensitivitätsbetrachtungen werden im Folgenden zwei Themen besprochen, welche als besonders relevant für den Modellvergleich betrachtet werden. Das erste Thema ist die Konvergenz während der Umlegung respektive Simulation (Kapitel 6.5.1). Das zweite Thema umfasst die grosse Schlaufe (Kapitel 6.5.2). Es werden für dieses Projekt keine zusätzlichen Auswertungen für die Sensitivitätsbetrachtungen durchgeführt, sondern auf bestehende Arbeiten verwiesen, welche sehr umfangreich vorhanden sind und im Folgenden in Bezug zu dieser Arbeit gebracht werden.

6.5.1 Methodischer Einschub „Konvergenz bei der Routenwahl MIV“

Im Folgenden werden die wichtigsten Merkmale für die Konvergenz bei der MIV Routenwahl aufgelistet und besprochen. Im OeV ist die Konvergenz hinsichtlich Routenwahl unterschiedlich definiert, falls überhaupt ein Verfahren angewendet wird, welches eine Konvergenz erfordert. Aus Gründen des zusätzlichen Aufwands wird hier nicht weiter auf die OeV Umlegung eingegangen.

Aggregierte Modelle (GVM Region Basel)

In aggregierten Modellen wird die Konvergenz vor allem bei der MIV Umlegung thematisiert. Für die Umlegung wird oft ein Gleichgewichtsverfahren angewendet, welches sich in der Rechengeschwindigkeit, im Speicherbedarf, in den möglichen Funktionalitäten (e.g.

Einbezug Knotenwiderstände) und in der Stabilität unterscheiden. Beispiele sind Frank and Wolfe Algorithmus und quellbasierte (origin-based) Verfahren. Die Variablen, an welchen die Konvergenz gemessen wird, sind ebenfalls unterschiedlich. Das Standard-Nutzergleichgewicht wird so gemessen, dass die Reisezeiten der Quell-Ziel-Verkehre nicht mehr minimiert werden können („no traveler can improve his travel time by unilaterally changing routes.“). Der Konvergenzparameter wird dann oft mit dem *relative gap* beschrieben, welcher entsprechend als Schwellenwert definiert ist (Boyce et al., 2004).

Das GVM Region Basel wendet den Frank and Wolfe Algorithmus an, welcher als ein gängiges Umlegungsverfahren bekannt ist. Vergleiche hinsichtlich Performance und Robustheit wurden schon gemacht (Boyce et al., 2004; Vitins, 2014). Generell ist der Algorithmus sehr robust und konvergiert in den meisten Fällen. Bezüglich Abbruchkriterien schlägt SVI 2015/001 ein rel.Gap von 10^{-4} (Boyce et al., 2004) für Gleichgewichtsumlegungen und 10^{-3} für stochastische Umlegungen vor. Das GVM Region Basel hat sogar einen Grenzwert von 10^{-8} . Dafür notwendig sind ca. 50 Iterationen beim DWV.

Aufgrund der Zonengrösse und den virtuellen Anbindungen, welche die Schwerpunkte der Zonen und das zugrundeliegende Verkehrsnetz verbinden, ergeben sich gewissen Unschärfen. Diese Unschärfen sind lokal, können jedoch auch vereinzelt regional oder überregionale Auswirkungen haben. Lokal können Ungenauigkeiten entstehen, weil aufgrund der punktuellen Einspeisung durch die Anbindung auf den benachbarten Strecken eine Überlastung entsteht, im Verleich zu einer gleichmässigeren Einspeisung in der Empirie. Grössere Auswirkungen können vereinzelt entstehen, wenn das Gleichgewicht in einem unsicheren Zustand ist und kleine Änderungen im Grundzustand zu grösseren Auswirkungen bei den Belastungen führen, zum Beispiel bei einer Vielzahl von parallelen Strecken und dadurch vielen gleichlangen Routen. Die Auswirkungen der Anbindungen und Zonengrösse sind in Kapitel 6.2.2 besprochen.

Agentenbasierte Simulationen (ABVM Basel)

Im ABVM Basel wird nach der Berechnung der individuellen Wegeketten die MATSim Simulation verwendet. Die MATSim Simulation umfasst in der Anwendung Basel die Fahrzeug-Simulation, die Verkehrsmittelwahl und die Wahl der Abfahrtszeit. Aufgrund der zusätzlichen Freiheitsgrade sind aus methodischen Gründen zusätzliche Iterationen notwendig, im Vergleich zu einem aggregierten Ansatz. Der direkte Vergleich der beiden Ansätze ist also nicht möglich, weil die beiden Ansätze grundsätzlich unterschiedliche Methoden mit unterschiedlichem Umfang abbilden. Trotzdem kann die Qualität der Resultate untersucht werden, welche im Folgenden kurz beschrieben werden. Zusätzlich stellt **Tab. 15** die Eigenschaften der beiden Methoden zusammenfassend gegenüber.

Bezüglich der Konvergenz der im ABVM verwendeten MATSim Umgebung wurden umfangreiche Auswertungen vom IVT (Guggisberg Bicudo, 2020; Horni et al., 2016) durchgeführt. Aufgrund der stochastischen Modelleigenschaften und der Rückkoppelungen innerhalb der Simulation sind die Konvergenzeigenschaften nicht vergleichbar mit einer Gleichgewichtsumlegung in einem aggregierten Modell; die zugrundeliegenden mathematischen Formulierungen sind komplett unterschiedlich.

In der MATSim Simulation treten aufgrund der stochastischen Prozesse gewisse Variabilität in den Resultaten auf. Dies ist bei einer methodischen Entscheidung zu bedenken, weil dann die Auswertungen ebenfalls zu einer Variabilität führen können. Abb. 53 und Abb. 54 zeigen die Variabilität auf einer aggregierten Stufe (Abb. 53) sowie disaggregierten Stufe (Abb. 54) basierend auf der Arbeit von (Guggisberg Bicudo, 2020). Grundlage ist der CV Wert (coefficient of variation), welcher aus der Standardabweichung dividiert mit dem Stichprobenmittelwert berechnet wird. In Abb. 53 wird die Variabilität als CV Wert für die Nutzenfunktion, die Wegdistanzen, wie auch für die Verkehrsmittelwahl dargestellt, für MIV (MS-car), OeV (MS-PT), Fussverkehr (MS-walk), Fahrradverkehr (MS-bike) sowie Mitfahren (MS-ride). Es wird zusätzlich zwischen vier Szenarien unterschieden; das Szenario „Baseline innovation“ behält die Innovationsraten über die gesamte Simulation konstant, „Baseline switchoff“ schaltet die Innovationsraten nach 90% der Simulationszeit aus, „Anneal“ reduziert kontinuierlich die Innovationsraten, und „Greedy“ ein angenähertes Nutzer-

gleichgewicht mit reduzierter Stochastik. Es ist ersichtlich, dass auf einer grossen Aggregationsstufe die Variabilität gering ist. Abb. 54 zeigt die Variabilität auf verschiedene Aggregationsstufen. Die erzeugte Variabilität ist unter 10% bei MIV Strecken mit mehr als ca. 50 Fahrzeugen und bei OeV Haltstellen mit über 50 Ein- und Aussteiger, für die Methoden „Baseline switchoff“, „Anneal“ und „Greedo“. Diese Variabilität wird tiefer wenn man mehrere Rechenläufe untersucht, die mit unterschiedlichen Zufallszahlen gestartet werden. Grund dafür ist die diskrete Umsetzung der Nachfrage in einzelne Agenten, welche insbesondere keine Dezimalstellen bei der Nachfrage erlaubt, wie in einem aggregierten Modell.

Tab. 15 Vergleich der Umlegung im aggregierten Modell mit der Simulation im ABVM Basel

	Was wird berechnet?	Welche Methoden werden angewendet?
ABVM Basel	Routenwahl, Verkehrsmittelwahl, Abfahrtszeit (weitere Module sind ebenfalls möglich)	Fahrzeug-Simulation mit sukzessiv-Verfahren
GVM Region Basel	Routenwahl	Frank and Wolfe

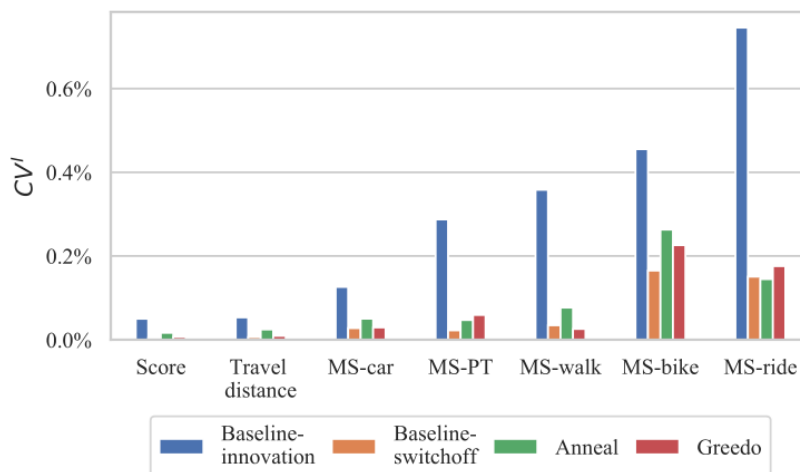


Abb. 53 Variabilität (CV) der Simulation auf zwischen verschiedenen Rechendurchläufen für die einzelnen Verkehrsmittel in einer aggregierten Auswertung ((Guggisberg Bicudo, 2020), S.25), für die berechneten Nutzen der Pläne (score), die Wegedistanzen (travel distance), die Verkehrsmittel MIV (MS-car), OeV (MS-PT), Fussverkehr (MS-walk), Fahrradverkehr (MS-bike) sowie Mitfahren (MS-ride).

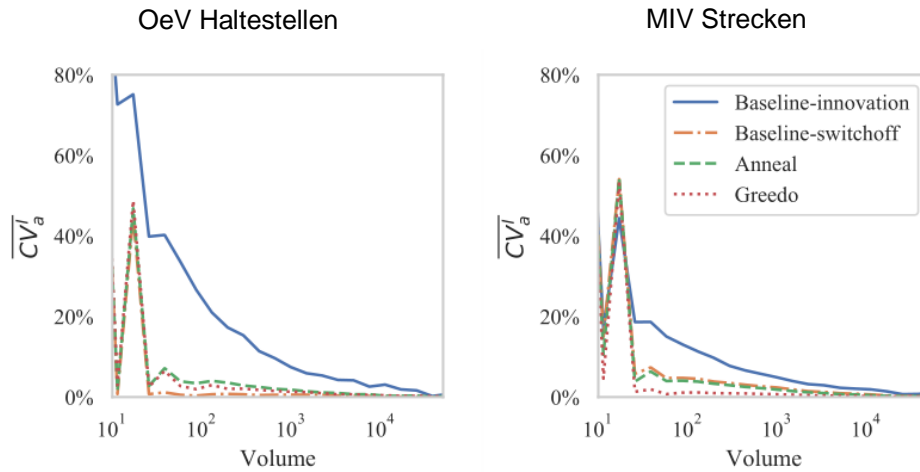


Abb. 54 Variabilität der Belastungen in der diskreten MATSim Simulation auf verschiedenen Aggregationsstufen (Guggisberg, 2020, S.26).

Ensemble-Runs:

Agentenbasierte Modelle und deren Resultate beinhalten eine stochastische Komponente. Es sind teilweise mehrere Durchläufe notwendig um auf einer feinen Aggregationsstufe ein statistisch ausreichend gesichertes Ergebnis zu erhalten. Je nach zu untersuchende Aggregationsstufe muss eine unterschiedliche Anzahl Durchläufe gerechnet werden (siehe auch e.g. (N. Rieser, Tasnady, de Vries, et al., 2018)). Die ensemble Runs sind jedoch nur notwendig bei kleiner Aggregationsstufe, e.g. bei kleinen Bahnhöfen. Sonst sind die ensemble Runs aus rechnerischer Sicht nicht notwendig.

6.5.2 Methodischer Einschub „Grosse Schlaufe“

Die „grosse Schlaufe“ bezeichnet die iterative Berechnung der einzelnen Modellschritte, damit die Resultate der Umlegung und Simulation, z.B. die Reisezeiten oder daraus abgeleitet die Erreichbarkeiten, wieder in die vorherigen Modellschritte zurückgespielt werden können (Abb. 55). Das Ziel der grossen Schlaufe ist eine verbesserte Berechnung aller Modellschritte und eine Annäherung an ein Gesamtgleichgewicht aller Modellschritte (unter anderem triple convergence (Downs, 1992) und ergänzt mit dem Schritt der Verkehrszeugung).

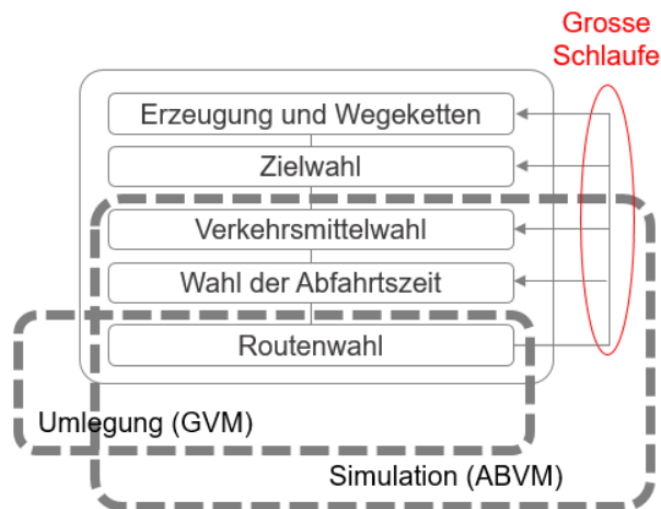


Abb. 55 Die grosse Schlaufe und die Abdeckung der Umlegung im GVM Region Basel respektive im ABVM Basel.

GVM Region Basel

Die Methodik der grossen Schleife im aggregierten Modell bezieht sich auf das sequentiell respektive simultan berechnete 4-Stufen Modell mit einer Umlegung (SVI 2015/001, (N. Rieser, Tasnady, de Vries, et al., 2018)). Die grosse Schleife umfasst die Rückkoppelung der Umlegungsergebnisse auf die vorhergehenden Prozesse und weicht darum etwas von der obigen Definition ab, bei welcher auch die Wahl der Abfahrtszeit explizit in der grossen Schleife integriert ist. Im SVI Bericht 2015/001 (N. Rieser, Tasnady, de Vries, et al., 2018) werden für aggregierte Modelle folgende Berechnungen im Zusammenhang mit der grossen Schleife vorgeschlagen:

- Mindestens 5 Iterationen
- Allenfalls Glättung (hier besteht jedoch die Gefahr, dass mit einem Glättungsalgorithmus gewisse Fehler bei der Berechnung umgangen werden)
- Nachweis der Konvergenz
- Kenngrössen

Im GVM Region Basel umfasst die grosse Schleife die Rückkoppelung mit der Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahl. Es sind ca. 3-5 Iterationen notwendig, bis die Konvergenz erreicht wird. Abb. 56 zeigt das Konvergenzverhalten des GVM Region Basel in Richtung des Gleichgewichtszustandes.

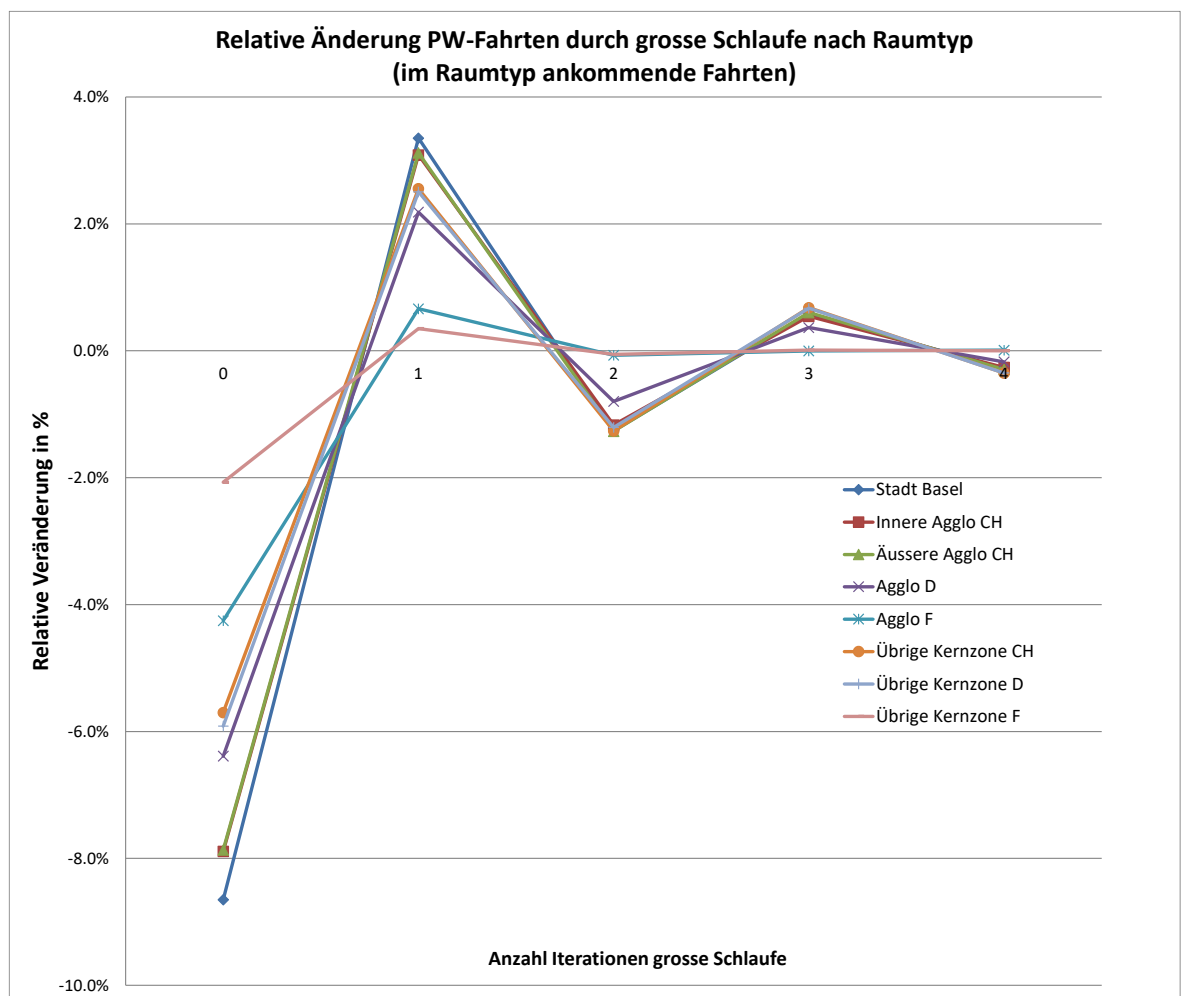


Abb. 56 Konvergenzverhalten des GVM innerhalb der grossen Schleife.

ABVM Basel

Im ABVM Basel hat die verwendete MATSim Simulation einen Teil der grossen Schlaufe integriert. Zurzeit in verschiedenen Anwendungen etabliert sind neben der Routenwahl die Verkehrsmittelwahl und Wahl der Abfahrtszeit, welche in der Simulation berücksichtigt werden (schematisch in Abb. 55 dargestellt). Abb. 57 zeigt die Entwicklung der Nutzenmaximierung der einzelnen Agenten über den Verlauf der Iterationen, für das ABVM Basel. Es ist ersichtlich, dass der Nutzen der Agenten stetig vergrössert wird. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Nutzen optimiert wird hinsichtlich der vorgegebenen Freiheitsgrade (Routenwahl, Verkehrsmittelwahl, Wahl der Abfahrtszeit).

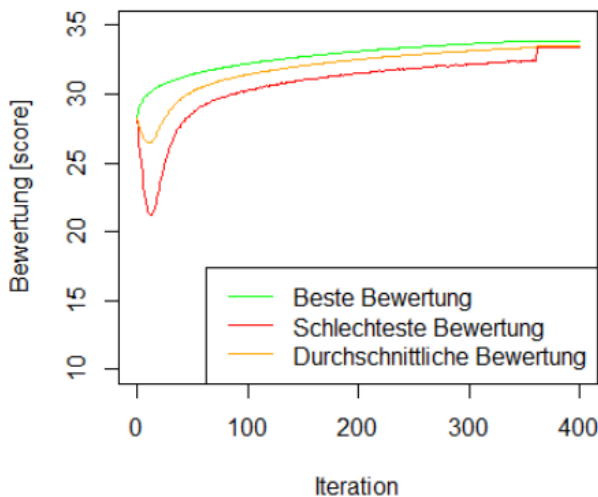


Abb. 57 Entwicklung Nutzen der einzelnen Tagespläne, Durchschnitt, bester und schlechtester Nutzen der Population.

Falls die Zielwahl ebenfalls in den Prozess der grossen Schlaufe integriert werden soll muss die Verortung der Wegeketten neu durchgeführt werden. Dazu werden die Reisezeiten und -distanzen aus der Simulation zurückgegeben (gemittelt über einzelne Tageszeiten). Die primäre Zielwahl, die Wegeketten sowie die sekundäre Zielwahl können dann aufgrund der Simulationsergebnisse neu berechnet werden. Diese Integration der Zielwahl wurde für das ABVM Basel schon durchgeführt, jedoch noch nicht so ausführlich getestet wie beim GVM Region Basel. Es wird aufgrund der Ergebnisse vermutet, dass die Anzahl Iterationen ähnlich sind wie beim GVM Region Basel, Voraussetzung ist jedoch eine Glättung der stochastischen Variabilität welche methodisch möglich und umsetzbar ist.

6.5.3 Zusammenfassung Konvergenzanalysen

Konvergenzverhalten der angewendeten Methoden ist für das Verständnis der Resultate elementar, wie auch für die Vergleichbarkeit zwischen den Szenarien. Grundsätzlich bieten beide Ansätze (Gleichgewichtsberechnung sowie MATSim Fahrzeugfolgesimulation) eine klare Konvergenzeigenschaft und eine ausreichende Genauigkeit für die Konvergenz. Das GVM Region Basel hat aufgrund der kontinuierlichen Nachfrage eine genauere Konvergenz-Eigenschaft. Aufgrund der stochastischen Eigenschaft des ABM und der Simulation ist beim ABVM Basel je nach Aggregationsstufe eine Variabilität zu erwarten.

Die grosse Schlaufe ist beim ABVM teilweise integriert, was die Verkehrsmittelwahl und die Wahl der Abfahrtszeit betrifft. Die grosse Schlaufe kann deshalb in diesem Umfang effizient genutzt werden. Falls die Zielwahl ebenfalls integriert werden soll kann im jetzigen Zustand das zugrundeliegende ABM hinzugeschaltet werden. Es ist anzunehmen, dass eine Konvergenz stattfindet welche dem GVM Region Basel ähnlich ist, allenfalls innerhalb der stochastischen Rahmenbedingungen. Dies wurde jedoch noch nicht ausführlich nachgewiesen.

6.6 Teil 5: Realitätstests

Aus den verschiedenen möglichen Realitätstests werden im Folgenden zwei Tests vorgestellt, je für den OeV und den MIV, welche einen Einblick in einfache Modellberechnungen ergeben. Dies erfolgt im Gegensatz zu den umfassenderen Szenarienberechnungen, welche im folgenden Kapitel 0 vorgestellt werden. Der erste Realitätstest umfasst eine MIV Streckensperrung (Kapitel 6.6.1), der zweite Realitätstest umfasst eine Taktverdichtung im OeV (Kapitel 0).

In diesem Kapitel wird speziell für den MIV-Test den Ursachen möglicher Abweichungen der Modellansätze genau nachgegangen. Für den OeV-Test wird auf die möglichen Unterschiede hingewiesen, sowie auf die Quellen welche die OeV Umlegung und Simulation weiter beschreiben; auf eine ausführliche technische Auswertung wird im Folgenden für den OeV-Test verzichtet. Der Hintergrund ist dass die Ursache für die Unterschiede potentiell in verschiedenen Teilschritten der Nachfrageberechnung wie auch in der Umlegung liegen können und darum eine umfassende Analyse sehr aufwändig ist, speziell auch für den OeV. Zusätzlich stellen Angebot und speziell die Anbindungen methodisch einen Hauptunterschied dar; weitere Unterschiede werden zusätzlich im Folgenden besprochen.

6.6.1 Sperrung MIV Strecke (Birsig-Viadukt)

Ziel

Es erfolgt eine komplette Sperrung des Birsig-Viaduktes für den gesamten MIV über einen Tag. Es sollen die Umlegungsergebnisse ausgewertet werden, die Nachfrage bleibt bei dieser Analyse konstant, es werden keine Verkehrsmittelwahleffekte abgebildet. Die Ziele sind

- Visuelle Überprüfung der Routenwahlergebnisse im MIV
- Übereinstimmung der Zu- und Abnahme
- Räumliche Ausdehnung der Effekte

Methodik

- Sperrung des Birsigviaduktes in beide Richtungen für den MIV im Verkehrsnetz
- Umlegung (GVM) resp. Simulation der MIV-Nachfrage
- Erstellung von Differenzdarstellungen und Überprüfung der Ergebnisse

Aufgrund der grundsätzlichen Unterschiede zwischen dem GVM Region Basel und dem ABVM Basel (Angebot, Nachfrage) sind gewisse unterschiedliche Resultate zu erwarten. Folgende methodischen Unterschiede werden sich am stärksten auf die Resultate und mögliche Differenzen auswirken:

- Die Anbindungen im GVM Region Basel speisen die Nachfrage punktuell pro Zone in das Modell ein, wohingegen beim ABVM die Aktivitäten den Gebäuden zugeordnet werden (siehe auch Abb. 36) und dann pro Gebäude die nächstegelegene Strecke definiert, welche dann als Einspeisung der Fahrzeuge dient. Es sind darum mindestens auf gewissen Streckenabschnitten Abweichungen zu erwarten. Beispielsweise beträgt die Nachfrage in gewissen Zonen ca. 500 Fahrzeuge / Tag (Novartis, Spital Bruderholz, Shopping Center Allschwill Paradies, ...), je nach Einspeisung in diesen Zonen sind grössere Abweichungen zu erwarten.
- Die Nachfrage ist grundsätzlich unterschiedlich berechnet, siehe Kapitel 6.2-6.4.
- Das Angebot ist ebenfalls unterschiedlich erstellt und basiert auf unterschiedlichen Grundlagen, unter anderem das Verkehrsnetz und die Codierung (siehe Kapitel 5).
- Die Umlegungsmethodik des GVM Region Basel ist grundsätzlich unterschiedlich im Vergleich zum eingesetzten Fahrzeugfolgmodell im ABVM Basel.
- Der beobachtete Zeithorizont ist ebenfalls unterschiedlich; während beim GVM ein Durchschnitt verwendet wird, hat das ABVM eine kontinuierliche zeitliche Komponente

welche in der Simulation sekundengenau berücksichtigt wird (Abb. 58). Diese kontinuierliche zeitliche Simulation führt im ABVM speziell in den Spitzenstunden zu Überlastungen; aus demselben Grund werden ja in aggregierten Modellansätzen separate Umlegungsmodelle für die Spitzenstunden erstellt.

- Die Verhaltensparameter beruhen auf unterschiedlichen Grundlagen (siehe Kapitel 6.3).

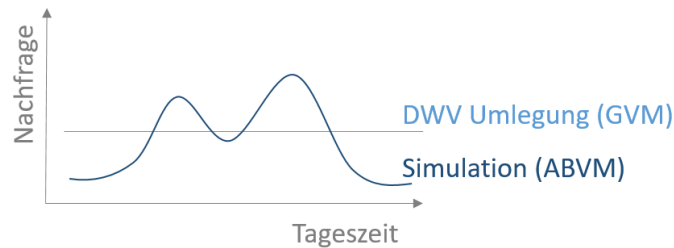


Abb. 58 Schematische Darstellung der zeitlichen Komponente hinsichtlich der Anwendung „Streckensperrung MIV“.

Aufgrund dieser vielen Unterschiede sind Abweichungen zu erwarten, welche sich möglicherweise überlagern können und nicht eindeutig einem Unterscheidungsmerkmal zugeordnet werden können. Aus diesem Grund wurden im Folgenden möglichst viele Unterschiede eliminiert, und darauffolgend eine Berechnung mit der aggregierten Umlegung und mit der Simulation erstellt, damit dann die Resultate besser vergleichbar sind:

- Für die Gleichgewichtsumlegung wurde das MIV Angebot vom ABVM für beide Berechnungen (aggregierte Umlegung und Simulation) verwendet, womit die Unterschiede, welche durch die Netzattributierung entstehen, dadurch eliminiert werden. Es wurden aus Effizienzgründen die Anbindungen zu den nächstgelegenen Knoten automatisch generiert, diese werden dann bei der aggregierten Umlegung verwendet.
- Die Nachfrage MIV wurde vom ABVM aggregiert und für die Umlegungsberechnung den Zonen zugeordnet, damit sie auch für die aggregierte Umlegung verwendet werden kann. Die Unterschiede der Nachfrageberechnungen wurden schon in den obigen Kapiteln besprochen und durch diesen Aggregationsschritt ebenfalls ausgeschlossen. Es wurde die Nachfrage des ABVM verwendet, weil in diesem Schritt einfach die zeitliche Komponente weggelassen werden kann. Möglich wäre auch die Verwendung der Nachfrage des GVM, in dieser sind jedoch die zeitlichen Angaben der Wege nicht abgebildet.
- Der Aussenverkehr wurde entfernt, weil der Aussenverkehr im ABVM Basel grundsätzlich unterschiedlich ins Modell integriert ist im Vergleich zum GVM Region Basel. Im ABVM Basel basiert der Aussenverkehr auf der Nachfrage des NPVM des ARE und wird weiträumig um das Modellgebiet berücksichtigt und flächendeckend abgebildet. Dies erfolgt im Gegensatz zum GVM Region Basel welches den Aussenverkehr an der Modellgrenze einspeist. Diese deutlichen Unterschiede führten zu unterschiedlichen Belastungen des Aussenverkehrs im Modell. Diese wurden durch das Weglassen des Aussenverkehrs ebenfalls eliminiert. Dadurch nimmt die Gesamtverkehrsnachfrage ab, vor allem auf den höher klassifizierten Strassen. Der Vorteil ist jedoch ein besserer methodischer Vergleich. Es wird hingewiesen, dass dadurch deutlich weniger Belastung auf den Strecken entstehen, und die Stauereffekte reduziert werden; die Umlegung ist nahe an der Bestweg-Umlegung. Weitere Untersuchungen für die Umlegung und Simulation hinsichtlich Stauereffekte und Routenwahländerungen müssen in Folgeprojekten detailliert angegangen werden, und mit der Empirie für beide Ansätze verglichen werden.

Folgende Unterschiede konnten jedoch nicht eliminiert werden und führen deshalb immer noch zu unterschiedlichen Resultaten:

- Zeitliche Variation über den Tagesverlauf (Abb. 58)
- Technische Unterschiede des Fahrzeugmodells vs. der Umlegung

- Effekte der Anbindungen

Vorab wurde eine deskriptive Auswertung durchgeführt, um die Differenzen zwischen der Gleichgewichtsumlegung und der Simulation an sich und separiert zu analysieren, immer unter der Annahme, dass tatsächlich auch Unterschiede aufgrund der obigen Gründe entstehen können. Diese Auswertung beinhaltet noch keine Streckensperrung, sondern vergleicht ausschliesslich die Berechnungen mit vollständigem Verkehrsangebot, und zeigt dadurch die zu erwartende Grössenordnung der Variabilität, welche bei den Belastungswerten auftreten können. Tab. 16 zeigt die Unterschiede der Streckenbelastungen, klassifiziert nach der Grössenordnung der Belastung. Es ist ersichtlich, dass bei Strecken mit höheren Belastungen die Unterschiede geringer werden, was aufgrund der obigen Argumente zu erwarten war (Einfluss Anbindung). Aufgrund der Anbindung und der Grössenordnung (bis zu ca. 500 Fhz/Tag) können natürlich auch Strecken mit grösserer Belastung eine Abweichung erhalten. Zusätzlich spielen sicher die zeitliche Variation in der Simulation eine grosse Rolle, wie auch die Unterschiede aufgrund des Fahrzeugfolgmodells. Grundsätzlich sind die Resultate und Unterschiede so nachvollziehbar.

Der Vergleich mit der Literatur zeigt, dass verschiedene Untersuchungen gemacht wurden, bei welchen die MATSim Simulation (QSim) mit aggregierten Umlegungsergebnissen aus verschiedener Software verglichen wurde. Es fehlen hier jedoch die eindeutigen Vergleiche auch mit der Empirie. Es ist gemäss Literatur auch nicht klar, ob und welches statische Umlegungsverfahren eindeutig am besten ist, und wie dann der Vergleich mit der QSim aussieht und der empirischen Daten. (Fourie, 2010) sowie (Gao et al., 2010) vergleichen die Belastungswerte zwischen Emme/2 und MATSim; (Piatkowski & Maciejewski, 2013) vergleichen Visum mit MATSim. (Llorca & Moeckel, 2019) erfassen den Effekt der Nachfrageskalierung auf die MATSim Simulation. Zusammenfassend kann erwähnt werden, dass ein konsistenter Vergleich der verschiedenen Routenwahl Methoden mit der Empirie ausstehend ist. Für die allermeisten Anwendungen dürften die Unterschiede eine untergeordnete Rolle spielen, für die zukünftige Entwicklung wäre jedoch ein solcher Vergleich wichtig.

Tab. 16 Belastungsunterschiede zwischen der aggregierten Umlegungsmethodik und der Simulation, dargestellt durch die relative Anzahl Strecken, und aufgeteilt nach der durchschnittlichen Streckenbelastung.

Streckenbelastungen	Relative Abweichung			
Streckenbelastungen	<15%	<30%	<50%	<100%
200	47%	22%	17%	14%
500	57%	24%	12%	7%
1'000	75%	18%	4%	2%
2'000	91%	7%	1%	0%
4'000	93%	6%	0%	0%
10'000	96%	4%	0%	0%

Abb. 59 und Abb. 60 zeigen die Differenzdarstellungen der Gleichgewichtsumlegung sowie der Simulation als Differenz der „Streckenbelastungen mit Streckensperrung Birsigviadukt“ minus „Streckenbelastungen ohne Streckensperrung“. Es ergeben sich sehr ähnliche Routenwähländerungen:

- Ähnliches Gesamtbild
- Gross- wie auch kleinräumige Umfahrungen in beiden Modellansätzen
- Zu- respektive Abnahmen praktisch ausschliesslich mit demselben Vorzeichen
- Generell konsistente und nachvollziehbare Resultate

Abb. 61 zeigt die Unterschiede der Differenzplots und die dazugehörigen absoluten Abweichungen. Weil die Effekte der Anbindungen kleinräumig vorhanden sind wurde absolute

Abweichungen < 100 Fahrzeuge / Tag nicht mehr numerisch angezeigt, weil da die Einflüsse der Anbindungen deutlich überwiegen. Das Gesamtbild ist ähnlich zu den einzelnen Differenzdarstellungen, es sind keine grundsätzlichen Abweichungen zu erkennen. Es sind jedoch punktuell auf wenigen Strassenzügen gewisse Abweichungen zu erkennen; diese können auf die Anbindungen, auf die Methodik oder auf die Überlastungen in den Spitzenstunden (ABVM) zurückgeführt werden, oder auf kleinräumige Routenwahländerung aufgrund ähnlichen Wegzeiten. Es ist zusätzlich zu beachten, dass auch sehr kleinräumige Änderungen immer wieder während eines Umlegungsverfahrens zu deutlichen Wechselwirkungen speziell bei „parallelen“ Strecken und Ausweichrouten erfolgen, speziell auch wenn die Anbindungen geändert werden. Weitere technische Untersuchungen müssen wegen dem hohen Aufwand als nachfolgende Forschung weitergeführt werden. Die Resultate sind jedoch konsistent und begründbar.

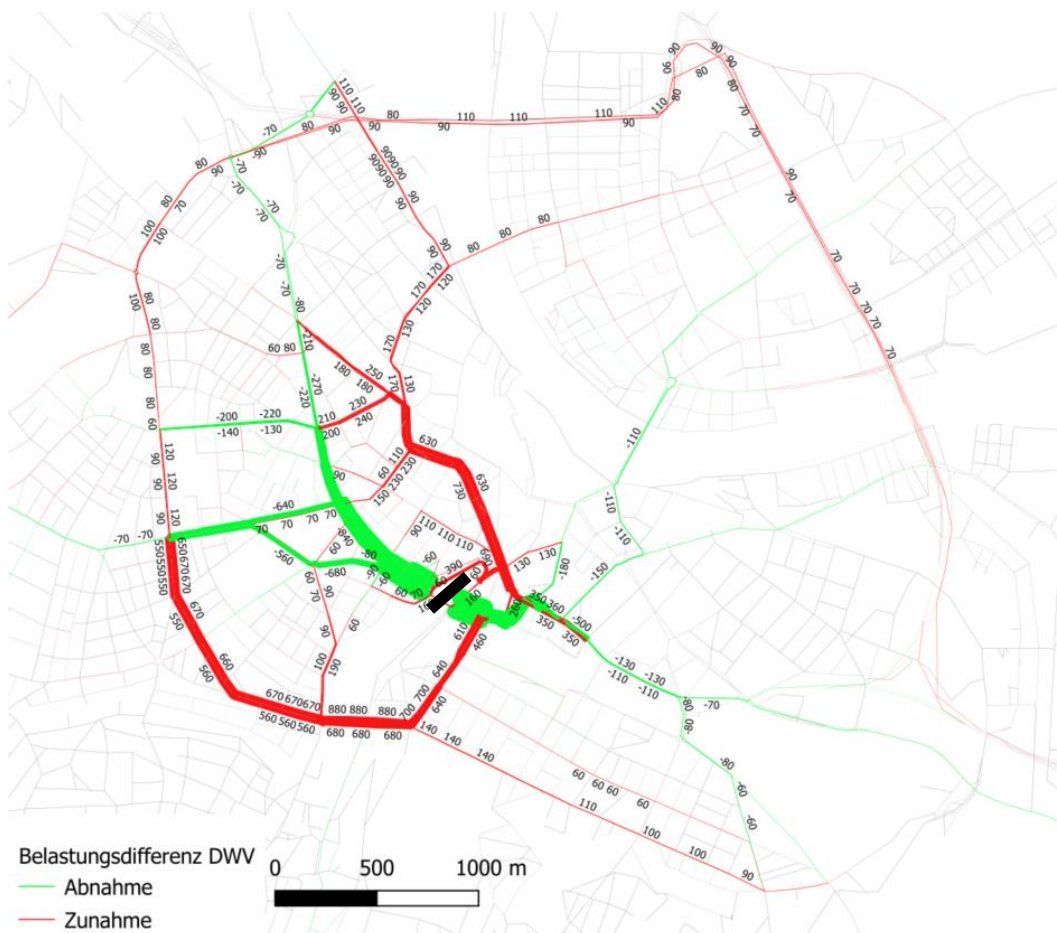


Abb. 59 Differenzdarstellung der Umlegung im GVM Region Basel mit angepasster Netzcodierung und Nachfrage: „Streckenbelastungen mit Streckensperrung Birsigviadukt“ minus „Streckenbelastungen ohne Streckensperrung“.

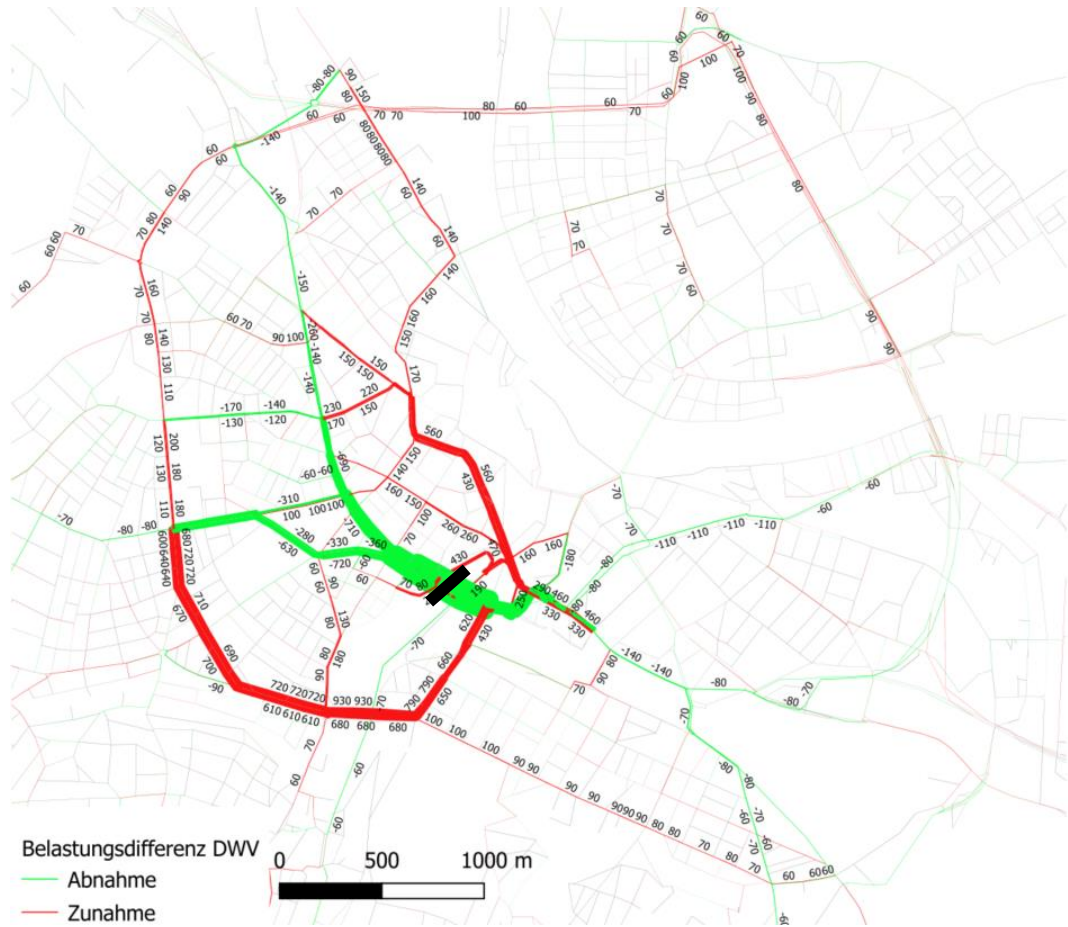


Abb. 60 Differenzdarstellung anhand der MATSim Simulationsergebnisse mit angepasster Netzcodierung und Nachfrage: „Streckenbelastungen mit Streckensperrung Birsigviadukt“ minus „Streckenbelastungen ohne Streckensperrung“.

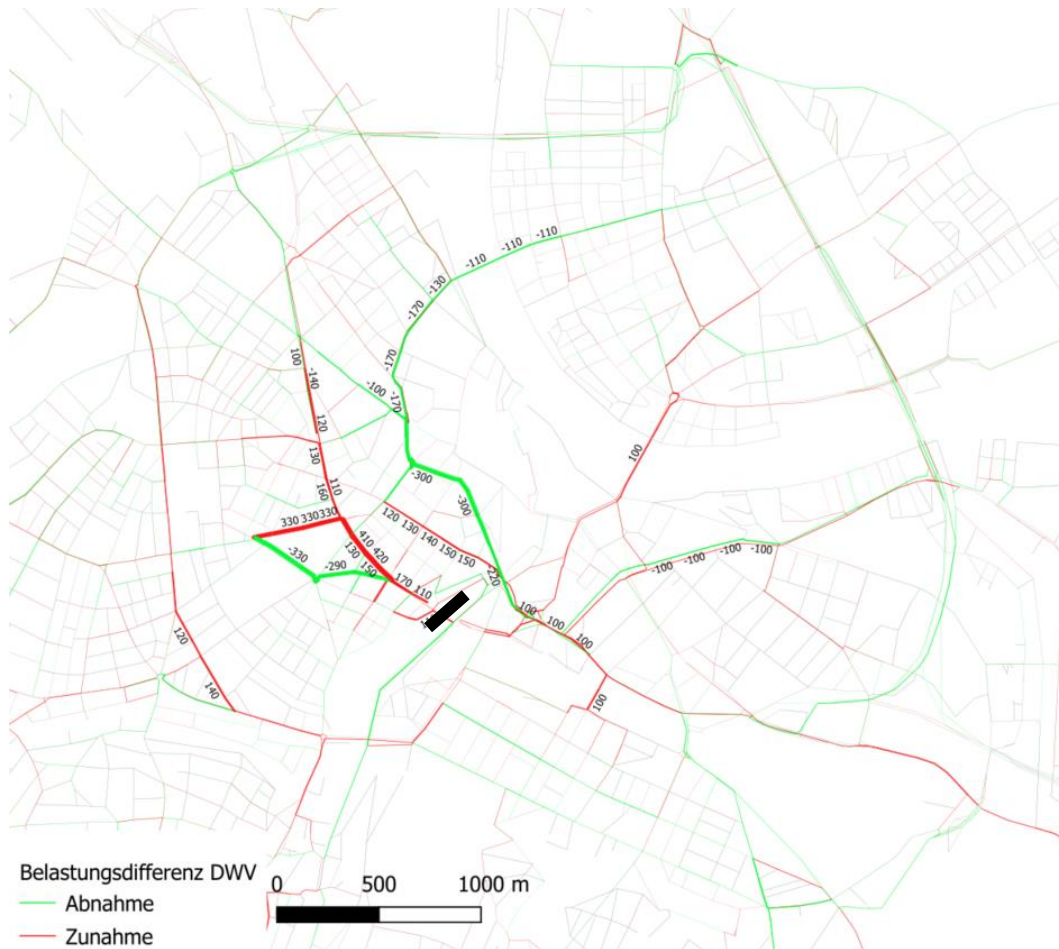


Abb. 61 Unterschiede zwischen den Differenzdarstellungen (Szenario „Streckensperrung“ minus Szenario „Ausgangszustand“) der aggregierten Umlegung und der ABVM Simulation (MATSim), gefilterte Beschriftung mit <100 Fz/Tag um lokale Anbindungseffekte möglichst zu eliminieren.

Tab. 17 zeigt die Aufwände für die Implementierung und die Rechenzeiten. Der Implementierungsaufwand ist in beiden Modellen sehr kurz, die Rechenzeiten sind beim ABVM deutlich länger, weil der ganze Tag simuliert wird. Die Rechenzeit verkürzt sich etwas wenn nur die Routenwahl gerechnet wird, statt zusätzlich noch die Verkehrsmittelwahl und die Wahl der Abfahrtszeit, diese Verkürzung wurde hier jedoch nicht berücksichtigt, um die Parameter nicht zu verändern.

Tab. 17 Aufwand und Rechenzeit zur Berechnung der Streckensperrung Birsig Viadukt (ohne Anpassungen Angebot und Nachfrage wie in den obigen Simulationen und Umlegungen).

	GVM Region Basel	ABVM Basel
Aufwand	5 min	5 min
Rechenzeit	2.5 h	20.5 h

6.6.2 Taktverdichtung OeV (Linie 64 Arlesheim – Bachgraben)

Ziel

Das Ziel dieser Untersuchung ist die Auswertung der Routenwahlergebnisse im OeV und der Vergleich zwischen den Ansätzen im ABVM Basel und im GVM Region Basel.

- Übereinstimmung der Zu- und Abnahme
- Räumliche Ausdehnung der Effekte
- Punktuelle Überprüfung der Belastungsunterschiede

Aufgrund des hohen Bearbeitungsaufwandes der ausführlichen Analyse und der grundsätzlich unterschiedlichen Methodik wird hier auf die detaillierte technische Auswertung verzichtet; detaillierte Literatur wird genannt welche die Verfahren genauer beschreiben und auch evaluieren.

Methodik und Hintergrundinformation

- Taktverdoppelung auf der Linie 64 (siehe Abb. für den Linienverlauf)
 - Bestehender Takt während dem Tag (Nebenzeiten) 15min, mit Verdichtung zur Morgen- Mittag- und Abendspitze
- Umlegung (GVM) resp. Simulation der OeV-Nachfrage
- Erstellung von Differenzdarstellungen

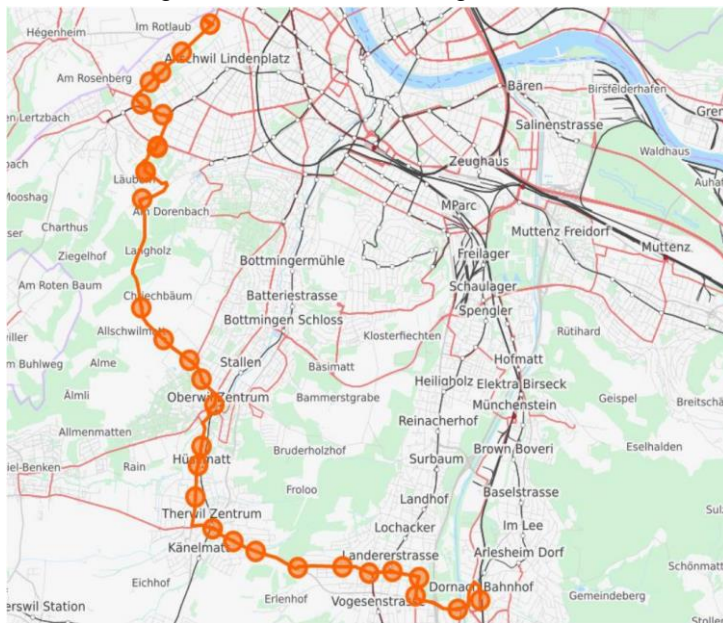


Abb. 62 Die Linie 64 verkehrt von Dornach Richtung Basel Bachgraben.

Aufgrund der grundsätzlichen Unterschiede zwischen dem GVM Region Basel und dem ABVM Basel sind auch hier in diesem Realitätstest unterschiedliche Resultate zu erwarten. Folgende methodischen Unterschiede werden sich am stärksten auf die Resultate und mögliche Differenzen auswirken:

- Anbindungen im GVM Region Basel speisen die Nachfrage punktuell pro Zone in das Modell ein, im OeV zuerst auf das Fussgängernetz, und dann über die Fusswege und die Haltestellen auf das OeV Netz. Dies erfolgt im Gegensatz zum ABVM in welchem die Aktivitätenketten den Gebäuden zugeordnet werden (siehe auch Abb. 36), und in der jetzigen Ausführung über die euklidische Distanz der nächsten Haltestelle zugeordnet werden. Es sind darum mindestens auf gewissen Streckenabschnitten Abweichungen zu erwarten. Beispielsweise beträgt die Nachfrage in gewissen Zonen bis zu 500 Fahrzeuge / Tag, entsprechend sind je nach Anbindung in diesen Zonen grössere Abweichungen zu erwarten.
- Die Nachfrage ist grundsätzlich unterschiedlich berechnet, siehe Kapitel 6.2-6.4.

- Das Angebot ist ebenfalls unterschiedlich erstellt (Kapitel 5).
- Die Umlegungsmethodik des GVM Region Basel basiert auf dem Takt (Kapitel 6.4.2) ist grundsätzlich unterschiedlich im Vergleich zum eingesetzten Fahrplanmodell im ABVM Basel.
- Das GVM Region Basel routet die Fussgänger, welche von einer Zone zu einer OeV Haltestelle gehen oder von einer Haltestelle kommen über ein separates Fussgänger-netz. Dies erfolgt im Gegensatz zur aktuellen Umsetzung im ABVM Basel welches für die Routensuche von einem Gebäude zur nächsten Haltestelle die euklidische Distanz verwendet, in Kombination mit einem pauschalen Umweg-Faktor. Die unterschiedliche Methodik kann zu unterschiedlichen Belastungen führen
- Das ABVM wurde nicht auf die OeV Zählwerte und Querschnittswerte kalibriert.
- Die Verhaltensparameter beruhen auf unterschiedlichen Grundlagen.
- Der beobachtete Zeithorizont ist ebenfalls unterschiedlich; während beim GVM ein Durchschnitt verwendet wird, hat das ABVM eine kontinuierliche zeitliche Komponente, welche in der Simulation sekundengenau berücksichtigt wird (Abb. 58). Diese kontinuierliche zeitliche Komponente führt im ABVM zu unterschiedlichen Routen, weil der Fahrplan über den Tag ändert und je nach Tageszeit unterschiedliche Routen vorge-schlagen werden.

Diese Unterschiede müssen wiederum eingegrenzt werden, um die einzelnen Effekte separat auszuwerten, analog zur obigen Streckensperrung im MIV (Kapitel 6.6.1). Speziell die OeV Umlegung, ein taktbasiertes Verfahren, ist grundsätzlich unterschiedlich in der Methodik. Aufgrund des grossen Aufwandes wird hier auf die Literatur zu den einzelnen OeV Umlegungsmethoden verwiesen, ohne detaillierte Auswertung wie im MIV (Kapitel 6.6.1).

Das taktbasierte Verfahren des GVM Region Basel wurde in Kapitel 6.4.2 vorgestellt. An-zumerken ist, dass bei der Abbildung des neuen ÖV-Angebots neben der Verdoppelung der Anzahl ÖV Kurse über den ganzen Tag auch die fahrplanmässigen Umsteigezeiten an den Knoten Bus/Bahn angepasst wurden.

Das fahrplanfeine Verfahren, welches im ABVM Basel verwendet wurde, wurde von der SBB entwickelt und löste das frühere Verfahren ab. Das Verfahren wurde ausführlich ge-testet und von der SBB schon mehrfach angewendet (Kapitel 6.4.1). Speziell im Hinblick auf die Takterhöhung wird eine geringere Sensibilität innerhalb der Verkehrsmittelwahl er-wartet als beim GVM Region Basel, weil der Takt im nicht explizit im angewendeten MATSim-Modul verwendet wird, sondern nur indirekt über die Wartezeit bei der Abfahrt. Hier müsste das alternativ verfügbare DCM Modul für die Verkehrsmittelwahl verwendet werden, welches bei der Modellerstellung des ABVMs jedoch noch nicht etabliert war; die-ses erlaubt eine umfassendere Verkehrsmittelwahl unter Berücksichtigung des Taktes. Grundsätzlich wäre hier jedoch Forschungsarbeit notwendig, um die tatsächlichen Ein-flüsse der Wartezeit beim Fahrplan, und des Taktes zu quantifizieren. Dieser Bedarf be-steht für Fahrplanmodelle allgemein, also für Simulationen wie auch für aggregierte OeV Umlegungen.

Zusätzlich ist zu erwarten, dass die Modellierung und vor allem die Optimierung der ein-zelnen Anschlüsse im fahrplanfeinen Modell deutlich komplexer sind als im taktbasierten Modell. Dies ist ein klarer Vorteil des taktbasierten Ansatzes, welcher im GVM Region Ba-sel verwendet wird, weil dort die Anschlüsse weniger aufwändig zu koordinieren sind. Hier ist jedoch anzumerken, dass viele aggregierte Modelle (ausserhalb Basels) einen fahrplan-basierten Ansatz verwenden, bei welchem dieser Vorteil natürlich nicht bestehen bleibt. Tabelle 15 beschreibt die Aufwände der Taktanpassungen, jedoch ohne Optimierung der Anschlüsse, welche beim Fahrplanansatz (hier im ABVM angewendet) anfallen würden.

Abb. 63 sollte einen Eindruck geben welche Arbeiten noch gemacht werden müssten um die Umlegungsergebnisse im OeV, welche mit unterschiedlichen Methoden gerechnet wur-den, auch systematisch und wissenschaftlich vergleichen zu können. Wichtig ist auch der Vergleich mit der Empirie, welcher ebenfalls ausstehend ist. Die Argumente über die me-thodischen Unterschiede und Differenzen sind weiter oben im Fliesstext erfasst. In Abb. 63

ist ersichtlich dass die Änderungen der Streckenbelastungen praktisch flächendeckend dasselbe Vorzeichen aufweisen. Es ist auch zu beachten dass aufgrund der Schwachbelastung der Linien bei kleinen absoluten Änderungen trotzdem relativ grosse prozentuale Änderungen entstehen können.

Auch der Vergleich zu anderen Studien ist schwierig. Zum Beispiel hat das NPVM (Transoptima et al., 2020) eine Nachfrageerhöhung von 20% bei einer Erhöhung der Bedienungshäufigkeit um etwa 50% ergeben, bei einer Annahme der Linearität wäre bei einer Taktverdoppelung etwa 40% Nachfragesteigerung. Dies erfolge jedoch pauschal und kann auch nicht direkt mit dem Bearbeitungsstand, wie er in Abb. 63 gezeigt wird, verglichen werden. (Scherr & Bützberger, 2016) berechneten einen Nachfragezuwachs von 11% - 28% für eine entsprechende Taktverdoppelung wie in diesem Szenario, in Abhängigkeit der Reisezeit. Je nach lokalen Gegebenheiten können Abweichungen entstehen.

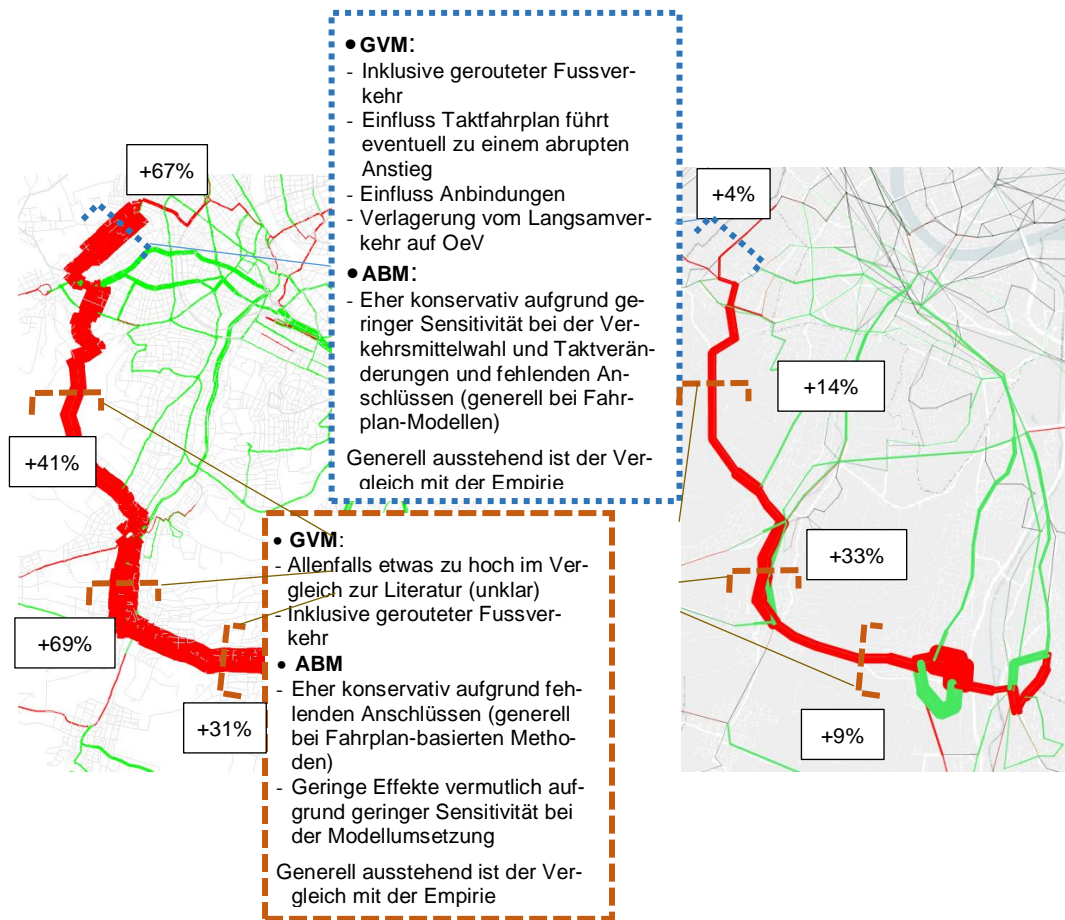


Abb. 63 Bearbeitungsstand hinsichtlich der Modell-Unterschiede zwischen dem GVM Region Basel und dem ABVM Basel im Szenario Taktverdichtung, für einzelne Querschnitte.

Tab. 18 Aufwand und Rechenzeit zur Berechnung der Taktverdichtung Linie 64.

	GVM Region Basel	ABVM Basel
Aufwand	5 min	30 min
Rechenzeit	5.5 h (Volldurchlauf)	20.5 h

6.7 Szenarienvergleich

6.7.1 Szenario 1: Änderung der Flächennutzung

Ziel

Die Ziele dieses Szenarios sind die Anpassungen der Inputdaten für die Nachfragemodellierung, wie sie für Flächennutzungsanalysen durchgeführt werden kann, sowie die Auswertungen der Resultate. Dabei werden die Einwohner und Arbeitsplätze punktuell verändert, und somit die Datengrundlagen der Nachfragemodelle angepasst. Dabei stehen die technischen Modellauswirkungen im Vordergrund, und nicht die Änderung der Datengrundlage an sich.

Dieses Szenario dient zur Visualisierung der Zielwahl sowie die Verteilung der neuen Wege im Modellperimeter. Aufgrund der unterschiedlichen Methoden ist keine absolute Übereinstimmung zu erwarten. Es wird eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt wie auch ein visueller Vergleich.

Datengrundlagen und Methodik

Die Veränderung der Datengrundlagen erfolgt sehr punktuell, um die räumlichen Überlagerungen der Auswirkungen zu minimieren. Es werden deshalb in einer Hektare in Therwil die Bevölkerung um +5'300 erhöht (fiktive Annahme). Die soziodemographische Ausprägung dieser neuen Einwohner ist dabei analog zur Ausprägung der gesamten Gemeinde Therwil, das heisst mit derselben Altersverteilung etc. Zusätzlich werden im Areal Dreispitz in ebenfalls einer definierten Hektare die Grundlagedaten angepasst. Es werden 2'500 Arbeitsplätze geschaffen, und die Einkaufs- und Freizeitaktivitäten erhöht. Beim Einkauf werden 100 neue Arbeitsplätze angenommen sowie 5'305 EKF m². Im Freizeitbereich werden ebenfalls 100 neue Arbeitsplätze geschaffen, welche als wichtige Grösse für das Anziehungspotential innerhalb der Zielwahl dienen. In Abb. 64 ist die geographische Verortung der beiden betroffenen Hektaren visualisiert.



Abb. 64 Geographische Verortung der Hektare in Therwil (Bevölkerungswachstum) sowie Dreispitz (Entwicklung Arbeitsplätze, Einkauf- und Freizeitpotentiale).

Im GVM Region Basel werden innerhalb der technischen Umsetzung die Einwohner und Arbeitsplätze erhöht, separat für die einzelnen Kategorien. Danach erfolgen die Berechnungen der Erzeugung und der Zielwahl analog zur oben beschriebenen Methodik (Kapitel 6.3). Im ABVM erfolgt die Anpassung der synthetischen Population aufgrund der Bevölkerungszunahme in der Hektare in Therwil. Die Arbeitsplätze in Dreispitz sowie die Freizeit- und Shopping-Potentiale werden ebenfalls erhöht. Danach erfolgen die Berechnung der primären Zielwahl, die Zuordnung der Wegeketten sowie die Berechnung der sekundären Zielwahl.

Resultate

Die Resultate der Zielwahlberechnung für die neuen Einwohner in Therwil werden in Abb. 65 dargestellt, jeweils oben für das GVM Region Basel und unten für das ABVM Basel. In der Abb. 65 werden die Verteilungen dargestellt, mit welchen die Einwohner der neu entwickelten Hektare den Zielzonen zugeordnet werden, und zwar in den absoluten Mengen für alle Pendlerbeziehungen. Es ist ersichtlich, dass dem Stadtzentrum Basel ein wesentlicher Teil aufgrund der vielen Arbeitsplätze im Zentrum zugeordnet wird. Zudem sind noch weitere Cluster ersichtlich, zum Beispiel das nahegelegene Therwil Zentrum, und Reinach im Osten von Therwil. Die Cluster sind in beiden Modellen ähnlich ausgeprägt und räumlich verortet. Die Distanzverteilung dieser Pendler-Nachfrage ist in Abb. 66 zu sehen. Die Distanzverteilungen beider Modelle haben ausgeprägte Peaks in der Nähe (Zentrum Therwil), sowie einen zweiten Peak bei der Stadt Basel (6-8km). Dieser ist im GVM Region Basel etwas ausgeprägter als im ABVM Basel, jedoch sonst ähnlich.

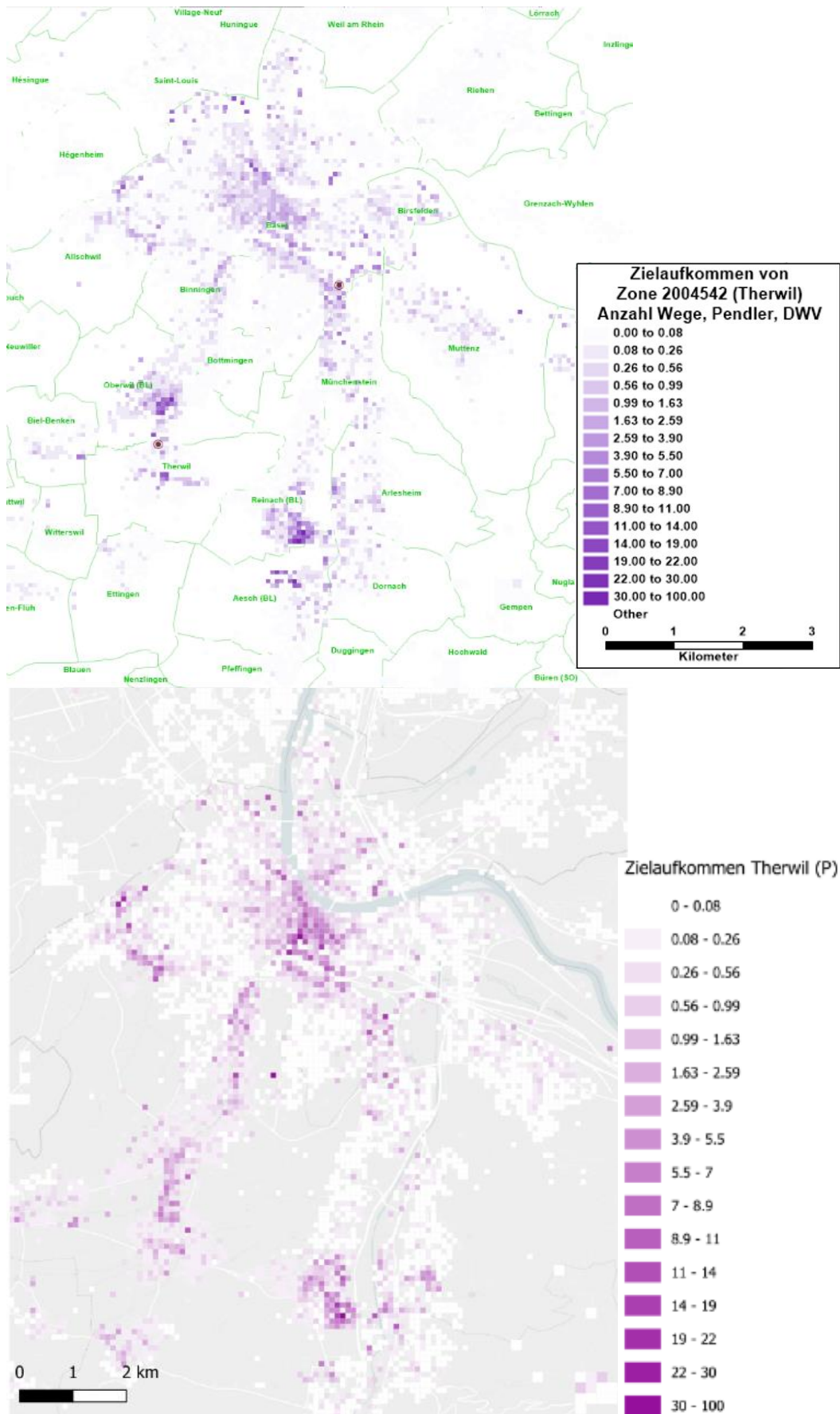


Abb. 65 Verteilung der Ziele anhand der berechneten Wahrscheinlichkeiten, oben für das GVM Region Basel und unten für das ABVM Basel.

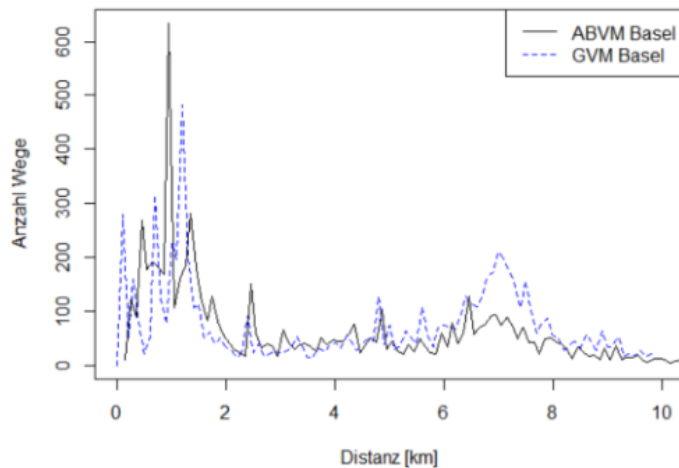


Abb. 66 Distanzverteilung für die Ziele (Pendler), ausgehend von der neu entwickelten Zone in Therwil als Startpunkt der Wege.

Die Resultate des Zielverkehrs, welcher nach Dreispitz in das Entwicklungsgebiet führt (Gesamtverkehrs) sind in Abb. 67 dargestellt, jeweils für das GVM Region Basel und das ABVM Basel. Es zeigt sich, dass die Verteilung flächig erfolgt, wobei wir beim GVM Region Basel eine kontinuierliche Verteilung über das gesamte benachbarte Siedlungsgebiet vorfinden. Im ABVM Basel haben wir eine diskrete Verteilung der Agenten, welche punktuell erfolgt. Darum finden sich gewisse Hektaren, welche keine Agenten mit Ziel Dreispitz aufweisen. Im Vergleich zur primären Zielwahl wird im ABVM die sekundäre Zielwahl nicht anhand der Wahrscheinlichkeiten berechnet, sondern über die Wegeketten und die Zuordnung der Distanzen über deren Ausprägung, mit dem Mikrozensus als Datengrundlage. Die Zuweisung geschieht dann direkt unter Berücksichtigung der Potentiale und der Grenzwiderstände (siehe Kapitel 6.3.2). Aufgrund dieser diskreten Zuordnung sind auch die Quellen der neuen Potentiale im Dreispitz Areal diskret für jeden Agenten verortet. Abb. 67 (unten) zeigt die Summe der diskreten Agenten in den Quell-Zonen. Zusätzlich werden in Abb. 67 in einer Kernel-Density Darstellung die Dichteverteilung kontinuierlich über den Raum dargestellt. Es zeigt sich, dass die Quellen bei beiden Modellen flächig verteilt sind. Abb. 68 zeigt zur besseren Vergleichbarkeit der räumlichen Verteilung die Aggregation der Quellen in die Gebiete der Region Basel, jeweils wiederum ausschliesslich für den Zielverkehr welcher nach Dreispitz führt. Es zeigt sich eine sehr ähnliche Verteilung mit einer starken Häufung in den Gebieten in der Nähe und eine deutliche Abnahme für Gebiete weiter entfernt, jedoch keine vollständige Abnahme, was plausibel ist.

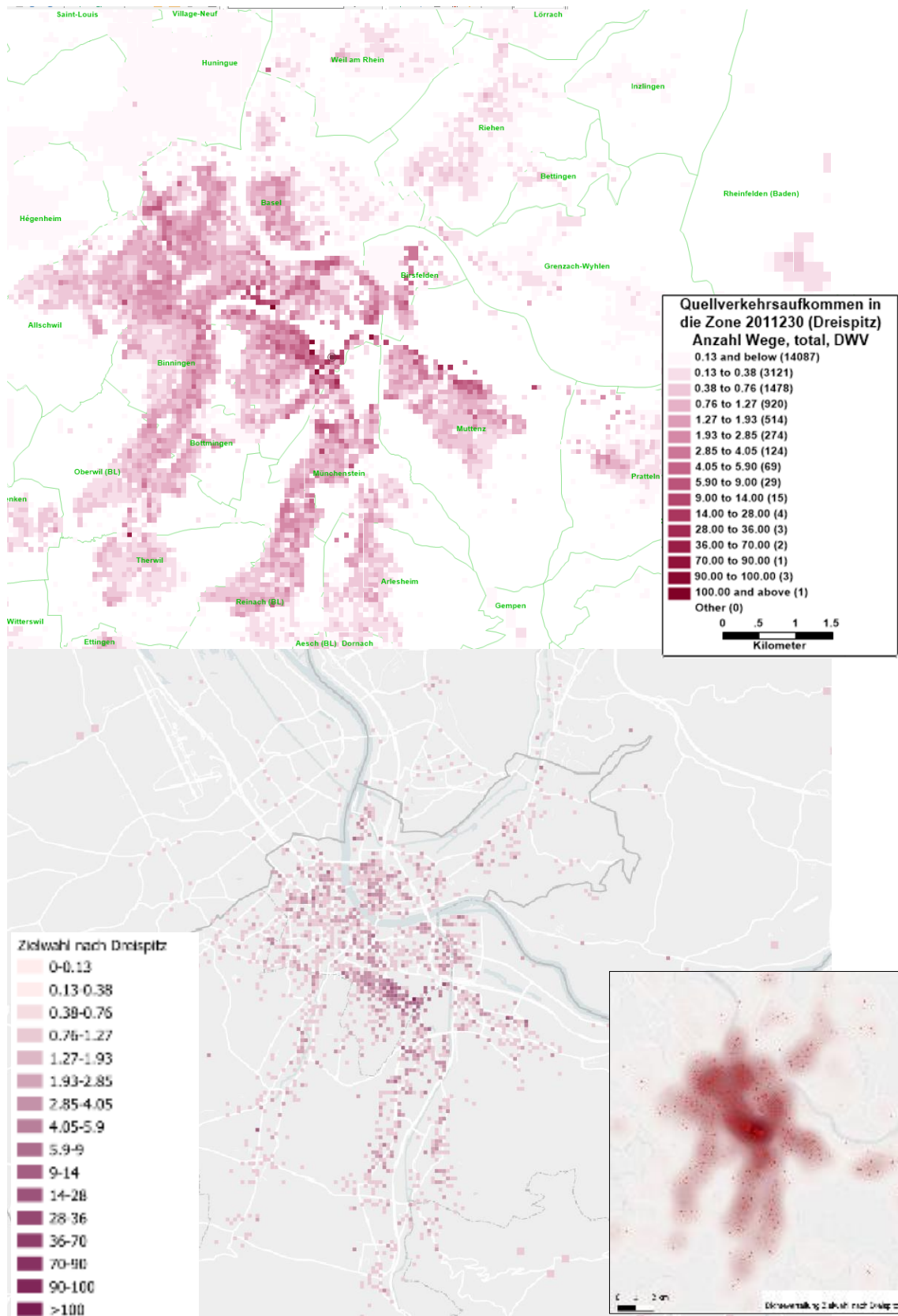


Abb. 67 Verteilung der Wege basierend auf der kontinuierlichen Nachfrage für das GVM Region Basel (oben) sowie für die diskreten Agenten und Wegeketten des ABVM (unten), mit kontinuierlichen Kernel-Density Dichteverteilung (unten rechts); alles ausgehend von der entwickelten Hektare im Dreispitz Areal.

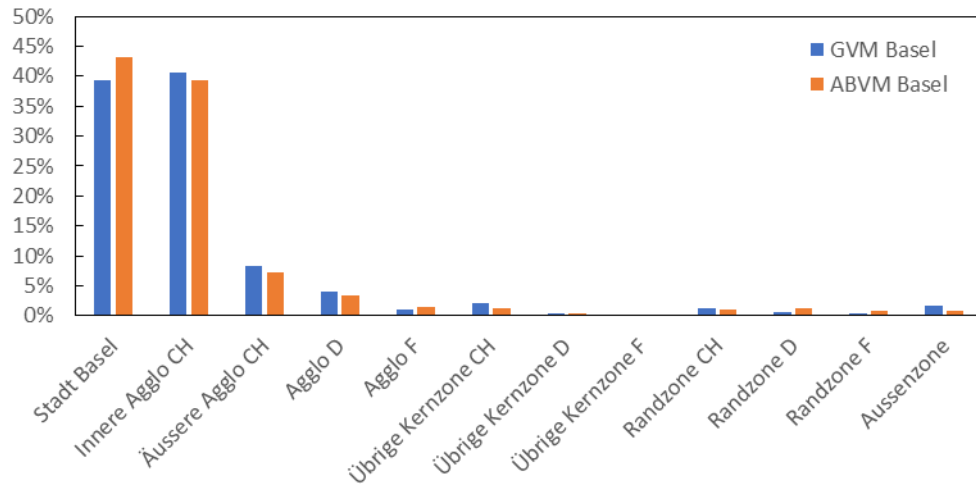


Abb. 68 Aggregation des Quellverkehrs anteilmässig in die Gebietsunterteilung der Region Basel.

Erkenntnisse

Beide Modellansätze zeigen eine flächige Verteilung der Ziel- resp. Quellzonen der Wege, einerseits ausgehend von der Quellzone Therwil, wie auch ausgehend von der Zielzone im Dreispitz Areal. Der grundsätzlich unterschiedliche Ansatz der sekundären Zielwahl erzielt ebenfalls eine flächige Verteilung über das angrenzende Modellgebiet.

Der Aufwand zur Modellierung der Zielwahl ist für beide Modellansätze ähnlich gering. Die Anpassungen in den Grundlagen benötigen sehr wenig Aufwand. Die reinen Rechenzeiten sind beim ABVM deutlich länger.

6.7.2 Szenario 2: Einführung einer Kordonmaut

Ziel

Das Ziel dieses Szenarios ist die Untersuchung einer zeitabhängigen Kordonmaut, damit die Verkehrsmittelwahl sowie die Routenwahl und auch die zeitliche Abhängigkeit der Maut ausgewertet werden kann. Dabei werden speziell die Funktionalität und die Darstellung der gegenseitigen Abhängigkeiten untersucht. Die Bestimmung der Parameterwerte für die Verhaltensmodelle muss dann fallspezifisch separat untersucht werden und ist nicht Bestandteil dieses Projektes.

Datengrundlagen für die Maut-Implementierung

Für ein definiertes Gebiet der Stadt Basel (Kordon, siehe Abb. 69) wird eine Maut eingeführt für alle ins Gebiet einfahrenden MIV-Fahrten, im Zeitfenster zwischen 6.00 Uhr und 9.00 Uhr sowie 16.00 Uhr bis 19.00 Uhr. Die Zahlungsbereitschaft für die Maut beträgt 13.6 sFr./h (Vrtic et al., 2007), die Höhe der Maut beträgt 2.5 CHF bei jedem Eintritt, was bezüglich der generalisierten Kosten also einer Verlängerung der Reisezeit um rund 11 Minuten gleich kommt.

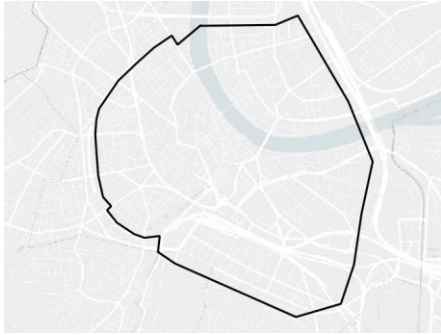


Abb. 69 Definiertes Maut-Gebiet (fiktiv).

Methodik GVM Region Basel

Die Kordon-Maut hat Einfluss auf die Ziel- und Verkehrsmittelwahl und auf die Routenwahl. Eine weitere wichtige Reaktion der Verkehrsteilnehmer ist die Änderung der Abfahrts- und Ankunftszeit eines Weges. Langfristig wirkt eine Maut auch auf die Wohnstandortwahl und die Standortwahl von Unternehmungen, dieser Effekt wird hier aber ausser Acht gelassen.

Aus Aufwandsgründen wird an dieser Stelle nur das Vorgehen einer Modellierung mit dem GVM Region Basel vorgestellt, die eigentliche Berechnung von Verkehrsbelastungen und weiteren Modellresultaten erfolgt jedoch nicht innerhalb des GVM Region Basel. Um die Wirkungen der Kordon-Maut abzubilden, müssen im Basismodell GVM Region Basel in folgenden Teilmodellen Anpassungen/Erweiterungen vorgenommen werden:

1. Aufbau Entscheidungsmodell für Wahl der Abfahrts- und Ankunftszeit.

Dazu werden die stundenfeinen Fahrtmatrizen, analog zu den Spitzenstundenmatrizen, über die im Mikrozensus Verkehr berichteten, Abfahrts- und Ankunftszeiten pro Fahrtzweck, Modus und Stunde generiert (24 Stunden mal 12 Wegzwecke mal 4 Modi). Anschliessend werden diese Stundenmatrizen auf das Verkehrsnetz umgelegt. Dabei werden die Umlegungsparameter (Kapazitäten, CR-Parameter, etc.) des Spitzenstundenmodells verwendet. Die stundenfeinen Belastungen aus den Umlegungen müssen dann noch mit vorhandenen Zählraten validiert resp. kalibriert werden.

2. Erstellung der Nutzenfunktionen:

Die stundenfeinen Nutzenfunktionen werden gebraucht um die Nutzendifferenzen im Ist- und im Planfall zwischen den einzelnen Stunden auszuweisen und damit in der Folge die Verschiebung der Abfahrtszeit als Reaktion auf das veränderte Verkehrsangebot einschliesslich Maut-Komponente in den vorgesehenen Stunden zu quantifizieren (z.B. mit einem Pivot-Point-Ansatz). In den Nutzenfunktionen können unterschiedliche Zahlungsbereitschaften nach Fahrtzweck (z. B. für Maut, Treibstoffkosten, etc.) verwendet werden, falls diese erhoben wurden.

Für die Berechnung der Verschiebung der Abfahrtszeiten können in den (stundenfeinen) Nutzenfunktionen folgende Komponenten berücksichtigt werden, z.B. beim MIV:

- Fahrzeiten im belasteten Netz
- Kosten (Treibstoff, Parkplatz, Maut, etc.)
- Verschiebungswiderstand

Mit dem Verschiebungswiderstand kann die benutzerspezifische Präferenz/Vorliebe, in einer bestimmten Stunde die Reise anzutreten, abgebildet werden. Empirische Grundlagen zur Grössenordnung der Wahrnehmung dieses Widerstandes sind uns für die Schweiz

nicht bekannt. Hier müssten Annahmen getroffen werden, wie das z.B. in der ASTRA-Studie Mobility Pricing – Wirkungsanalyse am Beispiel der Region Zug gemacht wurde (Infras et al., 2019).

3. Berechnung der Verkehrsnachfrage für den DWV

Unter der Annahme, dass durch die Maut insgesamt über alle Modi gleich viele Wege unternommen werden, muss die Verkehrserzeugung im GVM Region Basel nicht angepasst werden. Als Input für die Ziel- und Verkehrsmittelwahl (DWV-Modell) müssen die aus den Einzelstunden ermittelten Kenngrössen nachfragegewichtet zu Tageswerten (24 Stunden) aggregiert werden. Anschliessend können diese Kenngrössenmatrizen im GVM Region Basel für die Berechnung der Ziel- und Verkehrsmittelwahl weiterverwendet werden.

Bei der Umlegung der MIV-Matrix kann in TransCAD die Maut linkbezogen oder OD-bezogen direkt eingebaut werden und so die Wirkung der Maut auf die Routenwahl berücksichtigt werden.

Im GVM Region Basel ist der Aufwand für die Modellierung einer Mautmassnahme im GVM Region Basel grösser als bei anderen Anwendungen. Es müssen auch für den DWV alle 24 Stundenmatrizen einzeln sowohl für die Nachfrage als auch für die Kenngrössen berechnet werden und ein Teilmodell "Wahl der Abfahrtszeit" dem Modelldurchlauf vorgelagert werden.

Im GVM Region Basel können Anpassungen bei den unternommenen Wegeketten (Anpassungen in den Wege-Zwecken) infolge einer Maut nicht direkt massnahmensensitiv ausgewiesen werden.

Um das Verhalten der Verkehrsteilnehmer langfristig besser und genauer abschätzen zu können, braucht es ausserdem neue Stated Preference Befragungen, welche die Wirkung einer Maut im Kontext anderer Kostenelemente bewertet (gilt auch für das ABVM Basel).

Methodik ABVM Basel

Das ABVM Basel wie auch die dazugehörige Nutzenfunktion umfassen in der verwendeten MATSim Simulation die Routen- und Verkehrsmittelwahl, sowie die Wahl der Abfahrtszeit, welche alle simultan optimiert werden. Hier braucht es also für die Modellierung einer Maut keine Vorbereitung für die methodische Umsetzung in der Simulation. Die Nutzenfunktion wie in Kapitel 6.4.2 beschrieben ist auch für die MAUT anwendbar und wird in der Berechnung des Nutzens einzig um den (negativen) Nutzenterm der Maut ergänzt. Die technische Umsetzung geschieht im Fall einer Kordonmaut durch die Erfassung der bemauteeten Strecken (ID), wie auch die Angabe über die Höhe und zeitliche Abhängigkeit der Mautgebühr. Mit dem Road-Pricing Modul, welches standardmässig bei MATSim zur Verfügung steht, werden dann die Nutzenfunktion erweitert wie auch die Maut-Simulation ergänzt. Es können dann innerhalb der Simulation die Routen- und Verkehrsmittelwahl (6.4.2) wie auch die Wahl der Abfahrtszeit (6.4.1) unter Einfluss der Maut neu berechnet werden, es sei denn sie werden bewusst inaktiviert.

Falls die Zielwahl ebenfalls neu gerechnet werden soll, kann analog zum vorherigen Beispiel die Nutzenfunktion im Zielwahlmodell angepasst werden. Dies geschieht ausserhalb der Simulation und im Rahmen der Nachfragemodellierung (grossen Schlaufe); allenfalls müssen bei deutlichen Zielwahl-Änderungen die Simulation und die Zielwahl iterativ mehrmals sequentiell hintereinander gerechnet werden.

Resultate ABVM Basel

Die Berücksichtigung der Mautkosten erfolgt aufgrund der ganzheitlichen Tagespläne innerhalb der Simulation. Das heisst falls der Hinweg, jedoch nicht auch der Rückweg über eine bemauteete Strecke führt, wird doch der gesamte Tagesplan negativer gewertet als wenn keine bemauteete Strecke befahren wird. Die Wegeketten werden also gesamtheitlich bewertet, und allenfalls nochmals optimiert, falls die Bewertung negativer ausfällt als die

alternativ möglichen Wegeketten, z.B. mit einem alternativen Verkehrsmittel oder einer alternativen Tageszeit.

Die Resultate der Streckenbelastungen sind in Abb. 70 dargestellt, jeweils mit Neuberechnungen der Routenwahl, Wahl der Abfahrtszeit, und Verkehrsmittelwahl. In Abb. 71 ist die Verkehrsmittelwahl dann explizit nicht mehr berücksichtigt. Es ist in beiden Abbildungen ersichtlich, dass die Maut die MIV Streckenbelastung innerhalb des Maut-Gebietes deutlich reduziert. Ausserhalb des Modellgebietes wird die MIV Streckenbelastung im Fall der Berücksichtigung der Verkehrsmittelwahl ebenfalls reduziert, mit Ausnahme gewisser Streckenabschnitte welche für Umfahrungen wirksam sind. Es ist zu erkennen, dass die Abnahme der MIV Belastungen grösser sind als die Zunahme dieser Umfahrungen, was so zu erwarten war. Zusätzlich werden in Abb. 70 und Abb. 71 noch exemplarisch ein Querschnitt und die Ganglinie dieses Querschnitts dargestellt, jeweils mit Referenzszenario und Maut-Szenario. Es ist ersichtlich, dass die Maut die Spitzenstundenbelastungen reduziert, was aufgrund der zeitlichen Einschränkung auch so vorgesehen war. Es findet ebenfalls eine zeitliche Verschiebung statt, und die Belastungen ausserhalb der bemauteuten Tageszeiten leicht zu.

Abb. 70 zeigt die Belastungswerte ohne Berücksichtigung der Verkehrsmittelwahl. In dieser Modellrechnung resultieren höhere Umfahrbelastungen rund um die Kordongrenze. Abb. 72 zeigt die Verkehrsleistung innerhalb des Modellperimeters, links für alle Personengruppen, und rechts für diejenigen Personengruppen welche einen PW verfügbar haben, jedoch kein ÖV Abo. Es zeigt sich das hauptsächlich diese Personengruppe betroffen ist welche einen grossen Anteil an der Verkehrsleistung aufweist.

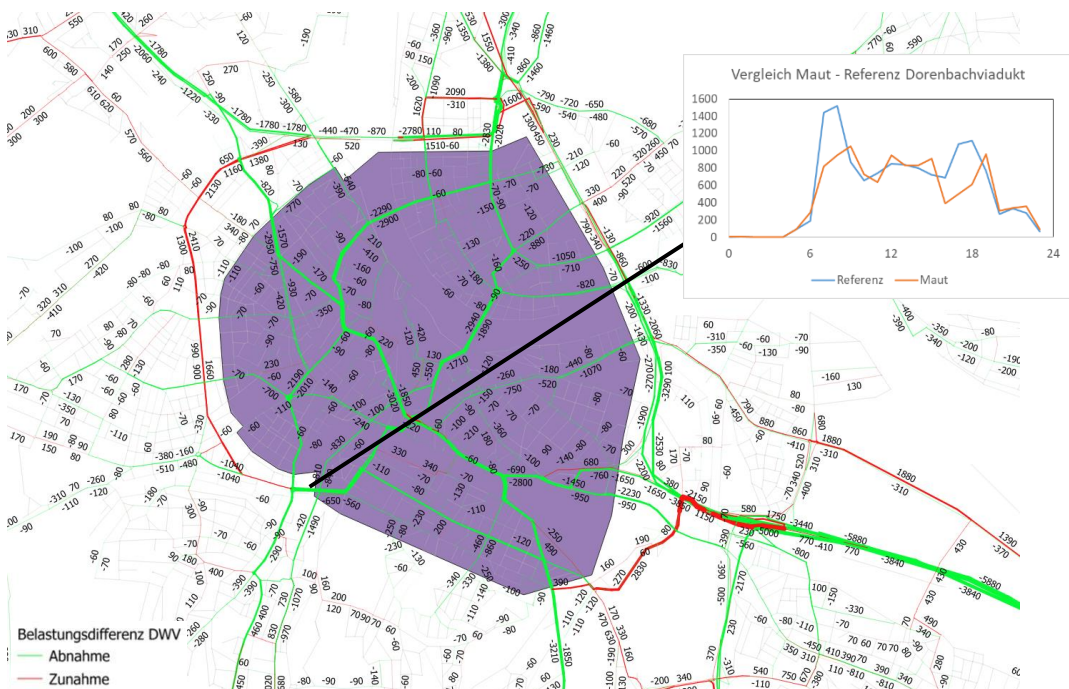


Abb. 70 Belastungsdifferenzen „Streckenbelastungen mit MAUT“ minus „Streckenbelastungen ohne Maut“ inklusive Verkehrsmittelwahl

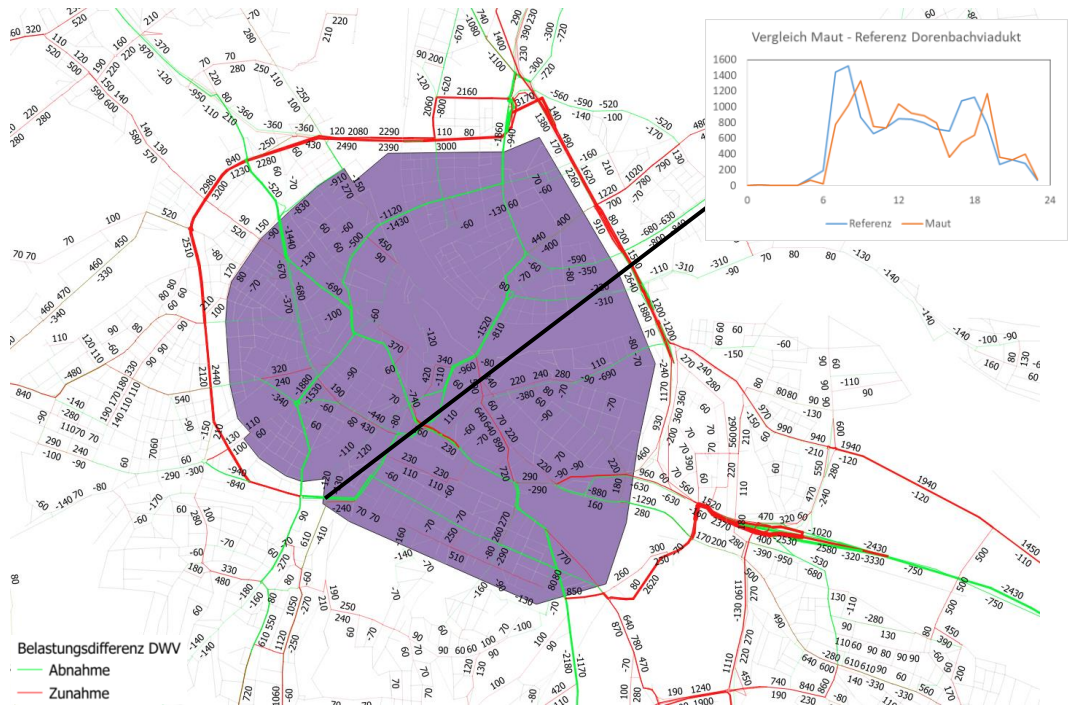


Abb. 71 Belastungsdifferenzen „Streckenbelastungen mit MAUT“ minus „Streckenbelastungen ohne Maut“ ohne Verkehrsmittelwahl

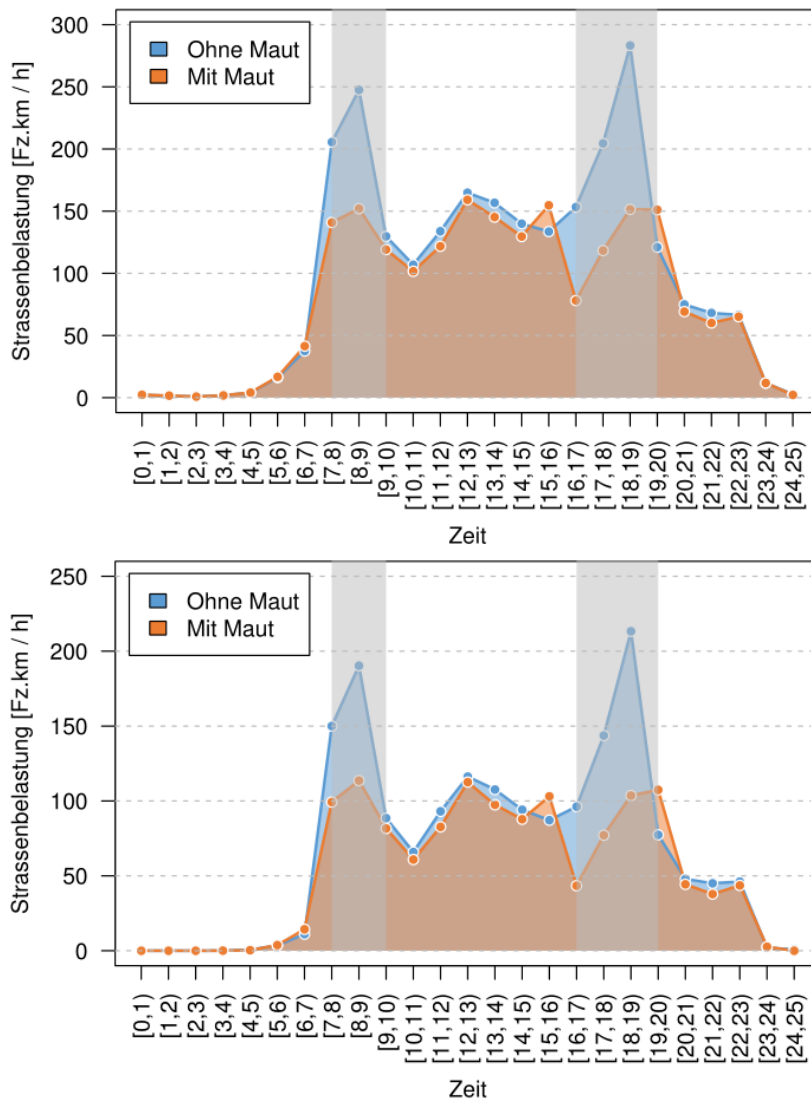


Abb. 72 Verkehrsleistung, für die gesamte Nachfrage (oben) sowie für die Subpopulation welche ein PkV als Mobilitätswerkzeug zur Verfügung hat (unten).

Erkenntnisse

Die technische Umsetzung einer Kordonmaut in der MATSim Simulation beziehungsweise in der Nutzenfunktion erfolgt sehr einfach und mit geringem Aufwand. Der Vorteil ist insbesondere die Berücksichtigung der zeitlichen Variation der Abfahrtszeiten. Dabei werden die Abweichungen berechnet im Vergleich zu den zugeordneten Abfahrtszeiten, welche vorgängig innerhalb des ABM erfolgte (Basis MZMV). Diese Abweichung erfolgt kontinuierlich unabhängig von Stundenscheiben, die Berechnungszeit sowie die Speicherplatz-Anforderungen sind ebenfalls nicht höher als bei einer regulären Simulation. Die Umsetzung dieses Szenarios kann deshalb mit einer MATSim Simulation einfacher erfolgen als mit einem aggregierten Modell.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Reaktionen des Modells in die richtige Richtung gehen und sich an den richtigen Orten bzw. zu den richtigen Zeiten abspielen, d.h. sie sind plausibel und erklärbar. Das Ausmass der Reaktionen ist aber unsicher und kann hier nicht überprüft werden.

Die obigen Beispiele zeigen die technischen Umsetzungen in den beiden Modellansätzen. Unabhängig davon müssen Parameterwerte und VTTS Werte weiter untersucht werden und den lokalen Gegebenheiten angepasst werden, wie auch die Bereitschaft den Zeit-

punkt einzelner Aktivitäten zeitlich anzupassen. In beiden Modellen werden keine stundenfeine Zielwahlmodelle umgesetzt, diese müsste ebenfalls separat untersucht werden, falls erforderlich.

6.7.3 Szenario 3: Methodisches Vorgehen des Homeoffice Einflusses

Das Ziel dieses Szenarios ist die Darstellung der Auswirkungen des Homeoffice auf die Verkehrsnachfrage und die Verkehrsbelastung. Insbesondere interessieren das methodische Vorgehen und die Auswirkungen bezüglich der Wegeketten.

Datengrundlage

Für die modelltechnische Umsetzung muss entschieden werden ob ein Homeoffice Szenario mit Verordnung (Pandemiefall) abgebildet werden soll, oder ein Szenario ohne Verordnung. Je nachdem fallen dann die Verhaltensmodelle unterschiedlich aus. Insbesondere das Szenario mit dem verordneten Homeoffice wiedergibt zusätzlich ein eingeschränktes Verhalten innerhalb der gesamten Wegekette. Im Falle des Homeoffice ohne Verordnung kann eine Mobilitätszunahme ausserhalb der Pendlerwege vermutet werden, weil mehr Zeit für Wege für Freizeit, Einkaufen und Ausbildungszwecke zur Verfügung stehen (Annahme gleichbleibendes Zeit-Budget). Aus methodischer Sicht sollte die (hypothetische) Annahme getroffen, dass alle Arbeitsplätze ins Home-Office verschoben werden und keine Pendlerwege mehr bestehen, weil dann keine Überlagerung der Pendlerströme mit den sonstigen Wegen passiert; dies vereinfacht die Modellauswertung und Interpretation.

Methodik GVM Region Basel

Um die Wirkungen von Homeoffice abzuschätzen zu können, müssen in folgenden Teilmodellen Anpassungen/Erweiterungen vorgenommen werden:

1. Anpassungen im Erzeugungsmodell.

Mit Homeoffice fallen sämtliche Wege in der Quell-/Zielgruppe "Wohnen-Arbeiten" und "Arbeiten-Wohnen" weg. Im Erzeugungsmodell wird die Erzeugungsrate bei diesen Wegzwecken auf null gesetzt. Bei den Non-Home-Based Wegen dürfen weiter keine Wege von/zum Arbeitsplatz generiert werden. Dazu müssen im Erzeugungsmodell die Erzeugungsraten der Wege der QZ-Gruppen "AA", "AB", "AE", "AN" und "AF" sowie deren Rückwege den Erzeugungsraten der Wohnortgebundenen Wegen händisch hinzuaddiert werden. Damit verbunden ist die Annahme, dass die nicht wohnortsgebundenen Wege auch vom Wohnort aus in gleicher Häufigkeit unternommen werden.

2. Anpassungen im Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodell

Hier braucht es im GVM Region Basel keine Änderungen. Im Modelldurchlauf werden die oben neu den wohnortsgebundenen Wegen hinzuaddierten nichtwohortsgebundenen Wege auf die Ziele verteilt, die neu nicht mehr in der Nähe des Arbeitsplatzes liegen, sondern um den Wohnort. Neue Wegeketten aufgrund von Homeoffice können jedoch mit dem GVM Region Basel nicht direkt abgebildet werden.

Methodik ABVM Basel

1. Anpassungen im Erzeugungsmodell und bei den Wegeketten

Wie beim GVM entfallen auch beim ABVM die Wege „Wohnen-Arbeiten“. Die Aktivitäten werden jedoch trotzdem mit der entsprechenden Dauer durchgeführt, und zwar am Wohnort statt am regulären Arbeitsort. Dasselbe würde auch gelten, wenn die Ausbildungsaktivitäten zu Hause stattfinden. Nach der sehr reduzierten primären Zielwahl werden die Aktivitätenketten zugeordnet. Hier ist relevant ob es sich um ein Pandemie-Szenario handelt, mit eingeschränktem Verhalten auch ausserhalb des Arbeitsumfeldes. Entsprechend

müssen dann die Zuordnungen der sekundären Ziele unterschiedlich erfolgen, im Vergleich zu einem regulären Szenario ohne Pandemie-Restriktionen. Insbesondere lässt der Fall ohne Pandemie wegen der wegfallenden Arbeitswegen zusätzliche und weiter entfernte sekundäre Aktivitäten zu.

2. Anpassungen im Zielwahlmodell und bei der Verkehrsmittelwahl

Bei der Methodik der sekundären Zielwahl sind die Parameter für die Verhaltensmodelle anzupassen; aus technischer Sicht sind keine zusätzlichen Anpassungen erforderlich. Dasselbe gilt auch für die Verkehrsmittelwahl.

Erwartete Resultate

Aus Aufwandsgründen wird an dieser Stelle nur das Vorgehen einer Modellierung vorgestellt, die eigentliche Berechnung von Verkehrsbelastungen und weiteren Modellresultaten werden hier weggelassen, für das GVM wie auch für das ABVM.

Mit dem Routenwahlmodell können die oben generierten Fahrtmatrizen umgelegt werden. Als Resultat werden folgende Wirkungen erwartet:

- Keine Belastungen mehr aus Pendlerverkehren
- Geringere Auslastung auf den ÖV-Linien, insbesondere in den Spitzenstunden
- Geringere Auslastung auf den Strassen, insbesondere in den Spitzenstunden
- Reisezeitverkürzungen beim MIV, da Infrastruktur weniger ausgelastet ist
- Neu unternommene Wege ab Wohnort, die vorher vom Arbeitsplatz aus unternommen wurden

Aufwand

Der Aufwand für die Modellierung eines Szenarios mit Homeoffice im GVM Region Basel ist etwas grösser als bei anderen Anwendungen, wegen den oben erwähnten Anpassungen im Erzeugungsmodell. Im GVM Region Basel können jedoch allfällige weitere Anpassungen bei den unternommenen (mehrgliedrigen) Wegeketten infolge Homeoffice nicht direkt simuliert werden. Der Aufwand für eine Umsetzung im ABVM Basel ist etwa gleich wie beim GVM Region Basel. Die Wegeketten können aufgrund der implementierten Methodik gesamtheitlicher angepasst werden.

6.8 Übersicht Modellschritte und Bewertung

In den obigen Kapiteln wurden für den Modellvergleich die Kriterien *Erforderliche Datengrundlagen*, *Methodik* und *Funktionalität* untersucht, jeweils separiert in die einzelnen Modellschritte. Im Folgenden werden nun die Kriterien *Rechenzeit*, *Aufwandschätzung* und *Software* beschrieben.

6.8.1 Rechenzeit

Bei der Evaluierung der Rechenzeit ist zu erwähnen, dass es sich bei beiden Modellen um sehr detaillierte und grossräumige Modelle handelt. Dies hat direkt Auswirkungen auf die Rechenzeit, je nach Modellgrösse wächst die Rechenzeit quadratisch oder sogar noch stärker. So hat das GVM Region Basel beispielsweise über 20'000 Zonen, was in der Schweizer Modelllandschaft zurzeit einzigartig ist. Das ABVM Basel verwendet für die Zielwahl ebenfalls 20'000 Zonen. Bei der Zielwahl und teilweise bei der Verkehrsmittelwahl sind somit längere Rechenzeiten zu erwarten.

Die folgende Tabelle zeigt die Rechenzeiten auf, wie sie für die einzelnen Modellschritte ausgelesen wurden. Es ist anzumerken, dass der direkte Modellvergleich bei der Umlegung resp. Simulation nicht möglich ist, weil die Modellkomponenten grundsätzlich unterschiedlich sind. Ein grosser Unterschied besteht bei der Zielwahl und der synthetischen Population. Die methodischen Unterschiede bei der Zielwahl, wie auch die zusätzlichen Funktionalitäten bei der synthetischen Population erschweren einen direkten Vergleich. Es ist generell zu erwähnen, dass speziell die Software TransCAD, welche das GVM Region Basel verwendet, eine sehr performante, parallelisierte Matrix-Kalkulation beinhaltet, welche die Rechenzeit für die Nachfrageberechnung auf ein Minimum reduziert. Aufgrund grossen Anzahl Zonen entstehen jedoch bei der Umlegung wiederum längere Rechenzeiten.

Zusätzlich kann die grosse Schlaufe ebenfalls nicht direkt zwischen den Modellen verglichen werden. MATSim hat einen Teil der grossen Schlaufe standardmässig schon integriert. Auch die Abbruchkriterien sind grundsätzlich unterschiedlich und beeinflussen ebenso die Rechenzeit. Die Konvergenzberechnung ist im GVM Region Basel mathematisch einfacher, ausser bei detaillierten Knotenstromberechnungen. Die Freiheitsgrade in der MATSim Simulation sind grösser, und entsprechend dauert das Konvergenzverhalten etwas länger (Anzahl Iterationen), in Abhängigkeit der gewählten Freiheitsgrade.

Zusätzlich ist zu erwähnen, dass das ABVM Basel im Rahmen eines Innovationsprojektes entstanden ist. Die Rechengeschwindigkeit hatte eine geringe Priorität und es könnte durch Parallelisierung gewisser Berechnungen relativ schnell viel Rechenzeit gewonnen werden. Aus diesem Grund wurden diejenigen Rechenschritte, welche noch nicht parallelisiert wurden, jedoch problemlos parallelisiert werden könnten, aufgrund einer Schätzung hochgerechnet und in einer separaten Spalte so aufgelistet (*Tab. 19*). In dieser Berechnung ausgelassen wurden kürzlich durchgeführte Verbesserungen in der MATSim Simulation, welche die Berechnungszeit für MATSim nochmals deutlich reduziert (Bruno et al., 2019).

Die Unterschiede in den Modellschritten wirken sich direkt auf die Rechenzeiten aus. Zusammengefasst ist ersichtlich, dass das ABVM Basel höhere Rechenzeiten aufweist. Die Unterschiede sind für die vorgesehenen Anwendungen zu beachten. Für komplexere Rechnungen, wo der gesamte Durchlauf erforderlich ist, sind grössere Rechenzeiten für MATSim zu erwarten. Im Rahmen von grösseren Bearbeitungsprojekten lässt sich allenfalls diese zusätzliche Rechenzeit auch rechtfertigen.

Tab. 19 Vergleich der Rechenzeiten für die Nachfrageberechnung.

Rechenschritt	GVM Region Basel	ABVM Basel	ABVM Basel zusätzlich parallelisiert (Schätzung)
Synthetische Population	-	5 h	5 h
Nachfrage- und Wegekettener- rechnung	7 min	37 h	25 h
Umliegung OeV und MIV, resp. Si- mulation mit VMW (Spitzenstunden MSP und ASP)	8 h (DWV 5h)	20.5 h	15 h
Total	13 h	62.5 h	45 h
Durchlauf einer weiteren Iteration einer grossen Schlaufe inkl. Ziel- wahl ³⁴		57.5 h	40 h
Anzahl Cores / Anzahl Prozessoren	36	8 / 16	8 / 16
Realitätstest und Szenarien			
Sperrung Birsigviadukt (Routen- wahl)	2.5 h	20.5 h	15h
Taktverdoppelung Buslinie 64 (Voll- durchlauf)	5.5 h	20.5 h	15 h
Neue Zielwahlberechnung Therwil (nur Zielwahl)	5 min	17 h	9 h
Kordonmaut Basel	k.A.	20.5 h	15h

6.8.2 Aufwandschätzung

Die Aufwandschätzung ist wie bei der Rechenzeit sehr stark vom Umfang und den umgesetzten Teilmodellen und Schnittstellen abhängig. Aufgrund der detaillierten Datengrundlage in der Schweiz ist jedoch für beide Modellansätze die aufwändige Aufbereitung der Grundlagedaten etwas effizienter. Es folgen die Nachfrageberechnung, wie auch Umliegung / Simulation und Kalibrierung. Grundsätzlich sind auch hier ähnliche Aufwände zu erwarten. Aufgrund der zusätzlichen Teilmodelle beim ABVM Basel und der zusätzlichen Kalibrierungsaufwände wird ein zusätzlicher Aufwand bei den ABVM einzurechnen. Der zusätzliche Aufwand ist etwa 30% - 50% im Vergleich mit einem aggregierten Modell mit gleicher Funktionalität und entspricht deshalb etwa den Rückmeldungen aus den Interviews.

³⁴ ABVM Basel hat einen Teil der grossen Schlaufe schon in der Simulation drin (Wahl der Abfahrtszeit sowie Verkehrsmittelwahl). Diese Berechnung würde je nach Modellanwendung entfallen.

Tab. 20 Vergleich der Bearbeitungszeiten zwischen dem GVM Region Basel und dem ABVM Basel.

Rechenschritt	GVM Region Basel	ABVM Basel
Total Arbeitszeit Modellerstellung	70 Wochen	105 ³⁵ Wochen
Realitätstests und Szenarien (manueller Arbeitsaufwand im Modell, ohne graphische Aufarbeitung)		
Sperrung Birsigviadukt	10 min	10 min
Taktverdoppelung Buslinie 64	5 min	30 min
Aktualisierung Zone / synth. Population, Zielwahlberechnung Therwil	10 min	3 h
Kordonmaut Basel	k.A.	3 h

6.8.3 Software

Im Folgenden werden die Software Produkte beschrieben, welche verwendet wurden.

GVM Region Basel:

TransCAD beruht auf einer sehr effizienten Schnittstelle zu einem geographischen Informationssystem (GIS), welches speziell für Verkehrsspezialisten entworfen wurde, um Verkehrsdaten zu sammeln, anzuzeigen und zu analysieren. Im Gegensatz zu anderen Softwarepaketen kombiniert TransCAD Verkehrsmodellierungsfunktionalitäten mit GIS in einer einzigen Plattform. Man kann TransCAD für alle Verkehrsarten in jeder Detailstufe nutzen.

TransCAD verfügt über:

- Eine starke GIS-Engine mit speziellen Erweiterungen für Verkehrsprobleme
- Anwendungsmodulare für das Routing, Verkehrsnachfrageberechnungen und Prognosen, Öffentlichen Verkehr, Logistik, Standortmanagement und Flächennutzungsmanagement.
- Hohe Performance bei Umlegungen auf grosse Netze mit einer hohen Zonenzahl
- Fast 800 Funktionen die vom Caliper Script, einer vollständigen Programmiersprache für den Entwurf von Menus und Dialog-boxen (Einschließlich Toolbars und Tool - boxen) und für das Schreiben von Makros, abgerufen werden können.
- Die Möglichkeit Makros für Programmläufe zu erstellen und zu parametrisieren und diese in einem Szenario Manager zu verwalten.

TransCAD verfügt über Applikationen für alle Arten von Verkehrsdaten und für alle Verkehrssysteme. Es ist ideal für den Aufbau von Transportinformationssystemen und zur Entscheidungsunterstützung in Verkehrsfragen. TransCAD läuft auf handelsüblicher Hardware mit Microsoft Windows und umfasst praktisch alle Computernormen. Dies hat folgende zwei Vorteile:

- Die Beschaffung und Installation von TransCAD kann mit bedeutend geringeren Kosten erfolgen als bei anderen integrierten Lösungen für GIS und Verkehrsmodellierungslösungen.
- Es ist nicht erforderlich, kundenspezifische Anwendungen oder schwierige Module für den Datenaustausch zu bilden, um Verkehrsanalysen mit GIS-Dateien durchzuführen.

TransCAD ist ein state-of-the-art GIS zur Herstellung von bedürfnisgerechten digitalen Karten, zur Erzeugung von geografischen Datensätzen und zur Unterstützung von verschiedensten räumlichen Analysen. TransCAD verfügt über hochentwickelte GIS-Features

³⁵ Schätzung, entspricht den Rückmeldungen aus den Interviews.

wie Polygonverschneidungen, Bufferungen und Geokodierung und hat eine offene Architektur, die es ermöglicht Daten in lokalen Netzwerken problemlos auszutauschen. TransCAD ist das einzige Softwarepaket, welches GIS Funktionalitäten vollständig integriert hat, zusammen mit Verkehrsmodellierungs- und Logistik-Funktionalitäten.

ABVM Basel:

R Cran

Für die Nachfrageberechnung wurde R mit Cran (Comprehensive R Archive Network) verwendet. Cran bietet eine Vielzahl von Bibliotheken, welche für Nachfrageberechnungen verwendet werden können. Die Programmiersprache ist relativ einfach gehalten. Im ABVM Basel werden bei der Nachfrageberechnung R und einzelne Bibliotheken eingesetzt. R kann auch von anderen Sprachen aufgerufen werden und ist flexibel in den Anwendungen und besitzt eine Vielzahl von Schnittstellen, zum Beispiel zu GIS.

Java

MATSim ist in Java programmiert und kann auch so gestartet werden (Horni et al., 2016), entweder in einer Programmierumgebung, die Kommandozeile, oder eine GUI, welche in einem kleinen Umfang ebenfalls zur Verfügung steht. Auswertungen können open-source über MATHUB (<https://viz.vsp.tu-berlin.de/>) gemacht werden. Ein umfangreiches, lizenziertes Produkt steht zur Verfügung, welches sehr detaillierte Analysen für MIV und OeV ermöglicht, sowie ein weiteres Produkt, welches MATSim Berechnungen webbasiert ermöglicht und die Anwendungsaufwand minimiert (www.simunto.ch). Die Erstellung einer MATSim Simulation mit den Eigenschaften wie oben beschrieben braucht etwa Java Kenntnisse (mittleres Level). Sobald das Modell erstellt wurde und dann angewendet wird, sind geringe / keine Java Kenntnisse erforderlich.

GIS

Für die räumlichen Visualisierungen wird hauptsächlich ein GIS Umgebung verwendet. Speziell für statische Visualisierungen ergeben sich so viele Möglichkeiten. Es gibt hier keine speziellen Anforderungen an die GIS Software.

6.9 Fazit Modellvergleich

Die grundlegenden Erkenntnisse des Modellvergleichs aus den Anwendungen in Basel werden im Folgenden zusammengefasst. Es wird hier nochmals darauf hingewiesen, dass der Vergleich exemplarisch anhand von spezifischen Auswertungen erfolgt ist und nicht als abschliessend betrachtet werden kann.

Methodik und Funktionalität

Positiv

- + ABVM Basel und GVM Region Basel haben eine funktionierende Methodik welche die erforderlichen Funktionen erfüllen:
 - + Das ABVM hat eine vollständige Methodik und Funktionalität auf Ebene Aktivitäten- und Wege-Ketten.
 - + Das GVM Region Basel hat eine vollständige Methodik und Funktionalität für ein Wege-Modell.
- + Die Kalibrierungsmöglichkeiten sind beim GVM etablierter.
- + Die „triple Convergence“ (Verkehrsmittelwahl, Routenwahl, Wahl der Abfahrtszeit) wird beim ABVM umfassender abgebildet inklusive der erforderlichen Nutzenfunktionen.
- + Die ABVM Methodik lässt sich besser an lokale Gegebenheiten anpassen (grenzquerende Ströme, Randsummen im Zielwahl-Entscheidungsmodell).
- + Die ABVM Methodik eignet sich gut für komplexe Szenarien, zum Beispiel Maut, sowie für Szenarien welche die zeitliche Komponente der Aktivitätenketten und Wegeketten beeinflussen.

Verbesserungsfähig

- Die Konvergenz ist beim ABVM innerhalb der MATSim Simulation noch weiter auszuwerten, sie jedoch für verkehrliche Anwendungen ausreichend genau, speziell wenn bedacht wird, dass immer ein wesentlicher Teil der „grossen Schlaufe“ berechnet wird, nämlich die Verkehrsmittel- und Routenwahl und die Wahl der Abfahrtszeit (siehe Kapitel 6.5.2 zur Definition und genauen Auswertung).

Erforderliche Datengrundlagen*Positiv*

+ ABVM und GVM:

- Grundlagen sind generell für beide Modellansätze vorhanden, hier ist vor allem die detailliertere räumliche Auflösung des Mikrozensus sehr relevant.
- Anforderungen der Daten korrespondieren mit der erwarteten Detaillierungsgrad der Resultate (detaillierter Input ist keine Voraussetzung, sondern als Grundsatz bei jeder Modellierung zu verstehen).
- Für die Berechnung von Szenarien sind die Grundlagen für beide Modelle vorhanden.

Verbesserungsfähig

- Die Etablierung der Nutzenparameter ist bei der verkehrlichen Simulation (MATSim) weniger standardisiert als beim aggregierten Modell. Die Parameter sind teilweise auch für aggregierten Modelle nicht vollständig vorhanden; zum Beispiel sind die primäre und sekundäre Zielwahl Parameter in vielen Anwendungen nicht direkt geschätzt. Hier besteht bei beiden Modellansätzen ein Nachholbedarf.

- ABVM: Synthetische Population und korrespondierende Prognose als Grundlage notwendig (in der Schweiz vorhanden (Bodenmann et al., 2019)). Es ist zurzeit noch unklar, ob wie beim NPVM auch generell die aggregierten Modelle dazu geeignet sind, eine synthetische Population als Grundlage zu verwenden.

Aufwandabschätzung

- ABVM: Einmaliger zusätzlicher Aufwand notwendig für die Modellerstellung wegen der Berechnung der Wegeketten und dem zusätzlichen Kalibrierungsaufwand für die Erstellung der zusätzlichen Teilmodelle. Die synthetische Population ist für die Schweiz verfügbar und der Aufwand entfällt, ausser für angrenzende Gebiete im Ausland. In den Anwendungen fällt der Zusatzaufwand nicht ins Gewicht (zusätzliche Auswertungsmöglichkeiten erfordern einen zusätzlichen Aufwand).

Rechenzeit

Grundsätzlich sind die Rechenzeiten höher beim ABVM Basel, ohne jedoch die neusten Beschleunigungsmöglichkeiten in MATSim zu berücksichtigen. Es ist jedoch anzunehmen, dass trotzdem die meisten Modellanwendungen mit einem vernünftigen Modellaufwand gerechnet werden können. Die zusätzlichen Auswertungsmöglichkeiten beim ABVM können je nach Anwendung und Szenarien die Rechenzeit wieder kompensieren.

Verfügbarkeit der Software

+ GVM (TransCAD): Relativ umfassende und preiswerte Softwarelösung.

+ TransCAD: Offene Softwarestruktur mit Programmiermöglichkeit, andere Ansätze.

+/- ABVM Basel Anwendung: Open-source Software (R-cran, Java, GIS). Für Modellnutzung Basiskenntnisse der Programmiersprachen notwendig, für die Modellerstellung detaillierte Kenntnisse erforderlich, dafür keine anfallenden Kauf- und Lizenzkosten.

+ ABVM Basel Anwendung: Flexiblere Struktur (neue, genauer Methoden möglich, e.g. Kordonkalibrierung, Randsummen im Entscheidungswahlmodell)

- Geringe bis mittlere Codierungsaufwand für Nachfrageberechnung notwendig

- Alternativ sind Produkte verfügbar, e.g. ActivitySim (noch nicht vollständig etabliert)

Abb. 73 zeigt eine Übersicht über die einzelnen Komponenten des Modellvergleichs sowie eine qualitative Beurteilung hinsichtlich Modellerstellung und Anwendung. Die Hauptunterschiede liegen bei der Rechenzeit und der Softwareverfügbarkeit, wo bei aktivitäten- und agentenbasierten Modellen wie dem ABVM noch Nachholbedarf besteht. Zusätzlich ist der Aufwand für die Modellerstellung beim ABVM ebenfalls höher. Vorteile bietet das ABVM bei der Berechnung grösserer Szenarien, bei welchen speziell die zeitliche Variation der Tagespläne eine wesentliche Rolle spielt, sowie den Auswertungen nach beliebigen Merkmalen der Aktivitätenketten. Der höhere Detaillierungsgrad des ABVM spielt auf der Ebene der Anbindungen eine Rolle. Zusätzlich ist nochmals anzufügen, dass der Modellvergleich exemplarisch erfolgt ist.

	GVM Region Basel					ABVM Basel				
	Datengrundlagen	Aufwandschätzung	Methodik, Funktionalität	Rechenzeit	Verfügbarkeit Software	Datengrundlagen	Aufwandschätzung	Methodik, Funktionalität	Rechenzeit	Verfügbarkeit Software
1) Modelleingabedaten	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar	Verfügbar	Verfügbar	Nicht durchführbar
2) Nachfrageberechnung	Verfügbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar
3) Umlegung und Simulation	Verfügbar	Nicht durchführbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Verfügbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar
4) Durchgeführte Sensitivitätstests	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Verfügbar
5) Durchgeführte Realitätstests	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Verfügbar
6) Durchgeführte Szenarien	Verfügbar	Nicht durchführbar	Nicht durchführbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Verfügbar	Nicht durchführbar	Verfügbar

Skala: Verfügbar / vertretbar Nicht durchführbar / nicht vorhanden

Abb. 73: Verfügbarkeit und Durchführbarkeit der Modellkomponenten und Anwendungen, untersucht für das GVM Region Basel und ABVM Basel.

Es ist zusätzlich anzumerken, dass die Anforderungen an die Modelle und die Zielsetzungen sehr unterschiedlich sind (Forschung, Kantone, Mobilitätsdienstleister, ..). Die ausführlichen Praxistests für die allgemeine Verkehrsplanung ist (noch) nicht abschliessend erbracht (was unter anderem damit zusammenhängt dürfte, dass das ABVM Basel nicht von einer Gebietskörperschaft beauftragt wurde). Die verallgemeinerten Aussagen basierend auf verschiedenen gewonnenen Erkenntnisse werden abgegrenzt in Kapitel 0 behandelt.

7 Synthese der untersuchten Methoden

7.1 Unterscheidungsmerkmale

In dem folgenden Abschnitt werden die Unterschiede zwischen ABM und aggregierten Modellen zusammenfassend dargestellt. Dabei werden die inhaltlichen Merkmale der Modelltypen aus Kapitel 2 um Merkmale ergänzt, die sich in der Handhabung und bisherigen Bearbeitung mit den unterschiedlichen Verkehrsnachfragemodellen gezeigt haben. Diese Analyse basiert sowohl auf den Experteninterviews als auch den Erfahrungen, die mit ABVM Basel und dem GVM Region Basel gesammelt wurden.

7.1.1 Inhaltliche Unterschiede

Personengruppen vs. synthetische Bevölkerung

In aggregierten Verkehrsnachfragemodellen wird der Untersuchungsraum in räumliche Aggregate (Verkehrszellen) eingeteilt. Verkehrszellenspezifische Strukturdaten (z.B. Einwohner, Beschäftigte, Verkaufsflächen) bilden wichtige Eingangsgrößen für die Verkehrserzeugung, die Zielwahl und weitere Entscheidungsmodelle. Da Verkehrserzeugungsraten in den meisten aggregierten Modellen nicht nur vom Wegezweck, sondern auch von den personenbezogenen Merkmalen abhängt, erfolgt eine Einteilung der Personen in Gruppen mit ähnlichem Verhalten. Das personenbezogene Verhalten wird durch wesentliche soziodemographische Merkmale und Eckwerten der verfügbaren Mobilitätswerkzeuge charakterisiert. Die Anzahl der Personengruppen variiert üblicherweise zwischen 5 und 15 verhaltenshomogenen Gruppen (z.B. Erwerbstätige 25-64 Jahre mit PW-Verfügbarkeit, Erwerbstätige > 65 Jahre). Die Einteilung der Personengruppen erfolgt in der Regel anhand verfügbarer empirischer Daten, die für die Bestimmung von Erzeugungsraten verwendet werden können (z.B. (Perret et al., 2017)).

Eine Einteilung in Verkehrszellen ist bei einem ABM nicht zwingend notwendig, wenn alle Personen und verkehrlich relevante Anziehungspunkte geokodiert vorliegen. Aus Gründen des Datenschutzes aber auch einer fehlenden Gesamterhebung aller Merkmale handelt es sich nicht um Realdaten, sondern ein synthetisch zusammengesetztes repräsentatives Abbild der Bevölkerung. Im Gegensatz zu den meisten anderen Ländern verfügt die Schweiz flächendeckend über sehr gute Daten, so dass mit der synthetischen Bevölkerung SynPop gesamtschweizerisch eine sehr gute Datenbasis durch das ARE vorliegt. Die synthetische Bevölkerung wurde unter anderem aus

- Statistik der Bevölkerung (BFS, STATPOP, 2017)
- Statistik der Unternehmensentwicklung (BFS, STATENT, 2016)
- dem Motorfahrzeuginformationssystem mit allen Personenwagen (MOFIS 2017);
- Kundendatenbanken der SBB und ÖV-Verbände
- und dem Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV 2015; Stichprobe)
- statistischer Lohnrechner (BFS, Salarium 2016)

gebildet (Bodenmann et al., 2019). Aus den verwendeten Datenquellen wird bereits ersichtlich, dass bei der Generierung der Merkmale die Wohnadresse, Haushaltsgröße, Haushaltseinkommen, Alter, Geschlecht, Erwerbsstatus, PW-Verfügbarkeit und ÖV-Zeitkartenbesitz vorliegen.

Aus der Verwendung der synthetischen Bevölkerung statt verhaltenshomogener Gruppen, die auf Verkehrszellen bezogen sind, leitet sich alleinig noch kein Vor- oder Nachteil für ein ABM ab. Entscheidend ist in beiden Fällen die Genauigkeit der Eingangsdaten. Wenn mobilitätsrelevante Merkmale wie Haushaltseinkommen oder verfügbare Mobilitätswerkzeuge nicht in kleinräumiger Auflösung vorliegen, sind kein räumlich hoch aufgelösten Quell-Zielbeziehungen ableitbar, die realitätsnah das personenbezogene Mobilitätsverhalten abbilden. Auch im GVM Region Basel lagen Einwohnerzahlen und Besitz der Mobilitätswerk-

zeuge adressscharf vor und wurden auf Hektarzonon aggregiert. In der Synthetischen Population 2017 wurden flächendeckend alle oben erwähnten Merkmale für jede Person in der Schweiz geokodiert.

Verkehrserzeugung

In aggregierten Modellen wird der Verkehr über Quell-Ziel-Gruppen generiert. Jeder Fahrtzweck wird als Weg zwischen einer Aktivität am Quellort und einer Nachfolgeaktivität am Zielort abgebildet. In den meisten aggregierten Modellen werden zwischen 10 bis 20 Quell-Ziel-Gruppen gebildet. Das GVM Region Basel verwendet je 10 startende und ankommende Quell-Ziel-Gruppen (Wohnen-Arbeiten, W-Bildung, W-Einkaufen, W-Nutzfahrt, W-Freizeit, W-Sonstiges, S-Arbeiten, S-Bildung, S-Einkaufen, S-Nutzfahrt). Für jede Quell-Ziel-Gruppe gekreuzt mit der verhaltenshomogenen Gruppe werden vom Modellersteller Erzeugungsraten eingetragen. Die Erzeugungsraten werden aus den Mobilitätsraten eines Zensus oder einer regionalen Verkehrsbefragung meist mittels deskriptiver Statistik oder aufwendiger mit Regressionsverfahren oder Entscheidungsmodellen geschätzt. Schätzverfahren werden eingesetzt, um die Summen der Quell- und Zielverkehre auszugleichen, da Wege im Untersuchungsraum weder verloren noch gewonnen werden können.

Die Verkehrserzeugung bei einem ABM erfolgt vom Wohnort ausgehend als Abfolge von Aktivitäten; d.h. bereits beim Wohnort der Person werden die weiteren Aktivitäten des Tages festgelegt ohne dass zu diesem Zeitpunkt bereits die Beginnzeiten sowie die Orte der Folgeaktivitäten festliegen. In diesem Modellierungsschritt können je nach ABM bereits die Aktivitätendauern und früheste oder späteste Beginnzeiten aller Aktivitäten personenbezogen festliegen. Die Wahrscheinlichkeit der Zuordnung einer Aktivitätenkette zu einer Person wird anhand des Mikrozensus oder eines lokal erhobenen Wegetagebuchs bestimmt (Entscheidungswahlmodell).

Wie das Beispiel ABVM Basel zeigt, muss die Berechnung der Anziehungspotentiale beim ABM nicht notwendigerweise über eine Zuordnung zu einzelnen geokodierten Anziehungspunkten, sondern kann auch über eine räumliche Verteilung der Anziehungspotentiale erfolgen (siehe 6.3.1).

Im Vergleich zwischen ABVM und GVM Region Basel offenbart sich kein systemischer Vor- oder Nachteil bei der Verkehrserzeugung durch ABM gegenüber aggregierten Nachfragemodellen. In beiden Ansätzen müssen die Strukturdaten mit soziodemographischen Merkmalen der Bevölkerung ergänzt in hoher räumlicher Auflösung vorliegen, um raum- und Personengruppen bezogen differenzierte Wege zu erzeugen, die gut mit Zensusdaten korrelieren. Methodisch bietet der ABM Ansatz Vorteile gegenüber einem aggregierten Ansatz, weil bereits bei der Verkehrserzeugung Zusatzinformation wie Ausgangszeitpunkt und verfügbare Verkehrsmittel mitberücksichtigt werden können.

Unabhängig vom verwendeten Modellansatz muss die Verkehrserzeugung berücksichtigen, dass am Rand des Untersuchungsraums weniger Verkehr erzeugt wird, da ein Teil des Verkehrs in der Realität in den nicht modellierten Außenraum abfließt (N. Rieser, Tasnady, de Vrieves, et al., 2018). Zusätzlich erschwerend können Raumstrukturen wirken, in denen politische oder natürliche Grenzen den Personen- und Warenaustausch behindern. Die Modellierung der Wege über Ländergrenzen hinweg erfordert eine zusätzliche Korrektur, die im GVM Region Basel über Grenzwiderstände mit Reibungsfaktoren und im ABVM Basel erst in der Kombination mit dem Zielwahlmodell (Vitins & Erath, 2019) umgesetzt wurde.

Gemäß den Empfehlungen zur Qualitätssicherung (N. Rieser, Tasnady, de Vrieves, et al., 2018) sind in jedem Fall unabhängig vom Nachfragemodell bereits bei der Verkehrserzeugung qualitätssichernde Plausibilisierungen durchzuführen und zwar:

- Aufbereitung der Raumstrukturdaten, so dass in der passenden räumlichen Auflösung die Eingangsdaten mit Bevölkerungszahlen aus STATPOP und Arbeitsplätzen STATENT des BFS plausibilisiert werden. Bei der Verwendung einer synthetischen Population müssen die Strukturdaten in der entsprechenden räumlichen Aggregation zusammengefasst werden.

- Vergleich von personengruppenbezogenen Mobilitätskennziffern mit Daten aus dem MZMV oder regionalen Wegetagebüchern unter Berücksichtigung regionaler Besonderheiten (z. B. politische oder natürliche Grenzverläufe) und singulärer Verkehrserzeuger (Flughäfen, Veranstaltungsorte, ...).

Zielwahl

Die Zielwahl ist typischerweise der Modellteil in der Nachfrageberechnung, der mit den größten Unsicherheiten behaftet ist, da jede Verkehrszelle oder Geokoordinate aus der synthetischen Bevölkerung eine mögliche Alternative darstellt und damit die Alternativenanzahl besonders groß ist. Aggregierte Nachfragemodelle nutzen für die Zielwahl meist Ansätze, die auf einem Gravitationsmodell aufsetzen. Eine normierte Kombination aus Quell- und Zielpotential multipliziert mit einem Entfernungswiderstand ergibt die Wegezweck spezifische Wegeanzahl. Ansonsten werden wie beim GVM Region Basel die LogSums der generalisierten Kosten als Entfernungswiderstand für jedes Verkehrsmittel zu einem durchschnittlichen Entfernungswiderstand zwischen zwei Verkehrszellen verwendet. Weniger häufig wird ein MNL Modell eingesetzt, wenn, wie empfohlen, der Entfernungswiderstand für jedes Verkehrsmittel ermittelt und bei der simultanen Ziel- und Verkehrsmittelwahl berücksichtigt wird. Aufgrund der sehr hohen Alternativenmenge und allenfalls notwendigen grossen Stichproben kann jedoch ein Bias entstehen (Frejinger et al 2009).

Ein ABM verwendet in der Regel andere Zielwahlmodelle, die sich durch Einsatz diskreter Entscheidungsmodelle näher am Entscheidungsprozess der Reisenden orientieren als ein Gravitationsansatz der aggregierten Nachfragemodelle. (Vitins & Erath, 2019) verwenden dabei im ABVM Basel neben einem MNL Modell mit Randsummenausgleich zusätzlich den Ansatz der Kapazitätsbeschränkungen an den Zielorten und einen Randsummenausgleich für Kordonwiderstände, um den empirisch nachweisbaren Grenzwiderstand im Länderdreieck bei Basel abzubilden. Mit einem deutlich höheren Kalibrierungsaufwand können auch in einem aggregierten Nachfragemodell bekannte Grenzwiderstände als Randbedingungen durch fixierte Randsummen im Zielwahlmodell berücksichtigt werden.

In einem ABM wird zwischen primären Aktivitäten (Pflichtaktivität Wohnen, Arbeit, Bildung) und sekundären Aktivitäten unterschieden. Die Wegeanzahl zu den primären Aktivitäten entspricht den Kapazitätswerten jedes Aktivitätsortes aus den Strukturdaten. Die Wahl der Sekundärziele orientiert sich mit höherer Wahlwahrscheinlichkeit entlang der Routen zwischen den primären Aktivitäten, wenn diese Aktivität zeitlich zwischen zwei primären Aktivitäten liegt. In einem ABM lässt sich sowohl die Kapazitätsbeschränkung bei Primäraktivitäten als auch die bevorzugte Wahl von Aktivitätsorten entlang von Pflichtwegen leichter berücksichtigen als dies in aggregierten Modellen der Fall ist. Dennoch sollte die Kapazitätsbeschränkung gemäß (N. Rieser, Tasnady, de Vrieves, et al., 2018) auch bei aggregierten Modellen berücksichtigt werden, indem die Wegeanzahl für Arbeits- und Ausbildungswege über harte Randsummenbedingungen am Zielort festgelegt wird.

Als prüfbare Qualitätskriterien für die Zielwahl sollten gemäß SVI 2015 folgende empirisch überprüfbaren Kennwerte herangezogen werden:

- Distanzverteilung pro Wegezweck durch Vergleich mit dem MZMV
- Wegeanzahl für Arbeitswege auf Gemeindeebene durch Vergleich mit der Pendlermatrix, die in der Schweiz nur mehr aus einer Stichprobe besteht.

Zeitliche Abfolge von Aktivitäten und Aktivitätendauern

Ein aggregiertes Modell besitzt in aller Regel keine Zeitachse; d.h. die Nachfrage wird für einen Zeitraum (meist ein durchschnittlicher Werktag) berechnet. Eine zeitliche Auflösung in Zeitscheiben, die die Startzeit einer Quell-Zielgruppe festlegen, werden in begrenztem Maße bei wegebasierten Nachfragemodellen durchgeführt, ohne jedoch Aktivitätendauern

berücksichtigen zu können. Die fehlende Zeitachse stellt auch den größten Unterschied statischer, aggregierter Nachfragemodelle zu einem ABM dar.

Bei einem ABM werden Touren mit in einen zeitlichen Kontext gestellt. Primäraktivitäten werden meist mit Restriktionen zum Anfangszeitpunkt und Mindestauern versehen, so dass Sekundäraktivitäten und die Wege zwischen den Aktivitäten nur erfüllt werden können, wenn die Zeitrestriktionen auch eingehalten werden können. Vergleichbar mit tourbasierten Logistikketten gibt es harte zeitliche Bedingungen bei fixen Anfangszeiten oder weiche Bedingungen, bei denen die Aktivität in einem Zeitintervall beginnen muss und eine Mindestdauer ohne fixen Endzeitpunkt umfasst.

Fragestellungen, bei denen die zeitliche Abfolge von Aktivitäten relevant ist, sind ungleich schwerer oder ungenauer mit einem aggregierten Modell abbildbar. Eine Auflistung der Anwendungen folgt im nächsten Abschnitt.

Zeitliche Dimension in Verkehrsnachfragemodellen

Neben der Zeitachse, die sich aufgrund der Aktivitätenabfolge ergibt, ist für Nachfragemodelle noch einen zweiten Grund für die Zeit als Merkmal bedeutsam. Zu Zeiten der Verkehrsspitze steigen die Fahrzeiten im mIV und zum Teil auch im ÖV. Wenn Verkehrsplanungen für Verkehrsspitzen (z.B. Morgenspitzenstunde) durchgeführt werden, sollte das Nachfragemodell die entsprechende Nachfrage abbilden. Im Gegensatz zum Tagesverkehr, der meist im Verkehrsaufkommen symmetrisch ist (Summe des Quellverkehrs einer Zelle ist gleich der Summe des Zielverkehrs), gilt die Symmetriebedingung für die Nachfrage bei Stunden oder Stundengruppen nicht. Daher sollte bei aggregierten Tagesmodellen auch nicht nur pauschal ein Spitzenstundenfaktor über alle Quell-Ziel-Beziehungen verwendet werden, sondern dieser über Wegezwecke spezifisch bestimmt werden. Aus dem Tagesmodell des GVM Region Basel werden daher auch unsymmetrische Stundenscheiben über wegezweckabhängige Ganglinien geschnitten.

Bei einem tourbasierten Ansatz eines ABM ist das Schneiden von Zeitscheiben jederzeit möglich, so dass nicht symmetrische Quell-Ziel-Beziehungen pro Zeitintervall als Ergebnis ausgewiesen werden können.

Nachfragematrizen für verschiedene Zeiteinheiten oder Touren mit Zeitangabe für jeden Anfangszeitpunkt einer Fahrt sind für Leistungsfähigkeitsuntersuchungen relevant. Die Nachfragedaten werden in zeitspezifischen Verkehrsumlegungen berücksichtigt.

Leistungsfähigkeitsuntersuchungen für MIV in urbanen Räumen enthalten in aller Regel auch eine Wartezeitbetrachtung an signalisierten Knotenpunkten. In den wenigsten Nachfragemodellen wird bisher der Einfluss von Lichtzeichenanlagen im Detail nachgebildet. Im einfachsten Fall wirkt ein durchschnittlicher Streckenwiderstand unabhängig von der Abbiegebeziehung (Kreuzen, Links- oder Rechtsabbiegen). Häufig wird wie im GVM Region Basel ebenso wie im ABVM Basel ein abbiegebezogener aber fixer Zeitzuschlag verwendet. Dieser kann sowohl im aggregierten Modell als auch im ABM um eine belastungsabhängige Komponente durch Übertragung der belastungsabhängigen Streckenwiderstandsfunktionen auf Abbiegebeziehungen ergänzt werden. Zusätzlich bieten einige Implementierungen aggregierter Nachfragemodelle auch die Möglichkeit, Festzeitsteuerungen komplett abzubilden, indem LZA-Daten wie Signalgruppen, Zwischenzeiten und Signalprogramme aus Verkehrsrechnern übernommen werden (z.B. PTV Visum). Wenn die Verkehrsumlegung im ABM mit einer dynamischen Verkehrsflusssimulation wie MATSim erfolgt, ist nicht nur die Verwendung von Festzeitsteuerungen, sondern auch verkehrsabhängigen Steuerungen möglich (Kühnel et al., 2018). Bisher existiert für MATSim jedoch noch kein praxistaugliches Benutzerinterface zur Eingabe von belastungsabhängigen Abbiegewiderständen oder Signalsteuerungen. Im ABVM Basel wurde für wenige Abbiegebeziehungen gezeigt, dass feste oder belastungsabhängige Knotenwiderstände modelliert werden können; allerdings sind einer flächendeckenden Umsetzung aufgrund eines fehlenden Benutzerinterfaces in MATSim noch Grenzen gesetzt. Generell sind Leistungsfähigkeitsuntersuchungen mit einer detaillierten Modellierung der Lichtzeichenanlagen in Verkehrsnachfragemodellen problematisch, da auf völlig unterschiedlichen Abstraktionsebenen modelliert wird. Während bei der Steuerung im Sekundenbereich Steuerungsentscheidungen

relevant sind, operieren die Nachfragemodelle in Stunden oder gar als Tagesverkehr. Selbst wenn das Netzmodell die Modellierung der LZA-Steuerung ermöglicht, ist es in der planerischen Praxis aus Aufwandsgründen nicht notwendigerweise zielführend diese auch zu nutzen.

Verkehrsmittelwahl

In einem aggregierten Nachfragemodell wird die Verkehrsmittelwahl in der Regel als multinomiales Logitmodell (MNL) umgesetzt. Als Eingangsgrößen werden wie im GVM Region Basel für den ÖV die Nutzen Fahrzeit, Zu-, Abgangs- und Wartezeiten, Umsteigezeiten, Umsteigehäufigkeit, ÖV-Bedienungshäufigkeit, ÖV-Zuverlässigkeit, variable Fahrtkosten und ÖV-Zeitkartenbesitz verwendet. Bis auf den ÖV-Zeitkartenbesitz werden die Nutzenkomponenten mit negativen Grenzkostensätzen multipliziert, deren Werte aus Befragungsdaten geschätzt werden. Im Fall des GVM Region Basel wurde eine regionale Stated Preference Befragung um nationale Befragungsdaten ergänzt, sofern keine signifikanten Schätzwerte vorlagen. Der ÖV-Zeitkartenbesitz geht als positiver Nutzen ein und reduziert damit die variablen ÖV-Kosten für den Bevölkerungsanteil mit GA-Besitz oder anderen regional gültigen Zeitkarten. In der Nutzenfunktion fließen zusätzlich meist verkehrsmittelspezifische Konstanten ein, mit denen die nicht direkt messbaren wahlentscheidenden Einflüsse wie Witterung, Sicherheit oder Komfort pro Verkehrsmittel und Wegezweck-spezifisch pro Weg berücksichtigt werden. Die Schwierigkeit bei der Verwendung eines MNL Modells liegt zum einen in der Schätzung der messbaren beeinflussenden Nutzenkomponenten, wenn keine signifikanten Befragungsdaten vorliegen, und zum anderen im Anteil der nicht messbaren Einflussfaktoren, die über die Konstanten Eingang in die Wahlentscheidung finden.

Neben dieser grundsätzlichen Problematik der zahlreich verwendeten MNLs weisen aggregierte Nachfragemodelle die Schwierigkeit im Umgang mit intermodalen Wegen bestehend aus Etappen, die mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln zurückgelegt werden, auf. Im GVM Region Basel werden Zu- und Abgänge zum ÖV für alle anderen Verkehrsmittel über verkehrsmittelspezifische Zugangszeiten berücksichtigt. Auch der Fusszugang zum ÖV wird mit intermodalen Wegen abgebildet. Über die Routensuche erfolgt die Auswahl der geeigneten ÖV-Haltestelle in Abhängigkeit der Zielzone. Für Zu- und Abgänge mit dem Velo oder dem Kfz werden als Teil der Umlegung Zugangszeiten zu sinnvollen P&R-Plätzen berechnet. Die Gesamtzahl der P&R-Wege wird durch Kapazitätsvorgaben begrenzt. Für eine begrenzte Anzahl intermodaler Umstiegspunkte, und als solche sind P&R-Plätze zu sehen, ist diese Vorgehensweise in aggregierten Modellen praktikabel und über fixierte Randsummenwerte auch gut kalibrierbar. Das dahinterliegende Umlegungsverfahren, bei dem die k-kürzesten Wege berechnet werden, ist allerdings nicht anwendbar, wenn es beliebig viele intermodale Umstiegsorte (z.B. free-floating Car Sharing) gibt, an denen das Verkehrsmittel gewechselt werden kann.

Während die Wahlmodelle für das einzelne Verkehrsmittel einer Etappe eines Weges auch mit MNL Modellen bestimmt wird, bieten ABMs gekoppelt mit einer agentenbasierten Verkehrssimulation die zusätzliche Möglichkeit einen personenbezogenen Weg aus mehreren Etappen zusammensetzen. Damit werden intermodale Wege realitätsnäher abgebildet als bei aggregierten Nachfragemodellen. Entscheidend ist dabei, dass sich der Ort des Verkehrsmittelwechsels aufgrund der Widerstandsbewertung aus der agentenbasierten Simulation und der anschließenden Nutzenbewertung ergibt. Diese Nutzenbewertung erfolgt nicht nur für einen Weg mit mehreren Etappen (intermodaler Weg), sondern auch für die Touren einer Person über den gesamten Tagesverlauf als Ergebnis der Aktivitätenfolgen. Mit diesem Ansatz erfolgt nicht nur eine natürlichere Nachbildung von P&R Verkehren als in aggregierten Modellen, sondern auch die Nachbildung neuer Mobilitätsformen wie RideSharing und VehicleSharing.

Um den systematischen Vorteil der personenbezogenen Verkehrsmittelwahl auch nutzen zu können, ist zusätzlicher Kalibrierungsaufwand eines ABM im Vergleich zu einem aggregierten Modell notwendig. Dieser Schritt ist im ABVM Basel noch nicht in ausreichendem

Maße hinsichtlich Fahrzweck vollzogen worden, weil das ABVM Basel hauptsächlich auf Mobilitätswerkzeuge fokussiert.

Als prüfbare Qualitätskriterien für die Verkehrsmittelwahl sollten gemäß (N. Rieser, Tasnady, de Vrieës, et al., 2018) folgende empirisch überprüfbaren Kennwerte herangezogen werden:

- Parameter der Nutzenfunktion zur Verkehrsmittelwahl über Maximum-Likelihood Methode anhand von empirischen Daten aus Mobilitätstagebüchern, SP-Befragungen oder dem Mikrozensus schätzen
- Vergleich der fahrtweitenabhängigen oder wegezweckspezifischen Verkehrsmittelanteile mit den empirischen Werten aus Mobilitätstagebüchern oder dem Mikrozensus.

Routenwahl und Verkehrsumlegung

Die Routenwahl erfolgt in aggregierten Nachfragemodellen durch verkehrsmittelspezifische Verkehrsumlegungen. Im mIV fließt in aller Regel die belastungsabhängige Reisezeit bei der Wahl der besten Routen zwischen Quelle und Ziel ein. Es werden sowohl Strecken- als auch Knotenwiderstände berücksichtigt. In der Umlegungsberechnung wird zwischen Gleichgewichtsverfahren unterschieden, die vom rational entscheidenden Verkehrsteilnehmer ausgehen, der vollständig informiert den zeit- oder kostengünstigsten Weg findet (1. Wardrop'sches Prinzip, Nutzeroptimum) und Verfahren der stochastischen Umlegung, in denen das Postulat der vollständigen Information aufgehoben wird und damit auch weniger gute Wege mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit gewählt werden. Im GVM Region Basel wird ein Gleichgewichtsverfahren mit einer kürzesten Wegeberechnung nach Frank-Wolff verwendet. Knotenwiderstände werden im GVM Region Basel durch fixe, nicht-belastungsabhängige Zeitzuschläge berücksichtigt. Die Zeitzuschläge sind abhängig von der Abbiegerichtung (geradeaus, links, rechts) und dem Rang der Vorgänger und Nachfolgerstrecke, so dass Einbiegen einen höheren Widerstand als Abbiegen bekommt. Während in anderen aggregierten Nachfragemodellen belastungsabhängige Zeitzuschläge für Abbiegevorgänge an Knotenpunkten noch recht häufig verwendet werden, ist eine Nachbildung von Wartezeiten durch LSA in einigen Softwareprodukten (PTV Visum) zwar möglich, wird jedoch in der Praxis aufgrund des zusätzlichen Eingabeaufwandes kaum genutzt.

Die ÖV-Umlegung verwendet ebenso wie die Kfz-Umlegung eine kürzeste Wegesuche zwischen den Zellschwerpunkten für jede Quelle-Zielbeziehung. Die Verbindungssuche im ÖV nutzt bei aggregierten Modellen, wie dem GVM Region Basel, keine Kapazitätsbeschränkung. Da die Fahrzeiten nur vom Fahrplan abhängig sind, spielen belastungsabhängige Widerstände bei der ÖV-Umlegung keine Rolle. Es gibt auch aggregierte Modelle mit belastungsabhängigen Widerständen bei der Routensuche (Gentile et al., 2016), die jedoch in europäischen Verkehrsmodellen nur sehr selten eingesetzt werden. Für die Praxis wichtiger ist eine Diskussion zu taktbasierter und fahrplanbasierter Umlegung der ÖV-Nachfrage. Da die städtischen Linien in Basel sehr häufig und regelmäßig fahren (hohe Takthäufigkeit) ist eine taktbasierte ÖV-Umlegung im GVM Region Basel zulässig. Eine fahrplanfeine Umlegung sollte bei unregelmäßigen und seltenen ÖV Verbindungen eingesetzt werden. Bei der fahrplanfeinen Umlegung werden die auftretenden Wartezeiten zu Fahrtbeginn und Umstiegszeiten realistischer abgebildet als bei der taktfeinen Umlegung, da jede Verbindung einzeln nachgebildet wird. In der Regel sind fahrplanfeine Umlegungen allerdings rechenzeitintensiver als taktfeine Umlegungen, bei der nur durchschnittliche Verbindungen als Repräsentanten für weitere Verbindungen verwendet werden.

Der Kern eines ABM enthält nur die klassischen Schritte Verkehrserzeugung, Zielwahl und Verkehrsmittelwahl und wird rückgekoppelt mit einem externen Umlegungsverfahren oder einer Verkehrsflusssimulation. In den ABM Anwendungen in den USA werden verkehrsmittelfeine Nachfragematrizen erzeugt. Die MIV Fahrten können mit Gleichgewichtsverfahren oder stochastischen Verfahren umgelegt werden. Da die Nachfragematrizen nicht nur nach Verkehrsmittel, sondern auch nach Zeitpunkt meist in 30 min Zeitintervalle aufgespal-

ten werden, werden meist dynamische Umlegungsverfahren (DTA's) in den USA eingesetzt, so dass die zeitliche Komponente mit tageszeitabhängigen Richtungsüberhängen gut berücksichtigt werden. Eine genaue Abbildung von Rückstaus an Knotenpunkten unterbleibt beim Einsatz von Umlegungsmodellen für die Routenwahl in ABMs.

Durch die Verwendung von MATSim kam im ABVM Basel mit der Verkehrsflusssimulation eine andere Art der Routenwahl zum Einsatz. Statt die Agenten eines räumlichen Gebiets zu Zellen mit einem idealisierten Zellschwerpunkt zusammenzufassen, starten und enden die Wege eines Agenten in MATSim an der jeweiligen Start- und Zieladresse der Aktivitäten gemäß der synthetischen Bevölkerung. Die Routenwahl erfolgt für jeden Agenten zu seinem individuell festgelegten Startzeitpunkt und gemäß seinen spezifischen Zielkriterien der kostengünstigsten Verbindung zur Zieladresse. Im ABVM Basel wird die sogenannte «triple convergence» (Downs, 1992) eingehalten, indem die Verkehrsmittelwahl, die Wahl des Abfahrtszeitpunktes und die Routenwahl durch Iteration zu einem stabilen Gleichgewicht der Scoring Funktion geführt wird. Für den ÖV wird im ABVM Basel eine fahrplanfeine Umlegung eingesetzt, da in MATSim bisher alleinig dieses Verfahren implementiert ist und eine fahrplanbasierte Verbindungssuche der agentenbasierten Simulation entgegenkommt.

7.1.2 Unterschiede in der Organisation und Handhabung

Aufwand für Modellerstellung und Kalibrierung

Bei der Neuerstellung eines Verkehrsnachfragemodells fallen folgende Tätigkeiten an, deren Umfang vom Untersuchungsgebiet, den Fragestellungen, die an das Modell gerichtet werden, und der verfügbaren Datenlage abhängt.

1. Erstellung des Straßennetzes meist durch Übernahme vorhandener Netzgraphen wie OSM (Open Source), proprietäre Navigationsnetze von Here oder TomTom oder für Verkehrsplaner aufbereitete Navigationsnetze von PTV auf TomTom Basis. Die sehr genau verorteten Netze verfügen über Attribute, die für die Verkehrsplanung des motorisierten Individualverkehrs relevant sind wie klassifizierte Straßen, Abbiegeverbote, zulässige Verkehrsmittel und ggf. Flächennutzungsangaben und wichtige Verkehrserzeuger als POIs. In jedem Fall ist eine weitere Netzbearbeitung erforderlich, um Verkehrszellen und weitere für die Verkehrsplanung wichtige Objekte einzubauen.
2. Übernahme von ÖV-Informationen wie Linienverläufe, Fahrpläne und ggf. auch weitere Betriebsangaben (Gefäßkapazitäten, Fahrpreise, ...)
3. Übernahme von Strukturdaten und Mobilitätskennziffern für das Erzeugungsmodell; Schätzung der Erzeugungsraten; Modellaufbau
4. Aufbau und Kalibrierung des Zielwahlmodells und Verkehrsmittelwahlmodells, Schätzen der Modellparameter
5. Durchführung von Verkehrsumlegungen, Validierung des Gesamtmodells,
6. Kalibrieren des Gesamtmodells für den Basisfall anhand von Realdaten
7. Sensitivitätstests um Elastizitäten und Maßnahmensensitivität zu testen
8. Erstellen von Vorlagen (Tabellen, Grafiken) zur Wirkungsanalyse

Während die initialen Schritte 1 und 2 modellunabhängig sind, erfordert der Modellaufbau eines ABM im Vergleich zu einem aggregierten Nachfragemodell für gleiche Untersuchungsgebiete etwa 30% - 50% mehr Aufwand (siehe Experteninterviews 4.5.1). Da ein ABM mehr Teilmodelle enthält, deren Modellparameter anwendungsspezifisch geschätzt werden müssen, wird sich dieser Mehraufwand auch bei zunehmender Modellerfahrung nur schwer reduzieren lassen. Die US-amerikanischen Angaben decken sich mit den Aufwandsabschätzungen zu den beiden Basler Modellen (siehe *Tab. 19*). In dem geschätzten Mehraufwand von bis zu 50% sind noch keine Mehraufwände für das Erlernen der notwendigen Programmierkenntnisse berücksichtigt. Allerdings sind für eine reine Modellanwendung nur Grundlagen der Programmierung erforderlich.

Wartungsaufwand von Verkehrsmodellen

Softwareunterstützung

Aggregierte Verkehrsnachfragemodelle

Zur Erstellung aggregierter Nachfragemodelle steht mit den weltweit verwendeten Produkten CUBE von Citilabs, Emme von Inro, TransCAD von Caliper Corp und Visum von der PTV AG eine breite Palette an Softwarelösungen zur Verfügung. Alle Produkte enthalten Softwaremodule für

- Importieren und Editieren von Straßennetzen, ÖV-Liniennetzen und Fahrplänen
- Datenverwaltung von Ein- und Ausgangsdaten und Matrixbearbeitung für die Nachfrageberechnung
- graphischen und tabellarischen Ergebnisdarstellung sowie Wirkungsanalyse
- Verschiedene Modelle für Verkehrserzeugung, Zielwahl und Verkehrsmittelwahl
- Verschiedene Modelle für die verkehrsmittelspezifische Routenwahl (Verkehrsumlegung)
- Verschiedene Modelle für die Kalibrierung und Validierung der Verkehrsnachfrage (Maximum-Likelihood-Schätzung,...)

Obwohl die Softwareprodukte in der Regel auch Programmierschnittstellen bieten, sind für die meisten Anwendungen keine Programmierkenntnisse erforderlich, weil die benötigten Funktionalitäten bereits implementiert sind. Zur Beschleunigung wiederkehrender Tätigkeiten oder zur funktionellen Erweiterung werden jedoch Schnittstellen für Skriptsprachen für .net wie C#, F#, VBS oder andere Hochsprachen wie Python angeboten.

Aktivitätenbasierte Nachfragemodelle

Die Verwendung von Skriptsprachen setzt zwar einen größeren Kenntnisstand bei den Anwendern voraus, als die bloße Verwendung vorgegebener Programmfunktionen, bleibt jedoch weit hinter den Anforderungen zurück, ein ABM selbst zu implementieren. Auch die Verwendung von ActivitySim als der derzeit umfangreichsten Programmbibliothek für ABMs erfordert vertiefte Programmierkenntnisse, weil nicht davon ausgegangen werden kann, dass alle gewünschten Funktionalitäten für europäische Anwendungen bereits implementiert sind.

Die derzeit in ActivitySim implementierten Modelle (Association of Metropolitan Planning Organizations, 2019) enthalten verkehrsmittelspezifische Erreichbarkeitsbestimmung zwischen Quelle und Ziel, Zielwahlmodell für die Pflichtaktivitäten Ausbildung und Arbeiten mit Schattenpreisen zur Skalierung mit empirisch bestimmten Strukturdaten, Zielwahl für Sekundäraktivitäten als MNL mit LogSums, Pkw-Verfügbarkeit, Parkplatzverfügbarkeit und Parkkosten sowie im Haushaltkontext abgestimmte Aktivitätenfolge unter zeitlicher Berücksichtigung der Pflicht- und Sekundäraktivitäten sowie ein wegebasiertes Verkehrsmittelmodell unter Berücksichtigung der Verkehrsmittelverfügbarkeit. Die angegebenen Funktionalitäten benötigen zahlreiche Basismodule, die hier nicht im Einzelnen aufgeführt werden. Die Implementierung erfolgt in Python (derzeit Version 3.7) unter Nutzung von Bibliotheken wie numpy und pandas zur Beschleunigung der Berechnungen.

Eine Möglichkeit der Softwareunterstützung von ABMs bietet sich mit PTV Visum als Plattform für selbst zu entwickelnde ABM-Teilmodelle an. Im Modell SIMBA MOBi der SBB wird das ABM-Modul von PTV Visum verwendet, auf dessen Basis die ABM-Module proprietär von der SBB entwickelt wurden. Statt die Teilmodelle von Beginn an neu zu entwickeln, kann auch auf die in Python implementierten Teilmodelle aus ActivitySim zurückgegriffen werden, die ebenfalls aus der Visum-Umgebung gestartet werden können. Ein einfaches ABM mit Unterscheidung primärer und sekundärer Zielwahl und einem MNL Verkehrsmittelwahlmodell wird bereits als Python-Skript mit Visum ausgeliefert. Außerdem kann der Aufbau eines ABM auch sinnvoll durch ein aggregiertes Nachfragemodell unterstützt werden, indem die Netzbearbeitung und Datenhaltung durch bewährte Verkehrsplanungssoftware übernommen wird.

Die Kombination von selbst entwickelten ABM Teilmodellen und marktgängiger Verkehrsplanungssoftware bietet den Vorteil, eigene Modellierungsvorstellungen zur Verkehrsnachfrage umsetzen zu können, sich aber nicht um die Programmierung des Datenhandlings, der Datenanalyse oder der Datenvisualisierung kümmern zu müssen, weil auf bewährte Funktionalität zurückgegriffen wird.

7.2 Entscheidungshilfe für Einsatzbereiche

Aus den bisherigen Ausführungen geht hervor, dass die bisherigen ABMs und die aggregierten Nachfragemodelle in jeweils unterschiedlichen Bereichen ihre Stärken haben. Mit der nachfolgenden Tabelle wird eine Entscheidungshilfe für Betreiber von Verkehrsnachfragemodellen gegeben. Abhängig von den vorgesehenen Anwendungsgebieten der Modelle bietet sich in einigen Fällen eher ein aggregiertes Modell an; in anderen Fällen mag der ergänzende Einsatz eines ABM vorteilhafter sein.

Positiv zu verzeichnen ist der Zugriff auf die zeitliche Abfolge personenbezogener Aktivitäten und damit eng verknüpft Vorgaben für Verkehrsmittel und Wahl des Abfahrzeitpunktes. Nachteilig sind die mangelnden ABM Kenntnisse in Europa sowie der erhöhte Modellierungs-, Kalibrierungs- und Rechenaufwand.

In Anlehnung an SVI 2015/001 werden Verkehrsnachfragemodelle anlassbezogen entwickelt. In manchen Fällen werden bestehende Nachfragemodelle auch weiterentwickelt, um neue, bisher nicht berücksichtigte Anwendungsfälle zu unterstützen. Mit Verkehrsnachfragemodellen werden die zukünftigen verkehrlichen Wirkungen sowohl von generellen Entwicklungen wie Änderungen in der Bevölkerungsstruktur oder Siedlungsstruktur als auch von verkehrsplanerischen Maßnahmen wie Änderungen im Verkehrsangebot beurteilt.

Die folgende Tabelle enthält Entwicklungen und Maßnahmen, deren verkehrliche Wirkung mittels Modellrechnungen bewertet werden sollen. Einige der aufgeführten Maßnahmen gehören zum verkehrsplanerischen Standardrepertoire während andere Maßnahmen bisher nur selten untersucht wurden. Die Tabelle enthält eine qualitative Einschätzung der Autoren zur aktuell planerischen Bedeutung der Einsatzgebiete und die Möglichkeiten, diese mit einem ABM oder einem aggregierten Verkehrsnachfragemodell bewerten zu können. In die Beurteilung fließt auch der notwendige Modellierungsaufwand mit ein. Die Tabelle fasst die Ergebnisse aus der Literatur, die Expertenbefragung, die beiden Modellanwendungen in Basel und auch Erkenntnisse einer kürzlich in den USA veröffentlichten Studie zum Vergleich von ABM mit aggregierten Nachfragemodellen (Bernardin, 2018) zusammen.

Tab. 21 Qualitativer Vergleich der Einsatzbereiche von ABM und aggregierter Nachfragemodelle

Legende für die nachfolgenden Seiten	
Modellierbarkeit im Nachfragemodell	<ul style="list-style-type: none"> □ gar nicht oder kaum abbildbar ▣ eingeschränkt oder nur sehr aufwendig abbildbar ■ gut abbildbar
Bedeutung für die verkehrsplanerische Praxis in Mitteleuropa	<ul style="list-style-type: none"> + hohe Bedeutung mit regelmäßigen Anwendungen 0 mittlere Bedeutung mit gelegentlicher Praxisanwendung - geringe Bedeutung mit seltener Praxisanwendung

Nr.	Entwicklungen und Maßnahmen	ABM	Aggregiertes Modell	Bedeutung
Projekte mit Angebotsanpassung				
1a	<p>Verkehrsuntersuchungen zum Neubau oder Kapazitätsausweitung wichtiger Straßenachsen (Werktagsmodell)</p> <p><i>Verkehrsanalysen zu neuen oder umgebauten Straßenachsen werden häufig durchgeführt und meist mit Hilfe von werktäglichen Verkehrsnachfragemodellen bewertet. Diese klassische verkehrsplanerische Aufgabe auf Basis eines Tagesmodells lässt sich mit einem aggregierten Modell leichter als mit einem ABM abbilden. Der Zusatzaufwand für die Erstellung des ABM ist nicht gerechtfertigt, da keine für die Untersuchung relevanten Zusatzinformationen gewonnen werden.</i></p> <p><i>Sofern allerdings ein kalibriertes ABM in einer gut anwendbaren Softwareumgebung vorliegt, sind die Unterschiede zu einem aggregierten Nachfragemodell marginal, so dass sich ein ABM in diesem Fall auch für klassische Verkehrsuntersuchungen eignet, wie die zahlreichen Anwendungen amerikanischer Planungsorganisationen zeigen. Auch der Realitätstest des ABVM Basel im Vergleich zum GVM Region Basel (siehe 6.6.1) zeigt, dass ein ABM auch für Standardanwendungen einsetzbar sind, auch wenn beim ABVM bisher keine Kalibrierung auf Querschnittswerte aus Aufwandsgründen vorgenommen wurde.</i></p>	□	■	+
1b	<p>Neubau oder Kapazitätsausweitung wichtiger Straßenachsen mit Leistungsfähigkeitsanalyse (Spitzenstundenmodell)</p> <p><i>Für Leistungsfähigkeitsuntersuchungen sollten die Prognosebelastungen im Planungsgebiet auf Stundenbasis vorliegen. Hier bietet ein ABM ein besseres Potential gegenüber einem aggregierten Modell, weil über die Aktivitätenfolgen und die zeitorientierte Umlegung die unterschiedlichen Belastungszustände im Tagesverlauf direkt abgebildet werden ohne wie beim aggregierten Nachfragemodell die Gültigkeitsperiode der Nachfrage in einzelne Zeitscheiben über Stundenanteile der Nachfrage abbilden zu müssen. Bisher fehlt jedoch der Nachweis, einer Nachfragekalibrierung eines ABM über den gesamten Tagesverlauf, die nicht nur die Fahrtenanzahl, sondern auch die Routen und damit die Querschnittsbelastungen über der Zeit realitätsnah abbildet. Leistungsfähigkeitsanalysen in netzweiten Analysen sind jedoch deutlich seltener als 1a.</i></p> <p><i>Leistungsfähigkeitsanalysen beschränken sich häufig auf kleinere Untersuchungsgebiete meist mit einer begrenzten Anzahl signalisierter Knotenpunkte, deren Leistungsfähigkeit im Detail zu untersuchen ist. Für die Leistungsfähigkeitsermittlung von Knotenpunkten ist eine genaue Kenntnis der Verkehrsbelastungen für jede Abbiegebeziehung erforderlich, deren Abschätzung sowohl mit einem aggregierten Verkehrsnachfragemodell aufgrund ungenauer Spitzenstundenabschätzungen als auch mit einem ABM aufgrund der bisher nur selten implementierten Knotenpunktsteuerungen (Vorfahrt geregelt oder mittels Lichtzeichenanlagen) mit Ungenauigkeiten behaftet ist. Abhilfe kann hier die Verwendung eines ABM mit MATSim Verkehrsflusssimulation und Lichtsignalsteuerung schaffen (Kühnel et al., 2018) unter der Voraussetzung, dass die zeitliche Abfolge der Touren auch im räumlich begrenzten Teilmodell realistisch kalibriert wurde.</i></p>	□	□	0
2a	<p>Liniennetzplanung im ÖV</p> <p><i>Die klassische ÖV Liniennetzplanung wird mit Tagesmodellen oder als Verkehrstagesmodellen (z.B. 05:00 – 04:00 Folgetag) erstellt. Die Tagesnachfrage wird bei detaillierteren aggregierten Modellen über eine angenommene Ankunftsverteilung an der Starthaltestelle oder stundenfeine Nachfragematrizen aufgeteilt, um mit einer fahrplanfeinen Umlegung die Fahrzeugauslastungen über den Tagesverlauf abbilden zu können. Bei einem ABM ist die Wahl des Abfahrtszeitpunktes das Ergebnis des Aktivitätenplans und kann damit realistischer als beim aggregierten Modell die Rückkopplung zwischen Verkehrsangebot und der individuellen Tagesplanung abbilden. Dieser Zusatznutzen eines ABM gegenüber der statischen Nachfragematrix aus einem aggregierten Modell kommt aber nur zur Geltung, wenn die Auslastung einzelner ÖV-Linien auf Kursebene über den Tagesablauf betrachtet werden soll. Falls nur der Modal Split in multimodalen Tagesmodellen abgeschätzt werden soll, wird sich der zusätzliche Erstellungsaufwand für ein ABM nicht rechtfertigen lassen.</i></p> <p><i>Je detaillierter jedoch die ÖV Liniennetzplanungen ausfallen, desto eher ist der Einsatz eines ABM in der ÖV Liniennetzplanung gerechtfertigt. Zusammen mit einem Verkehrsflussmodell wie MATSim zur Routenwahl können Ankunftszeitverteilungen über den Tagesverlauf an der Starthaltestelle und Kapazitätsgrenzen in einem ABM einfacher berücksichtigt werden als in einem aggregierten Modell. Beim Einsatz von aggregierten Modellen für diese erhöhten Anforderungen ist in jedem Fall statt einer taktfeinen ÖV-Umlegung eine fahrplanfeine Umlegung notwendig. Rein aus der Anwendung beim ABVM und dem GVM Region Basel mit einer Taktverdichtung (0) ist nicht ersichtlich, dass eines der beiden Verfahren für diesen Anwendungsfall klare Vorteile bringt, da beide Ansätze die gestellte Aufgabe lösen können. Die dort festgestellten Unterschiede in den resultierenden Linienbelastungen sind sowohl nachfrageseitig als auch durch die Anwendung unterschiedlicher Umlegungsverfahren begründbar.</i></p>	■	■	+

Nr.	Entwicklungen und Maßnahmen	ABM	Aggregiertes Modell	Bedeutung
Projekte mit Angebotsanpassung (Fortsetzung)				
2b	<p>ÖV Studien mit Dimensionierung des Fahrzeugeinsatzes</p> <p><i>Wenn in der klassischen ÖV Liniennetzplanung auch der Fahrzeugeinsatz geplant wird, müssen auf der Angebotsseite Fahrzeugkapazitäten und nachfrageseitig die Fahrtwünsche im Tagesverlauf realitätsnah abgebildet werden. Diese Anforderung kann in beiden Modellansätzen umgesetzt werden, erfordert aber bei beiden sowohl einen hohen Kalibrierungsaufwand für die zeitlich variable Verkehrsnachfrage als auch für die Versorgung der dynamischen ÖV-Umlegung (aggregiertes Modell) bzw. die ÖV-Simulation im ABM. Die Aussage stützt sich auf Erfahrungen der SBB, die für die Bahnmodellierung ein zeitdynamisches aggregiertes Modell und für die Modellierung des Busverkehrs ein ABM einsetzt..</i></p>	□	□	0
2c	<p>Liniennetzplanung im ÖV unter Berücksichtigung unterschiedlicher Tarifmodelle</p> <p><i>Gegenüber dem häufigen Fall der reinen Liniennetzplanung aus 2a kommt bei diesem Einsatzbereich noch erschwerend hinzu, dass nicht nur das Nachfragepotential für unterschiedliche ÖV-Linienverläufe und Takthäufigkeiten, sondern auch Tarifmodelle getestet werden. Da die potentiellen Fahrgäste unterschiedlich auf Fahrpreisänderungen reagieren, muss das Nachfragemodell gleichzeitig auf Angebotsänderungen und Preisänderungen reagieren können. Da Preise ggf. auch tageszeitlich variabel ausfallen können (z.B. Tagesticket außerhalb der Morgenspitze), ergeben sich für diese gelegentliche Anwendung durch die explizite Berücksichtigung der Zeit in der Aktivitätenfolge theoretische Vorteile für ein ABM. Es wird sowohl die zeitliche Dimension mit der Wahl des Abfahrtszeitpunktes als auch die personenbezogene Preiselastizität eines ABM benötigt ohne dass die Erfüllung dieser komplexen Aufgabenstellung bisher nachgewiesen wurde.</i></p>	□	□	0

Nr.	Entwicklungen und Maßnahmen	ABM	Aggregiertes Modell	Bedeutung
Projekte mit Angebotsanpassung				
3	<p data-bbox="349 302 635 329">Bau von Park & Ride Anlagen</p> <p data-bbox="387 340 1410 553"><i>Die Modellierung von P&R-Anlagen erfordert die Abbildung intermodaler Wege, die durch mehrere Etappen und unterschiedliche Verkehrsmittel gekennzeichnet sind. Wie das Beispiel GVM Region Basel zeigt, gibt es in aggregierten Modellen für diese Modellierungsaufgabe mit der Definition einer begrenzten Anzahl von Umsteigepunkten und einer k-kürzesten Wegesuche eine Lösungsmöglichkeit. Einschränkungen in der Modellierungsgenauigkeit von P&R-Anlagen werden bei den Kapazitätsbeschränkungen gesehen. Sofern die Parkplatzauslastung aufgrund von Beobachtungen bekannt ist, können diese über Randsummen gut abgebildet werden. Bei Prognoseberechnungen ist die P&R-Nutzung eine unbekannte Größe, die in aggregierten Modellen kaum erklärt werden kann.</i></p> <p data-bbox="387 566 1410 779"><i>Aufgrund der durchgängigen personenbezogenen Wegeketten in einem ABM gekoppelt mit einer tourbasierten Wegewahl bietet ein ABM für diesen Anwendungsfall methodische Vorteile gegenüber einem aggregierten Modell, die allerdings recht aufwändig kalibriert werden müssen. In ActivitySim werden P&R-Anlagen bereits über «Intermediate Stopps» abgebildet, so dass auch Anwendungserfahrungen vorliegen. Die SBB hat mit SIMBA MOBi P&R ebenfalls abgebildet. In der tourbasierten Umlegung von Visum 21+ können P&R-Anlagen ebenfalls als Zwischenpunkte für einen Verkehrsmittelwechsel verwendet werden. Sowohl mit aggregierten Nachfragemodellen als auch mit einem ABM kann P&R abgebildet werden, wobei unabhängig vom Modelltyp hohe Anforderungen an die Modellierungskenntnisse gestellt werden.</i></p>	□	□	0
4	<p data-bbox="349 801 906 828">Bau von Verkehrsanlagen für Veloverkehr oder Fußgänger</p> <p data-bbox="387 840 1410 1451"><i>In überregionalen oder regionalen Verkehrsmodellen wird der nicht-motorisierte Verkehr eher stiefmütterlich behandelt. Aufgrund der Verkehrszellengröße und geringen Fahrtweiten besteht bisher auch kaum die Notwendigkeit, diese Verkehre in der Verkehrsplanung besonders zu berücksichtigen. In vielen regionalen Modellen werden diese Verkehre allerdings in der Nachfrageberechnung zur Bestimmung des Modal Splits berücksichtigt, ohne jedoch die Qualität der Verkehrsanlagen im Detail einzubeziehen. Es sind bisher auch wenige Untersuchungen bekannt, in denen der verkehrsmittelspezifische Nutzen für den Veloverkehr in Abhängigkeit der Verkehrsanlagen gestellt wurde, wie es für den ÖV und mIV über die funktionalen Verkehrsnetze üblich ist. Mit der zunehmenden Bedeutung des Veloverkehrs in der Verkehrsplanung wächst der Bedarf an detaillierten Verkehrsmodellen, die auch Zielwahl und Routenwahl von Veloverkehrern genauer als bisher abbilden. Dies betrifft sowohl angebotsseitig die genauere Abbildung von Qualitätsmerkmalen der Verkehrsanlagen statt einer pauschalen Reisegeschwindigkeit als auch nachfrageseitig in der Nutzenfunktion für Velofahrten zusätzliche Komponenten wie die Infrastrukturansprüche verschiedener Nutzergruppen, Gesundheitsaspekte oder in der Routenwahl Sicherheit und Komfort der Verkehrsanlagen. Zu agentenbasierten Modellen, in denen einzelne Personen und ihre individuelle Routenwahl modelliert werden, gibt es bereits einige Forschungen und mehrere Implementierungen in MATSim (Ziemke et al., 2017) aber auch mit anderen agentenbasierten Modellen (Kaziyeva et al., 2018), in denen individuelles Verhalten abgebildet wird. In der Kopplung eines ABM in sehr feiner räumlicher Auflösung, wie sie durch eine synthetische Population gegeben ist, mit einer genauen Modellierung der Verkehrsnetze und einer agentenbasierten Verkehrsflusssimulation sind Velo- und Fußgängerverkehre sicherlich besser abbildbar als mit herkömmlichen aggregierten Nachfragemodellen ohne jedoch auch sekundäre Effekte wie Gesundheitsaspekte zu berücksichtigen. Allerdings sind diese Anwendungen in der bisherigen Planungspraxis der Verkehrsmodellierung bisher eher selten anzutreffen; Anwendungen zur «Aktiven Mobilität» gewinnen aber aktuell an Bedeutung. .</i></p>	■	□	-

Nr.	Entwicklungen und Maßnahmen	ABM	Aggregiertes Modell	Bedeutung
Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen				
5	Kosten-Nutzen Analysen (aktuell) <i>Für die Beurteilung großer Infrastrukturmaßnahmen werden Kosten-Nutzen-Analysen (KNA) nach einem standardisierten Verfahren angefertigt. Verkehrsmodelle bilden eine wesentliche Grundlage zur Ermittlung angebots- und nachfrageseitiger Daten in der Prognose für den Referenzfall und die Planfälle. Für die Beurteilung der Kosten werden aus dem Verkehrsmodell Daten wie Streckenlängen, Netzlängen, Servicekilometer im ÖV und nachfrageseitig gebietsbezogene Fahrzeugkilometer und Personenkilometer verwendet. Da diese Daten meist in aggregierter Form auf Tagesbasis benötigt werden, sind gut kalibrierte aggregierte, bi-modale Verkehrsnachfragemodelle völlig ausreichend und bisher die bessere Wahl als ein aufwändiges ABM, dessen Zusatzaufwand als Grundlage einer KNA nicht benötigt wird.</i>	□	■	+
6	Kosten-Nutzen Analysen differenziert nach Personengruppen <i>In Ländern mit einem wesentlich schlechteren Zugang zu einem leistbaren öffentlichen Verkehr als in Europa und speziell der Schweiz werden gesellschaftspolitische Aspekte wie Gerechtigkeit (equity) in die Bewertung des Nutzens und der Kosten von Infrastrukturmaßnahmen einbezogen, um die Fairness verkehrplanerischer Maßnahmen zu berücksichtigen. In der Schweiz spielen Aspekte der sozialen Gerechtigkeit von Verkehrssystemen in der Modellierung nur eine geringe Rolle aber eine Differenzierung nach Personengruppen kann auch für die Bewertung von Verkehrssystemen künftig an Bedeutung gewinnen. Da die Nachfrage mit Zielwahl, Verkehrsmittelwahl und Wahl des Abfahrtszeitpunktes hochgradig von den sozioökonomischen Parametern der Personengruppen abhängt, handelt es sich bei zeitlich differenzierten Systembetrachtungen um Effekte, die auch in der Schweiz relevant werden können. Beispiele dazu sind die Nachfrageuntersuchungen nach unterschiedlichen Kundensegmenten bei der SBB. An die Modellierung werden dann Anforderungen gestellt, zurückgelegte Wege nach sozialer Herkunft und Einkommensklassen zu unterscheiden. Eine Unterscheidung nach Einkommensklassen und verhaltenshomogenen Gruppen mit gruppenspezifischem Zugang zu Verkehrsmitteln und Zielwahl ist in aggregierten Nachfragemodellen nur mit erhöhtem Aufwand möglich. Auch die Berücksichtigung von Wegen im Haushaltskontext (gemeinsame Fahrten, Bringen&Holen auf Teilwegen) spricht für den Einsatz eines ABM. Für diese «equity»-Untersuchungen wurden ABMs in den USA bereits erfolgreich eingesetzt.</i>	■	□	-
7	Mobility Pricing <i>Beim Mobility Pricing werden monetäre Anreize zur Beeinflussung des Mobilitätsverhaltens gesetzt. Im mIV werden zeitlich und räumlich variable Straßenbenutzungsgebühren in Abhängigkeit der Straßenauslastung erhoben. Diskutiert und modelliert werden unterschiedliche Kostenmodelle, die zwischen einer Korridor-maut und fahrleistungsabhängigen Gebühren variieren können.</i> <i>Durch die Rückkopplung zwischen Routenwahl, Wahl des Abfahrtszeitpunktes, Verkehrsmittelwahl und Zielwahl zusammen mit den Zeitvorgaben der Aktivitätenfolge ist Mobility Pricing im ABM modelltheoretisch genauer abbildbar als in einem aggregierten Modell ohne Zeitachse. Wenn im aggregierten Modell die Nachfrage der Quell-Ziel-Gruppen auch zeitlich gestaffelt vorliegen, reduzieren sich die Vorteile eines ABM. Dennoch verbleiben Vorteile für das ABM, wenn es auf einer synthetischen Bevölkerung aufsetzt. Da jeder Person ein eindeutiges Einkommen hinterlegt ist, können einkommensspezifische Nutzenfunktionen für die Verkehrsmittelwahl und Wahl des Abfahrtszeitpunktes genutzt werden unter der Voraussetzung, dass die Parameter der gruppenbezogenen Nutzenfunktionen auch anhand empirischer Daten wie bei der Erstellung der synthetischen Bevölkerung (Weis et al., 2017) geschätzt wurden. Allerdings liegt die wesentliche Schwierigkeit beim Mobility Pricing in der Schätzung der Zahlungsbereitschaft, da in den meisten Fällen hypothetisches Verhalten über Stated-Preference Befragungen geschätzt werden muss. Auch wenn diese Zahlungsbereitschaft fahrzweckspezifisch und personengruppenbezogen modelliert werden kann, verbleibt die wesentliche Schwierigkeit einer verlässlichen Parameterschätzung der Zahlungsbereitschaft unabhängig von der Modellwahl.</i> <i>Obwohl in dem Mautszenario (6.7.2) mit einer fixen Kordon-maut nur ein Teil der Maßnahmen eines Mobility Pricing modelliert wurden, sind die Vorteile eines ABM bei diesem vereinfachten Beispiel bereits erkennbar. In einem ABM sind Kosten bereits Bestandteil der Nutzenfunktionen und aufgrund der expliziten Zeitachse werden tageszeitabhängige Stauerscheinungen mit Rückkopplung auf die Wahl des Abfahrtszeitpunktes ebenfalls explizit ohne zusätzlichen Modellierungsaufwand berücksichtigt. Aufgrund fehlender empirisch belegbarer Parameter zur Zahlungsbereitschaft in Abhängigkeit von Personengruppe und Aktivität oder Fahrzweck ist die Modellierung von Mobility Pricing mit beiden Modellansätzen bisher schwierig und aufwendig. Anwendungen von Mobility Pricing gibt es sowohl mit ABM (Müller et al., 2021) als auch mit aggregierten Modellen wie z.B. im erweiterten Kantonsmodell von Zug (Infras et al., 2019).</i>	□	□	0

Nr.	Entwicklungen und Maßnahmen	ABM	Aggregiertes Modell	Bedeutung
Projekte mit Nachfrageanpassung				
8	<p>Raumplanung und Siedlungsentwicklung</p> <p><i>Ein häufiges Einsatzgebiet aggregierter Verkehrsnachfragemodelle sind Studien zur Raumplanung aufgrund der Wechselwirkungen zwischen Raumentwicklung und Mobilität. Schaffung neuer Wohn- oder Gewerbegebiete sowie Verlagerung von Wohnraum, Gewerbegebieten oder Einkaufszentren hat direkte Auswirkungen auf die Ziel- und Verkehrsmittelwahl der betroffenen Personen. Dabei kommt es kurzfristig zu Verlagerungen der sekundären Aktivitätsziele Freizeit und Einkaufen. Mittelfristig ändern sich auch die primären Ziele Wohnen, Ausbildung und Arbeit in jeweiliger Abhängigkeit der ursächlichen Änderungen.</i></p> <p><i>Bei einer ABM-systemimmanenten Unterscheidung in primäre und sekundäre Ziele müsste ein ABM die zeitliche Entwicklung der Mobilitätsänderungen besser abbilden können als ein aggregiertes Nachfragemodell. Auch wird der Mobilitätswerkzeugbesitz auf Personenebene in Abhängigkeit räumlicher Variablen beschrieben und hat damit einen Einfluss auf die Ziel- und Verkehrsmittelwahl der gesamten Aktivitätenkette. Im Szenario zur Flächennutzung konnte das ABM diese potentiellen Vorteile nicht zeigen. Auf einen Zeitpunkt bezogen sind die Unterschiede zwischen beiden Modellansätzen weniger vom gewählten Modelltyp als vom Aufwand abhängig, der in die jeweilige Modellkalibrierung gesteckt wurde. Da das GVM Region Basel besser an die Distanzverteilung des Zensus angepasst wurde, folgt es bei dem Szenario zur Flächennutzung etwas besser dem Zensus (siehe Kap.). Der Zusatzaufwand eines ABM erscheint daher für Anwendungen zur Siedlungsentwicklung nicht gerechtfertigt, um von einem aggregierten Modell zu einem ABM zu wechseln. Allerdings kann ein bestehendes ABM sehr wohl auch für diese Planungszwecke eingesetzt werden.</i></p>	□	■	+
9	<p>Homeoffice</p> <p><i>Die Auswirkungen einer verstärkten Nutzung des Homeoffice für einen Teil der beschäftigten Bevölkerung ist für ein ABM grundsätzlich einfacher handhabbar als für ein aggregiertes Nachfragemodell. Über die synthetische Bevölkerung werden Personen mit Homeoffice-Möglichkeit leicht von Beschäftigten separiert, deren physische Anwesenheit am Arbeitsplatz wie im produzierenden Gewerbe erforderlich ist. Auch ist die Änderung der Wegeketten einfacher als in einem aggregierten Modell, bei dem die sonstigen Wege (non-home based) als Wege vom Wohnort neu kodiert werden müssen. Über die Güte der beiden Modellansätze können bisher keine Aussagen getroffen werden, da empirische Daten zu diesem neuen Massenphänomen noch nicht vorliegen. Eine plausible Abbildung von Homeoffice mit Ausnahme eines Lockdowns scheint in beiden Modellansätzen möglich zu sein. In dem Anwendungsfall 6.7.3 zeigt sich jedoch, dass sich selbst ohne personengruppenspezifische Unterscheidung das Homeoffice im ABM einfacher als im GVM abbilden lässt, da sich die Zielwahl der sekundären Aktivitäten ohne Änderungsaufwand automatisch ergibt.</i></p>	■	□	0

Nr	Entwicklungen und Maßnahmen	ABM	Aggregiertes Modell	Bedeutung
Zukunftsthemen				
10	Vehicle Sharing <i>Die Fahrzeugnutzung statt der Fahrzeugbesitz ist den derzeitigen Bestrebungen des Mobility-as-a-Service (MaaS) zuzuordnen. Nicht nur Pkw, sondern auch Velo oder Roller werden von Flottenbetreibern zur Nutzung zur Verfügung gestellt. Die kostenpflichtige Nutzung wird zeit- und/oder entfernungsabhängig abgerechnet. Unterschieden wird stationsbasierten und «free-floating» Systemen, bei denen die Fahrzeuge an beliebigen Orten innerhalb eines Bedienungsgebietes abgestellt werden können. Mit einigen Modellierungstricks lassen sich diese Mobilitätsformen auch in einem aggregierten Nachfragemodell über Sonderformen des öffentlichen Verkehrs abbilden (Friedrich et al., 2019). Auch in einem ABM sind zusammen mit einem Verkehrsflussmodell (MATSim) Erweiterungen notwendig, um die unterschiedlichen Ausprägungen des Vehicle Sharing möglichst genau zu modellieren (Ayed et al., 2015). Aufgrund des Personenbezugs mit allen charakteristischen Merkmalen wie Einkommen, Haushaltskontext und der verfügbaren Mobilitätswerkzeuge ist die Berücksichtigung der Fahrzeugnutzung als eine der möglichen Verkehrsmittelalternativen über personenbezogene Nutzenfunktionen einfacher möglich als in einem aggregierten Modell. Dennoch sind Vehicle Sharing Angebote in keinem der Nachfragemodelle bisher ohne intensive manuelle Tätigkeiten oder Skriptprogrammierung möglich.</i>	□	□	0
11	Ridesharing <i>Beim Ridesharing steht nicht das Fahrzeug alleinigen anderen Verkehrsteilnehmern zur Verfügung, sondern es wird ein Fahrtangebot bereitgestellt. Wegen der Möglichkeit Aktivitätenfolgen von Personen zeitlich zu synchronisieren (z.B. Bringen/Holen von Personen eines Haushalts) bieten agentenorientierte Ansätze Vorteile gegenüber eines aggregierten Nachfragemodells, bei denen die einzelnen Quelle-Ziel-Paare ohne gegenseitigen Bezug modelliert werden. Für ein ABM ist Ridesharing einfacher als ein Vehicle Sharing zu modellieren, weil die zusätzliche Komplexität fixer kapazitätsbeschränkter Stationen entfällt. Ein ABM gekoppelt mit einer agentenbasierten Simulation wie MATSim bietet gegenüber den aggregierten Ansätzen der Vorteil, dass die einzelnen Touren jedes virtuell Reisenden modelliert wird. Es existieren bereits einige MATSim Anwendungen zum Ridesharing (Hörl, Becker, et al., 2018b). Auch mit einem aggregierten Ansatz ist die Modellierung von Ridesharing mit erhöhtem Aufwand möglich, wie die Studie des VBZ zum Ridesharing und On-Demand unter Einsatz von PTV Visum zeigt.</i>	■	□	-
12	Elektromobilität <i>Obwohl Elektromobilität bereits aktuell und in Zukunft verstärkt an Bedeutung gewinnt, ist es kein Thema, das typischerweise in Verkehrsnachfragemodellen behandelt wird. In den Verkehrsmittelwahlmodellen wird der Nutzen eines Kfz über beschreibende Merkmale abgebildet; es wird dabei nicht zwischen Kfz mit konventionellem oder Elektroantrieb unterschieden. Bisher existieren ökonomische Modelle, in denen die unterschiedlichen Kostenkomponenten, legislative Restriktionen (z.B. CO2-Grenzwerte pro km), Reichweiten und Lademöglichkeiten der Antriebsarten berücksichtigt werden. Eine Verknüpfung der Nachfragemodelle mit den ökonomischen Modellen zur Abschätzung des Verkehrsaufkommens durch Elektrofahrzeuge wird von den Autoren bisher nicht gesehen, so dass beide Modellansätze für diesen bisher auch seltenen Anwendungsfall keinen nennenswerten Beitrag liefern mit wenigen forschungsnahen Untersuchungen (aggregiertes Nachfragemodell Stuttgart (Ritz, 2019) oder agentenbasiert (Haan de et al., 2020)).</i>	□	□	-

7.3 Reifegrad der Softwareprodukte

Der Zustand von ABMs in Europa ähnelt dem Zustand des 4-Stufen Algorithmus bis Mitte der 80-iger Jahre des letzten Jahrtausends; während die Theorie zum 4-Stufenalgorithmus bereits in den 50iger Jahren vorgestellt wurden, fehlten verfügbare Softwareprodukte, um konkrete Anwendungen rechnen zu können. Forschungseinrichtungen und einige Ingenieurbüros hatten bis dahin mit einem erheblichen Aufwand proprietäre Lösungen auf eigenen Datenverarbeitungsanlagen implementiert. Seit knapp 40 Jahren wird die Modellierungsarbeit durch die bekannten kommerziellen Softwareprodukte für Verkehrsplaner erheblich vereinfacht.

Mittlerweile sind zwar Hardware und Programmierumgebungen wesentlich besser verfügbar, aber dennoch wurden ABMs bisher meist anwendungsspezifisch entwickelt. Mit der Entwicklung von ActivitySim in den USA wurde erstmalig, und bisher auch vielversprechend, der Weg beschritten, die Implementierung von ABM Modellen zu generalisieren und nur ortsspezifische Merkmale über Parameterkalibrierung anzupassen. Mit der finanziellen

Unterstützung von derzeit 8 US-amerikanischen Planungsregionen wie den bereits erwähnten ARC (Atlanta Regional Council) und SEMCOG (Southeastern Michigan Council of Government, Detroit) aber auch Regionen mit einem höheren Anteil an ÖV Fahrten und zahlreichen Optionen in der Verkehrsmittelwahl wie SFMTA (San Francisco Municipal Transport Agency) hat ActivitySim bereits einige überzeugte Anwender gefunden. Gerade die Anwendungen von SFMTA sind von europäischen Anwendungsanforderungen nicht so weit entfernt. Mit einem empirisch belegten Radverkehrsanteil im Jahr 2018 von 4% (SFMTA, 2019) und einem ÖV-Anteil von knapp 30% sowie einem breiten Angebot an Shared Mobility (Velo- und Scooter-Verleihsysteme, Ride Sharing Angebote) beschränkt sich diese ABM Anwendung nicht auf die sonst in den USA dominierende Rolle der Modellierung des mIV.

In den USA wird ActivitySim von den regionalen Planungsorganisationen meist mit traditioneller Verkehrsplanungssoftware für die Verkehrsumlegung und Wirkungsanalyse verwendet. Dazu werden die Ergebnisse vom ABM in verkehrsmittelfeinen Nachfrage- und Bewertungsmatrizen im OMX-Format ausgegeben. Diese Matrizen werden für anschließende statische oder dynamische Umlegungsverfahren (DTA) meist mit kommerzieller Verkehrsplanungssoftware verwendet.

Im ABVM Basel wird nicht auf Matrizen aggregiert, sondern direkt mit den adressscharfen Touren ohne Zonenaggregation gearbeitet, indem die Verkehrsmittelwahl, die Wahl des Abfahrtszeitpunktes und die Routenwahl mit der agentenbasierten Verkehrsflusssimulation von MATSim durchgeführt wird. Die open Source Software MATSim verfügt zwar nicht über ein vollständiges grafisches Benutzerinterface, um eigene Modelle auch ohne Programmierkenntnisse erstellen und betreiben zu können, ist aber aufgrund der großen weltweiten Verbreitung in der Wissenschaft bereits sehr gut getestet. Es soll aber an dieser Stelle betont werden, dass MATSim alleinig kein vollständiges ABM ist, sondern nur die Schritte Wahl des Abfahrtszeitpunktes, Verkehrsmittelwahl und Routenwahl durchführt. Die Verkehrszeugung und Zielwahl in einer Aktivitätenfolge muss in separaten Arbeitsschritten übernommen werden.

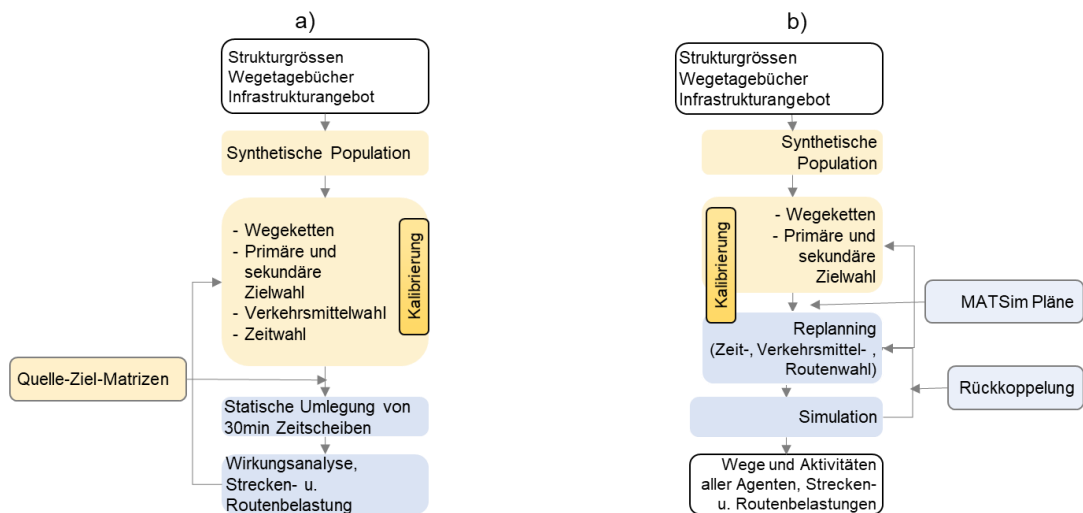


Abb. 74 ABM gekoppelt mit Umlegungsmodellen (a) oder mit einer Verkehrssimulation wie MATSim (b); im ABVM Basel wurde der Modellansatz (b) gewählt

Auch kommerzielle Verkehrsplanungssoftware wie Emme/Dynameq (Inro), TransCAD (Calliper) oder Visum (PTV AG) bieten bereits in ihren aktuellen Versionen Schnittstellen zur direkten Einbindung eines ABM. Ab Visum 2021 können die adressscharfen Daten einer synthetischen Bevölkerung als Standorte ebenso wie Touren bestehend aus mehreren Fahrten mit Etappen verwaltet werden. Ein ABM kann in dem Verfahrensablauf als Nachfragemodell ausgewählt werden, wobei nur einfache MNL-Modelle als Python-Skripte für die primäre und sekundäre Zielwahl sowie die Verkehrsmittelwahl bereitgestellt werden. Es wird erwartet, dass Modellersteller die Skripte gemäß ihren Anforderungen erweitern oder gänzlich neu entwickeln und mit geeigneten Modellparametern versorgen. Allerdings

ist es hilfreich, dass der Anwender bereits jetzt die grafische Bedienoberfläche auch für ein ABM nutzen kann wie z.B. Erstellung der Touren in Listen oder grafische Darstellung sowie alle GIS-orientierten Analysen zur Wirkungsanalyse. Noch haben die öffentlich verfügbaren ABM Skripte in den kommerziellen Verkehrsplanungsprogrammen nicht den gleichen Reifegrad wie die aggregierten Nachfragemodelle aber bei einer verstärkten Nutzung der Skripte ist mit einer Übernahme dieser Module in eine anwenderfreundliche Bedienoberfläche zu rechnen.

7.4 Reifegrad von ABM

Mit der Anwendung des ABVM Basel (Kap. 6) wurde beispielhaft gezeigt, dass mit einem ABM spezifische Fragen, die bisher von einem aggregierten Verkehrsnachfragemodell beantwortet werden, auch durch ein ABM gelöst werden können. Eine Praxisanwendung erfordert eine Kalibrierung des Basisfalls an empirischen Daten (z.B. Querschnittsbelastungen). Dieser Modellschritt ist im Fall des ABVM Basel aus Aufwandsgründen nicht ausreichend durchgeführt worden. In manchen Fällen, insbesondere bei der Beantwortung von Fragen im Zusammenhang mit personenspezifischen Merkmalen oder Aufgaben mit einer starken Zeitdynamik, kann sich der Einsatz von ABM bereits trotz eines Mehraufwands bei Modellerstellung und Kalibrierung als vorteilhaft erweisen. Da der Aufbau eines ABM in Europa bisher meist im Forschungsumfeld oder innerhalb von Institutionen mit mehreren gut geschulten Modellierern erfolgt, fehlt bisher sowohl die ABM-Expertise in der allgemeinen Planungspraxis als auch Planungspraxis unter den Forschenden.

Es wird mutmaßlich noch mehrere Jahre dauern, bis alle Hindernisse und Schwierigkeiten mit einem ABM überwunden sind, so dass Schweizer Modellbetreiber wie der Bund oder Kantone in der Lage sind, ein ABM für standardmäßige planerische Anwendungen zu betreiben.

Während die modelltheoretischen Grundlagen für den Aufbau eines ABM vorliegen, mangelt es bisher an empirischen Studien zur Schätzung von Modellparametern. Mehrfach wurde in dieser Studie auf den erhöhten Kalibrierungsaufwand eines ABM gegenüber aggregierten Nachfragemodellen hingewiesen. Durch die Modellierung personenspezifischer Aktivitätsfolgen mit einer Zeitwahl zur Aktivitätendurchführung ergeben sich zusätzliche Modellkomponenten bei der Ziel- und Verkehrsmittelwahl, für deren Parameter bisher keine verlässlichen empirischen Schätzungen vorliegen.

In den USA haben sich die Verkehrsplanungsabteilungen mehrerer Ballungsräume zu einer Interessensgemeinschaft zusammengesetzt, um eine praxisorientierte Weiterentwicklung von ABM gemeinsam zu forcieren. Diese Initiative hat sich gebildet, nachdem einige Planungsgemeinschaften den Wechsel von einem aggregierten Nachfragemodell auf ein ABM vollzogen haben. Eine vergleichbare Initiative in der Schweiz oder gar gemeinsam mit anderen mitteleuropäischen Ländern und vergleichbaren Planungsanforderungen fehlt bisher.

Für die Wahl des Umlungs- oder Routenwahlmodells existieren für ein ABM mit konventionellen Umlungsmodellen oder einer Verkehrssimulation bereits zwei Ansätze, die bereits beide ausreichend erprobt wurden. Für eine Kopplung mit traditionellen Umlungsmodellen spricht der geringere Implementierungsaufwand und die Robustheit der Umlungsergebnisse bei geringen Eingabeänderungen. In der Einbettung eines ABM in ein MATSim Modell ergeben sich Vorteile, da die *triple convergence* (Zeitwahl, Verkehrsmittelwahl, Routenwahl) auf allen drei Ebenen aufgrund der Rückkopplung möglich und bereits eingesetzt wurde. Die Ergebnisse der stochastischen Umlung weisen bei kleineren Eingabeänderungen eine höhere Varianz auf und die Rechenzeit ist in der Regel deutlich höher als bei der Kopplung mit Umlungsmodellen, die standardmäßig deterministische Umlungsalgorithmen einsetzen.

Während die Marktreife eines ABM für Standardanwendungen eines Nachfragemodells bereits gegeben ist, sind bei komplexen Anwendungen wie SIMBA-MOBi Einzelanfertigungen durch erfahrene Modellierer notwendig. Mit den umfangreichen Funktionalitäten rund um MATSim und dem guten empirischen Datenmaterial in der Schweiz können aus den

Wegekettens allerdings bereits jetzt gut kalibrierte Regelanwendungen mit einem ABM erstellt werden. Bei regional umfassenden Projektanwendungen mit einer großen Einwohneranzahl und einer entsprechend großen Menge an zu simulierenden Agenten entstehen jedoch hohe Hardwareanforderungen. Während der Rechenaufwand in einem traditionellen Verkehrsnachfragemodell direkt mit der Verkehrszellenanzahl korreliert, wächst der Rechenaufwand bei einem ABM mit der Anzahl der modellierten Personen. Für ein regionales ABM Modell (z.B. Kantonebene) sollten mindestens 10% der Bevölkerung in dem ABM simuliert werden, um stabile Ergebnisse auch auf der Ebene unterschiedlicher verhaltenshomogener Gruppen erzielen zu können (Llorca & Moeckel, 2019).

7.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die grundsätzliche Anwendbarkeit eines ABM für allgemeine Modellierungsaufgaben konnte mit den beispielhaften Anwendungen in Basel nachgewiesen werden. Die Untersuchungen der Nachfrageberechnung und die beispielhaften Anwendungen eines ABM und eines aggregierten Modells für den Großraum Basel haben gezeigt, dass beide Modelle die erforderlichen Funktionalitäten erfüllt haben. Die Kalibrierungsmöglichkeiten für das GVM Region Basel sind etabliert, so dass im ABVM Basel nur die grundlegenden Tendenzen beispielhaft richtig abgebildet werden konnten ohne im Detail die Ergebnisse des aggregierten Modells zu reproduzieren. Eine Kalibrierung aller Teilmodelle des ABVM Basel war aus Aufwandsgründen innerhalb dieser Untersuchung nicht möglich. Hierbei offenbart sich auch eines der wesentlichen Probleme, die die Einführung eines ABM erschweren. Aufgrund der jahrzehntelangen Tradition aggregierter Verkehrsnachfragemodelle sind in den zahlreichen empirischen Untersuchungen Modellparameter der Wahlmodelle für verhaltenshomogene Gruppen und Fahrtzwecke bestimmt worden. Personenspezifische Modellschätzungen speziell für tourbasierte Wege liegen für die Schweiz nicht vor.

In den USA haben einige Planungsorganisationen ihre aggregierten Nachfragemodelle durch ABM Modelle ersetzt, um eine methodisch konsistente Beschreibung der Verkehrsnachfrage und des Verkehrsverhaltens zu ermöglichen, da während jedes Modellschritts personenbezogen auf die soziodemografischen Variablen zugegriffen wird. In aggregierten Modellen hingegen werden verhaltenshomogene Gruppen gebildet, bei denen einzelne wichtige Entscheidungsparameter durch die Aggregation verloren gehen können. Die Erfahrung in den USA zeigt, dass aktivitätenbasierte Verkehrsmodelle in der Praxis erfolgreich eingeführt werden konnten und dabei denselben Anforderungen bezüglich Sensitivität und Genauigkeit genügen wie aggregierte Modelle. Im Vergleich zu einem aggregierten Ansatz wird der Zusatzaufwand für ein ABM durch die größere Flexibilität zur Beantwortung vielfältiger Fragestellungen gerechtfertigt.

Bei aggregierten Nachfragemodellen werden als Ergebnis der Ziel- und Verkehrsmittelwahl verkehrsmittelspezifische Quell-Ziel-Matrizen auf der Ebene von Verkehrszellen berechnet. Streckenbezogene Verkehrsbelastungen sind das Ergebnis der nachfolgenden verkehrsmittelspezifischen Verkehrsumlegung. Auch in einem ABM werden wie in der US-amerikanischen Planungspraxis die personenspezifischen Routen zu zonenbasierten Nachfragematrizen aggregiert, um die Routenwahl durch herkömmliche Umlegungsverfahren zu berechnen. Alternativ dazu werden in den zahlreichen europäischen Anwendungen im Forschungsumfeld (z.B. Arbeiten an der ETHZ sowie (Müller et al., 2021) und (Adnan et al., 2021)) als auch in den wenigen ABM-Implementierungen in der europäischen Planungspraxis (z.B. MOBi-SIMBA und COMPASS, Kopenhagen, (Paag et al., 2019)) die Touren mit Hilfe agentenbasierter Simulation auf das Verkehrsnetz verteilt. Die Verkehrssimulation ermöglicht die Modellierung von Verkehrsstörungen über mehrere Strecken hinweg ohne dass zusätzliche verkehrstechnische Rückstauamodelle wie bei statischen Umlegungsmodellen erforderlich sind. In der Mehrzahl sind aggregierte Verkehrsnachfragemodelle mit statischen Umlegungsmodellen verknüpft, obwohl es auch Entwicklungen und wenige praktische Anwendungen von simulationsbasierten Wegewahlmodellen gibt (mesoskopische DTA).

Gegenüber anderen kantonalen Verkehrsmodellen ist das GVM Region Basel in zahlreiche Verkehrszonen gegliedert, da eine hektarfeine Zonierung vorgenommen wurde. Die feine Zonierung führt zu einem geringen Anteil intrazonale Fahrten, die in der Umlegung nicht

berücksichtigt werden. In der Kernzone des GVM Region Basel sind die intrazonalen Verkehre mit weniger als 1% für den motorisierten Verkehr vernachlässigbar. Wenn das GVM Region Basel von derzeit rund 21'000 Verkehrszonen auf rund 1'200 Zonen aggregiert wird, steigt der intrazonale Anteil auf über 6% der Kfz-Wege, so dass die Gesamtverkehrsleistung unterschätzt und auf Strecken nahe der Zonenanbindungen zu viel Verkehr erzeugt wird. Bei einem ABM wie dem ABVM Region Basel, das eine adressfeine synthetische Bevölkerung mit einer agenten-basierten Simulation koppelt, entfällt die Thematik der Zonierung gänzlich. Bei der hektarfeinen Zonierung des GVM Region Basel ist allenfalls die Unterschätzung der Fußwege zu berücksichtigen. Die hektarfeine Zonierung erfordert insbesondere bei der Anbindungsüberprüfung einen Zusatzaufwand bei der Modellerstellung. Wesentlicher als der manuelle Zusatzaufwand sind allerdings die Rechenzeiten und der Speicherbedarf für die Ergebnisse, merklich höher für alle Matrix-bezogenen Ergebnisse sind.

Gegenüber aggregierten Verkehrsnachfragemodellen wird in einem ABM eine grössere Anzahl an Verhaltensreaktionen abgebildet, da auch die zeitliche Komponente der Verkehrsnachfrage über die explizite Berücksichtigung der Aktivitätenfolge im Tagesablauf modelliert wird. Der grundsätzliche Bedarf an Eingangsdaten ist für beide Modelltypen ähnlich, aber ein ABM benötigt aufgrund zahlreicher Teilmodelle eine größere Anzahl an empirisch begründbaren Modellparametern.

Auch bei aggregierten Verkehrsnachfragemodellen wird ein größerer Detaillierungsgrad gefordert, so dass Verhaltensunterschiede durch eine zunehmende Anzahl an verhaltenshomogenen Gruppen und einer feineren räumlichen Aufteilung durch eine Erhöhung der Zonenanzahl zu beobachten ist. Das Nationale Personenverkehrsmodell der Schweiz umfasst bereits über 8.000 Verkehrszonen und 81 verhaltenshomogene Gruppen.

Der Rechenaufwand für ein ABM ist in der Regel deutlich höher als bei einem aggregierten Modell. Auch wenn ein direkter Vergleich aufgrund unterschiedliche Modelltiefe und verwendeter Hardware nicht möglich ist, betrug die Rechenzeit für die Nachfrageberechnung im aggregierten GVM Region Basel weniger als ein Drittel gegenüber dem parallelisierten ABVM Basel (13h vs. 45h). Auch bei der Routenwahl im ÖV stellte sich dieses Rechenzeitverhältnis ein, während der Unterschied bei der mIV-Routenwahl sogar mit 2,5h gegenüber 15h noch deutlicher ausfiel.

Neben dem erhöhten Rechenaufwand sind auch Unterschiede beim Personalaufwand, der für die Modellerstellung erforderlich ist, zu verzeichnen. Hier zeigen sowohl die ausländischen Erfahrungen als auch die Zeitangaben aus der beispielhaften Anwendung in Basel, dass ein ABM zwischen 30% und 50% mehr Bearbeitungsaufwand aufgrund zusätzlicher Kalibrierungsaufwände benötigt.

Der zusätzliche Bearbeitungsaufwand entsteht zum Teil noch durch fehlende bedienerfreundliche ABM-Funktionalitäten bei den existierenden Softwareprodukten für die Verkehrsplanung. In den neuesten Versionen bieten allerdings bereits mehrere Hersteller auch Funktionalitäten für den Aufbau eines ABM an. Funktionen zur Berücksichtigung personenbezogener Touren sind bisher meist skriptbasiert, so dass noch grundlegende Programmierkenntnisse für den Aufbau komplexer ABMs erforderlich sind.

Der Einsatz von MATSim im ABVM Basel hat auch einige notwendigen Erweiterungen bei der agentenbasierten Simulation gezeigt, die von allgemeinem verkehrsplanerischem Interesse sind. Beim ABVM Basel wird die Mobilitätswerkzeug-Verfügbarkeit in der Routenwahl berücksichtigt; jedoch liegt keine Kalibrierungsinformationen über generalisierte Kostenfunktionen für Verkehrsmittel- und Routenwahl vor für Wegzwecke vor. Software-technisch können diese und auch weitere nichtlineare Nutzenfunktionen in MATSim leicht umgesetzt werden. Es sind zusätzliche empirische Untersuchungen nötig, um die Verhaltensmodelle zur Ziel-, Verkehrsmittel- und Routenwahl nicht nur auf aggregierter Ebene, sondern auch personenbezogen und für Wegeketten und Tagespläne schätzen zu können.

Das ABVM Basel ist von erfahrenen ABM Modellierern erstellt worden, die über tiefere Fachkenntnisse verfügen als dies bei Verkehrsplanern vorausgesetzt werden kann. Allerdings ist mit dem nationalen Schweizer Personenverkehrsmodell (NPVM 2017) auch ein

Komplexitätsgrad und Rechenaufwand bei aggregierten Nachfragemodellen erreicht worden, der nur von sehr wenigen Institutionen bewältigt werden kann. Damit offenbart sich die Problematik zunehmender Modellkomplexität, die sowohl auf aggregierte Nachfragemodelle als auch ABM zutrifft, wenn diese für unterschiedliche Fragestellungen eingesetzt werden sollen.

7.6 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Die Erstellung und der Einsatz eines ABM ist für planerische Fragestellungen in der Schweiz zum heutigen Zeitpunkt grundsätzlich möglich. Die Eignung für ein ABM hängt vom jeweiligen Einsatzzweck des Modells ab. Die erhöhte Modellkomplexität eines ABM gegenüber einem aggregierten Nachfragemodell ist besonders bei Modellanwendungen sinnvoll, in denen die zusätzlichen Funktionalitäten modellsensitiv benötigt werden. Die Tab. 21 kategorisiert typische Modellanwendungen mit Vor- und Nachteilen für ein ABM gegenüber einem aggregierten Modell. Eine generelle Überlegenheit eines Modelltyps kann daraus nicht gefolgert werden. Je nach Anwendungsfall können verschiedene Methoden kombiniert werden, um die Eigenschaften jedes Teilmodells bestmöglich zu nutzen, und um eine möglichst optimale Lösung für die vorgesehenen Modelleinsätze zu erzielen. Dabei muss für jede Modellanwendung individuell die verfügbare Datenlage und die Ressourcenanforderungen geklärt werden. Mit den bestehenden Modellen und der hier gezeigten Modellanwendung in der Region Basel können bereits Hinweise zur Verwendung von Methoden in Aktivitätenbasierten Modellen gezeigt werden.

Aus der Studie wird eine Reihe konkreter Handlungsempfehlungen für den Einsatz von ABM in der Planungspraxis gefolgert:

- Einsatzzwecke für ein ABM ergeben sich insbesondere durch den personenbezogenen tourbasierten Ansatz bei der Modellierung neuer Mobilitätsformen mit intermodalen Wegen und der Bündelung von Teilwegen mit mehreren Personen. Bei der Entscheidung zum Aufbau eines neuen Verkehrsmodells müssen Fragen zu den potentiellen Anwendungsgebieten gestellt werden. Wenn die Anwendung eines ABM für mehrere Einsatzbereiche vorteilhaft ist, sollte der Aufbau eines ABM in Betracht gezogen werden.
- Für kantonale Anwendungen empfiehlt sich ein schrittweises Vorgehen bei der Einführung eines ABM. Zuerst sollten Erfahrungen mit einer synthetischen Population statt der traditionellen Verwendung von zellspezifischen Strukturdaten gesammelt werden bevor ein aktivitätenbasiertes Nachfragemodell zu einem ABM vervollständigt wird. Dies erlaubt eine Kompatibilität mit aggregierten Umllegungsmodellen und die Integration bestehender Softwareprodukte. Schlussendlich kann der Schritt von einem Umllegungsmodell basierend auf Nachfragematrizen zu einem Verkehrsflussmodell mit agentenbasierter Routenwahl vorgenommen werden.
- Da ein ABM aufgrund der detaillierteren Modellierung einzelner Berechnungsschritte und der bisher nicht in gleichem Maße vorhandenen Bedienerfreundlichkeit der Software zwischen 30 und 50% Mehraufwand bei der Ersterstellung benötigt, werden sich ABMs in der Planungspraxis erst durchsetzen, wenn Fragen beantwortet werden können, die von einem aggregierten Modell nicht lösbar sind.
- Es ist nicht absehbar, dass ABMs im klassischen Planungseinsatz in der Schweiz aggregierte Verkehrsnachfragemodelle in überschaubarer Zukunft vollständig ersetzen werden, weil die Vorteile in einigen Einsatzbereichen den bisher erkennbaren zusätzlichen Erstellungs- und Rechenaufwand nicht rechtfertigen. Um einige Vorteile eines ABM im praktischen Planungseinsatz besser einschätzen zu können, wird nicht ein weiteres reines Forschungsprojekt, sondern Begleituntersuchungen bei geeignet zu wählenden praktischen Planungsprojekten vorgeschlagen. In diesen Begleituntersuchungen sollen die ABM Module gut dokumentiert offengelegt werden. Dies erfordert die Bereitschaft von Planungsorganisationen, bei

künftigen Ausschreibungen auch ABMs als Ergänzung zu aggregierten Nachfragemodellen zuzulassen.

- Wie auch beim Aufbau eines aggregierten Modells muss vor der Festlegung der einzelnen Teilmodelle eines ABM geprüft werden, ob die erforderlichen Eingangsdaten zur Verfügung stehen. Wenn zum Beispiel das ABM auf einer synthetischen Bevölkerung basieren soll, müssen für die zu modellierenden Bezugszeitpunkte die Daten der synthetischen Bevölkerung vorliegen oder zumindest valide Annahmen gemacht werden können. Diese Frage bedarf insbesondere bei länderübergreifenden Modellen einer Klärung vor der Modellentscheidung.
- In einer Untersuchung sollte geprüft werden, ob die Kopplung eines ABMs für die Verkehrserzeugung auf Basis einer synthetischen Bevölkerung und einem Zielwahlmodell mit primären und sekundären Zielorten sowie einem MNL-basierten Verkehrsmittelwahlmodell und einer anschließenden Aggregation in Verkehrsnachfragezellen Vorteile hinsichtlich Rechenzeit und Stabilität gegenüber dem Simulationsansatz den die stochastische Wegewahl von MATSim liefert. Auch sollten weitere Hybridlösungen eines aggregierten Modells gekoppelt mit ABM Teilmodellen untersucht werden, in denen das Quell-Ziel-Gruppenspezifische Verkehrsaufkommen eines aggregierten Modells aus den Tagesplänen des ABM abgeleitet wird und die makroskopisch ermittelte Zielwahl für Arbeits- und Ausbildungswege für die sekundäre Zielwahl eines ABM verwendet wird. Vergleiche der eingesetzten Bewertungsparameter für die Ziel- und Verkehrsmittelwahl können über Nutzenverhältnisse vorgenommen werden, um vergleichbare Qualitätsindikatoren für beide Modellansätze sicherzustellen.
- Die Variabilität der Ergebnisse bei einem ABM ist eine wesentliche Herausforderung in der Planungspraxis. Dieses Problem tritt insbesondere bei seltenen Ereignissen nicht nur bei der Modellierung mittels ABM, sondern auch in der Realität auf. Seltene Fahrten, hervorgerufen durch dünne Besiedlung (niedrige Werte bei den Strukturdaten) oder seltene Fahrtzwecke, führen aufgrund der Ganzzahligkeit von Wegen zu geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten und hohen Streuungen zwischen Simulationsläufen. Das gleiche Phänomen ist in der Realität bei der Analyse von Wegetagebüchern beobachtbar. Bei aggregierten Modellen tritt dieses Problem nicht auf, da auch eine nicht-ganzzahlige Verkehrsnachfrage deterministisch modelliert wird. Für die Planungspraxis müssen noch Hinweise zur erforderlichen Simulationsanzahl oder notwendigen Aggregation von Einzelfahrten gegeben werden, um robuste Ergebnisse durch ein ABM erzielen zu können.
- Wenn ein ABM mit einem Simulationsmodell für die Routenwahl gekoppelt wird, werden meist aus Gründen der Rechenzeit alle Berechnungsschritte auf einer Teilpopulation durchgeführt bevor eine Hochrechnung auf die Gesamtbevölkerung erfolgt. Bei den in den USA üblichen ABMs erfolgt die Hochrechnung mit der Bestimmung der verkehrsmittelspezifischen Nachfragematrizen. Bei aggregierten Nachfragemodellen erfolgt eine Hochrechnung bereits bei der Übernahme empirischer Daten (z.B. Wegetagebücher einer Teilpopulation) in die Modellbildung. Es ist noch ungeklärt, ob der Hochrechnungszeitpunkt eine Auswirkung auf die Modellakzeptanz in der Planungspraxis hat.
- Um das volle Potential eines ABM und den möglichen Rückkoppelungen zu nutzen, sind weitere Parameterschätzungen erforderlich. Mit der Berücksichtigung von Touren statt einzelner Wege müssen die Parameter zur Verkehrsmittelwahl nicht pro Wegezweck, sondern pro Tour vorgenommen werden. Auch sollte die Fahrzeugverfügbarkeit im Haushaltskontext überprüft werden, statt mit Durchschnittswerten der Pkw-Verfügbarkeit operieren zu müssen. Weitere empirische Erhebungen zur wegezweckspezifischen Routenwahl gekoppelt mit Mobilitätswerkzeugverfügbarkeit wird die Erklärungsmöglichkeiten von Nachfragemodellen generell verbessern. Weil diese Abhängigkeiten bei bestehenden aggregierten Modellen nicht

oder nur eingeschränkt abgebildet werden, liegen die notwendigen Entscheidungsmodelle für diese Abhängigkeiten oft nicht vor.

- Bei der Weiterentwicklung von Verkehrsnachfragemodellen sollte unabhängig von der gewählten Methodik künftig mehr Augenmerk auf die Wirkung räumlicher Variablen gelegt werden, um Einflüsse wie Fußläufigkeit und multimodale Erreichbarkeiten besser abbilden zu können. Dazu sollten Verkehrstagebücher noch differenzierter in der Interaktion zwischen Personen (Agenten) angelegt und bezüglich des räumlichen Kontext ausgewertet werden. Dies betrifft die Erhebung im Haushaltskontext, Ausweitung auf eine Erhebung im Wochenplan, revealed und stated preference Befragung für Velo und neue Mobilitätsformen. Durch die Flexibilisierung der Arbeitswelt treffen reine Stichtagsmodelle einen typischen Werktag weniger genau als dies durch ein Wochenmodell, das auch seltene Aktivitäten widerspiegelt. In diesem Sinne wäre ein Wochenmodell sinnvoll, bei dem auch die Koordination von Aktivitäten im Haushaltskontext untermauert von empirischen Daten abgebildet wird.
- Sofern ein ABM für einen praktischen Verkehrsplanungseinsatz ausgeschrieben wird, muss zu Beginn bereits die Wiederverwendbarkeit und Weiternutzung des Modells festgelegt werden. In der Schweiz werden Verkehrsnachfragemodelle mittlerweile häufig entweder zu Prüfzwecken oder auch für Anwendungen, die über den ursprünglichen Planungsgegenstand hinausgehen, zwischen Bearbeitergruppen ausgetauscht. Im Fall von kommerzieller Verkehrsplanungssoftware werden meist proprietäre Dateien ausgetauscht, wie dies für aggregierte Nachfragemodelle üblich ist. In diesen Fällen müssen lediglich die geeigneten Softwareversionen bei den Bearbeitergruppen und die Projektdaten verfügbar sein. Da ein ABM derzeit häufig aus einer Vielzahl von Eingabedateien, Parametersätzen, Programmcode und einer Softwareumgebung besteht, gestaltet sich eine Übergabe schwieriger und erfordert mehr Disziplin bei der Projektdokumentation. In der open source community haben sich Dokumentationsstandards wie GitHub Repositories durchgesetzt. Obwohl dies eine gute Möglichkeit für den Austausch von Softwarecode darstellt, wird ein Projektaustausch unter weniger programmieraffinen Verkehrsplanern erschwert. Da allerdings die wesentlichen Softwarehersteller für Verkehrsplanung auch Schnittstellen für die Erstellung eines ABM entwickeln, ist eine vereinfachte Übergabe von ABM Modellen in Zukunft zu erwarten.
- Bei der Beurteilung aktivitätenorientierter Verkehrsnachfragemodelle ist das Bewusstsein hinsichtlich der Modelleigenschaften noch zu schärfen. Nicht jede agentenbasierte Simulation (z.B. mit MATSim) kann bereits als ABM bezeichnet werden. Zur Beurteilung eines ABM sollte immer geprüft werden, wie die Touren der Agenten unter Einbindung der raumbezogenen Erzeugung und Zielwahl generiert werden.

Aus den konkreten Einzelmaßnahmen ergeben sich einige grundlegende Empfehlungen zur künftigen Verkehrsnachfragemodellierung in der Schweizer Planungspraxis:

- Es wird empfohlen, die Budgets und Ressourcen für Verkehrsmodellierung in der Schweiz generell zu erhöhen. Neben dem erhöhten Ressourcenbedarf bei der Einführung von ABM, wird durch höhere Budgets die Weiterentwicklung und vermehrte Anwendung der existierenden aggregierten Modelle unterstützt.
- Der Einsatz eines ABM in der klassischen Planungspraxis zur Beurteilung von Verkehrsprojekten beschränkt sich in Europa mit Stand 2021 auf das Modell SIMBA MOBi der SBB und das Modell COMPASS für den Großraum Kopenhagen in Dänemark. Weitere ABM-Anwendungen sind in Ausschreibung oder bereits in Entwicklung, die von den Schweizer Betreibern beobachtet werden sollten.

- Die verkehrsplanerische Praxis in der Schweiz konzentriert sich bei der Modellierung bisher stark auf Beantwortung von Fragestellungen, die durch die aggregierten Modelle bereits gut abgedeckt sind. Mutmasslich künftige Herausforderungen werden vereinzelt und experimentell auf einer relativ hohen strategischen Abstraktionsgrad durch ABM-Modelle der Forschung abgedeckt. Daraus ergibt sich aktuell kein Handlungsdruck. Umgekehrt behandeln die experimentellen ABM-Modelle der Forschungslandschaft bislang schwerpunktmäßig Fragestellungen, die von konventionellen Modellen nur ungenügend abgedeckt sind, während der Nachweis robuster Reproduzierbarkeit von Erhebungs- und Zählraten, wie er in der Praxis gefordert wird, noch nicht erbracht ist. Beide Modellwelten überlappen sich bisher kaum. Das führt unter anderem dazu, dass quantitative Vergleiche auch in dieser Arbeit nur sehr begrenzt und punktuell vorgenommen werden konnten. Interessant wären der weitere Einsatz der in der Schweiz verfügbaren ABMs für Fragestellungen aus der Planungspraxis, der Vergleich mit empirischen Ergebnissen und der öffentlichen Diskussion.
- Begleituntersuchungen zu Standardplanungsprojekten in der Schweiz unter Einsatz von aggregierten Nachfragemodellen und ABM sollten von einer Organisation wie der SVI zusammengetragen werden, um den Erfahrungsaustausch zwischen Softwareentwicklern, Modellentwicklern und Modellanwendern zu fördern. Dazu müssen auch Gelder für die Dokumentation und Veröffentlichung der Modelle, Frameworks und Softwareskripte bereitgestellt werden. Da die Schweiz ein kleiner Markt für Verkehrsmodelle darstellt, soll innerhalb Europas auch die länderübergreifende Zusammenarbeit gefördert werden. Ein gutes Beispiel für eine solche Initiative in den USA bietet die die non-profit Organisation Zephyr³⁶. Die Konferenz «Modelling World³⁷», die jedes Jahr von führenden Softwareanbietern und Modellentwicklern organisiert wird, könnte hier ein Ausgangspunkt bieten.

7.7 Forschungsbedarf

Aus den oben genannten Handlungsempfehlungen ergibt sich der folgende Forschungsbedarf.

- Um den Einsatz eines ABM in der klassischen Planungspraxis zu befördern, sollte zu einem oder mehreren Planungsprojekten, die bisher mit einem aggregierten Verkehrsnachfragemodell aufgesetzt werden, eine Begleitforschung unterstützt werden, die den schrittweisen Einsatz eines ABM zum Ziel hat. Während die aggregierte Nachfragemodellierung für Standardanwendungen keinen direkten Forschungsgegenstand darstellt, sollte der Zusatzaufwand, der durch eine tourbasierte Modellierung für typische kantonale und kommunale Anwendungen wie Verkehrsuntersuchungen zum Infrastrukturausbau oder Kosten-Nutzen-Analysen entsteht, über Forschungen abgedeckt werden. Forschungsgegenstand sollte dann die praxisnahe Modellumsetzung und Hinweise zur Schätzung der Modellparameter sein.
- In einem realen Planungsprojekt mit Forschungsunterstützung sollte ein ABM einmal mit einem klassischen Verkehrsumlegungsmodell statt mit einer Verkehrssimulation gekoppelt werden. Damit entfällt der stochastische Einfluss, der sich durch die agentenbasierte Simulation von Teilpopulationen ergibt. Im Vergleich mit einer

³⁶ <https://zephyrtransport.org>

³⁷ <http://landor.co.uk/modellingworld/2020/home.php>

agentenbasierten Simulation kann der Einfluss auf das Endergebnis durch die unterschiedlichen Hochrechnungszeitpunkte auf die Gesamtpopulation geprüft werden. Im Fall von sehr ähnlichen Ergebnissen wird das Vertrauen von ABMs in der Praxis gestärkt. Falls die Ergebnisse stark abweichen, müssen die Gründe für die fehlende Stabilität gefunden und Hinweise zur Beseitigung ausgearbeitet werden, siehe auch (Guggisberg Bicudo, 2020)

- Während die Nutzenmodelle für eine Verkehrsmittelwahl für Touren in der Theorie bekannt sind, fehlen Entscheidungsmodelle, mit denen die Modellparameter in Abhängigkeit des Haushaltskontextes geschätzt wurden. 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.

Anhänge

Leitfaden Experteninterviews

Themenblock	Hauptfrage	Betreiber		Entwickler		Software-Anbieter		Forschende	
		mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne
		praktische Erfahrung mit ABM							
Warm-up	Welcher berufliche Werdegang hat sie zu den Verkehrsmodellen geführt?	x	x	x	x	x	x	x	x
Planungsprozess	Welche Rolle spielen Verkehrsmodelle heute im Planungsprozess?	x	x	x	x			x	x
	Wo sehen Sie Verbesserungspotenzial?	x	x	x	x	x	x	x	x
	Welche Planungsfragen erwarten sie in den kommenden Jahren / müssen Modelle in Zukunft beantworten können?	x	x	x	x	x	x	x	x
Vorwissen	Inwiefern haben Sie sich schon mit den Methoden aktivitätsbasierter Modelle auseinandergesetzt?	x	x	x	x	x	x	x	x
	Was waren für Sie / Ihre Organisation die Gründe sich vertieft mit aktivitätsbasierten Modellansätzen auseinanderzusetzen?	x		x		x		x	
	Was waren für Sie / Ihre Organisation die Gründe sich nicht vertieft mit aktivitätsbasierten Modellansätzen auseinanderzusetzen?		x		x		x		x
	Welche Erfahrungen haben Sie / Ihre Organisation bei der vertieften Auseinandersetzung mit aktivitätsbasierten Modellen gemacht?	x		x		x		x	

Themenblock	Hauptfrage	Betreiber		Entwickler		Software-Anbieter		Forschende	
		mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne
Vorwissen	<p>Wie rangieren sie die Relevanz folgender Vorteile von aktivitätenbasierten Modellen (wichtigste zuerst):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Methodische Konsistenz • Einfachere Kommunikation der methodischen Grundlagen • Bessere Eignung für Mobility Pricing, multimodale Wegeketten • Einfacherer Berücksichtigung differenzierter Verhaltensmodelle • Weniger Speicherplatzbedarf • (weitere, selbstgenannte Vorteile) <p>Wir rangieren sie die Relevanz folgender Herausforderungen bei der Entwicklung und Anwendung von aktivitätenbasierten Modellen (wichtigste zuerst):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Keine kommerzielle / standardisierte Software verfügbar • Wissen / Kenntnisse / Erfahrung bei Betreiber • Wissen / Kenntnisse / Erfahrung bei Beratern • Hohe Rechenzeiten • Wenig praktische Erfahrung in Europa / Schweiz • In der Praxis gibt es keine/zu wenige Fragestellungen, welche die Verwendung eines ABM rechtfertigen/bedingen. 	x	x	x	x				

Themenblock	Hauptfrage	Betreiber		Entwickler		Software-Anbieter		Forschende	
		mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne
		praktische Erfahrung mit ABM							
Anwendungen	Welches waren die letzten beiden (grösseren) Anwendungen des Modells? Welches sind die nächsten beiden geplanten (grösseren) Anwendungen des Modells?	x	x	x	x				
	Für welche Anwendungen wird das Verkehrsmodell wie oft eingesetzt?								
	- Planung bei Baustellen								
	- Evaluation von Netzausbauten (ZMB, KNA etc.)								
	- Gesamtverkehrskonzepte								
	- Fahrgastprognose	x	x	x	x				
	- Wirkung von Siedlungsentwicklung								
	- Evaluation ÖV-Fahrpläne								
	- Erreichbarkeitsanalyse								
	- andere								
	Für welche Anwendungen könnten auch Verkehrsmodelle eingesetzt werden, wird aber in der Praxis anders vorgegangen? Warum?	x	x	x	x			x	x
	Welche funktionellen und technischen Anforderungen muss das Verkehrsmodell genügen (Sensitivitäten ggü Massnahmen, Validierung/Fehlermasse)? Welche dieser Anforderungen wurden in der Ausschreibung des Modells wie definiert?	x	x	x	x				
	Welche Gründe waren bisher ausschlaggebend, um aggregierte statt aktivitätsbasierter Modelle einzusetzen?		x		x		x		x
	Wo sehen Sie Gründe die ein Wechsel auf einen aktivitätsbasierten Modellansatz rechtfertigen / opportun erscheinen lassen?		x		x		x		x
	Was waren die Gründe für den Wechsel auf einen aktivitätsbasierten Modellansatz in ihrer Organisation?	x		x		x		x	

Welche Erfahrungen haben Sie persönlich bei der vertieften Auseinandersetzung mit aktivitätsbasierten Modellen gemacht?	x		x		x		x	
Wie wurde der Wechsel auf einen aktivitätsbasierten Modellansatz gehandhabt?								
- Welche Softwares wurden eingesetzt?								
- Wurde ein systematischer Vergleich zwischen aggr. Modell und ABM durchgeführt?	x		x		x		x	
- Was würden sie anders machen?								
Wie gut lassen sich nach Ihrer Ansicht neue verkehrsplanerischer Fragestellungen wie Mobility Pricing, Inter- und Multimodale Wegeketten, MaaS, flexiblere Arbeitswelt und autonomes Fahren gemäss Ihrer Einschätzung mit aggregierten resp. aktivitätsbasierten Modellen bearbeiten?	x	x	x	x	x	x	x	x
Welche Anwendungen und Funktionalitäten aktivitätenbasierter Modelle bringen konkrete Vorteile für die Praxis und wie relevant schätzen diese Vorteile heute und in Zukunft?	x	x	x	x	x	x	x	x
Welche Voraussetzungen, Verbesserungen und Massnahmen sind nötig, um Modellbetreiber dazu zu bewegen die heute eingesetzten Modell durch aktivitätenbasierten Modelle zu ersetzen?	x	x	x	x	x	x	x	x

Themenblock	Hauptfrage	Betreiber		Entwickler		Software-Anbieter		Forschende	
		mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne
		praktische Erfahrung mit ABM							
Transformationsprozess	Welche Gründe haben dazu geführt, dass ABM in der europäischen Praxis bisher kaum eingesetzt wurden?	x	x	x	x	x	x	x	x
	Was waren die Gründe für die Einführung aktivitätenbasierter Modelle bei denen Sie eine aktive Rolle hatten?	x		x		x		x	
	Welche organisatorischen Voraussetzungen / Ausgangslage waren notwendig, damit die Einführung aktivitätenbasierter Modelle erfolgt ist? (Bottom up vs. Top down, <i>game changer</i> in Organisation, Change Management Strategien)	x		x		x		x	
	Wie ist ein Transformationsprozess von aggregierten zu aktivitätenbasierten Modellen idealerweise zu gestalten?	x		x		x		x	
	Welche Gründe waren bisher ausschlaggebend, um aggregierte statt aktivitätsbasierter Modelle einzusetzen?	x	x	x	x	x	x	x	x
	Welcher Randbedingungen müssen gegeben sein, damit eine Etablierung / Anwendung von aktivitätenbasierten Modellen in Frage kommt?	x	x	x	x	x	x	x	x
	Wo sehen Sie Gründe die ein Wechsel auf einen aktivitätsbasierten Modellansatz rechtfertigen / opportun erscheinen lassen?	x	x	x	x	x	x	x	x

Themenblock	Hauptfrage	Betreiber		Entwickler		Software-Anbieter		Forschende	
		mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne
Arbeit / Erfahrung mit aktivitätsbasierten Modellen	Wie erfolgte die Entwicklung des aktivitätsbasierten Modells (Zielsetzung, Modellarchitektur, eingesetzte Methoden)	x		x		(x)			
	Wurden die Resultate des (neuen) aktivitätsbasierten Modells mit dem (bestehenden) aggregierten Modell systematisch verglichen? Wie?	x		x					
	Beschreiben Sie Ihren Lernprozess bei der Arbeit mit den aktivitätsbasierten Modellen	x		x		(x)			
	Inwiefern hat der aktivitätsbasierte Ansatz einen direkten Mehrwert gebracht?	x		x					
	Welche Herausforderungen oder Nachteile haben sich bei der Modellentwicklung und -anwendung mit dem aktivitätsbasierten Ansatz ergeben?	x		x					
	Inwiefern werden die methodischen Vorteile des aktivitätsbasierten Ansatz konkret genutzt?								
	- Berücksichtigung Soziodemographie bei Modellierung der Verkehrsnachfrage - Berücksichtigung Soziodemographie und Wegzweck bei Modellierung der Verkehrsmittelwahl - Berücksichtigung Soziodemographie und Wegzweck bei Modellierung der Routenwahl - andere Vorteile	x		x					
Welche Rückkopplungen werden bei welchen Anwendungsfällen berücksichtigt?	x		x						

Themenblock	Hauptfrage	Betreiber		Entwickler		Software-Anbieter		Forschende	
		mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne
		praktische Erfahrung mit ABM							
Software	Welche funktionellen Voraussetzungen muss Software zur Entwicklung und zur Nutzung von Verkehrsmodellen erfüllen (Rechenzeit, Speicherbedarf, Verfügbarkeit und Kosten der Software)?	x	x	x	x	x	x	(x)	(x)
	Welche Softwarewerkzeugen nutzen Sie für die Arbeit mit aktivitätenbasierten Modell? Warum diese?	x		x		(x)			
	Bestehen beim Betreiber Kompetenzen Skripte zur Generierung der Modelle zu verstehen, korrigieren und gegebenenfalls zur ergänzen/erweitern	x	x	x	x				
	Wie stehen Sie zur Idee, dass die Nachfragemodellierung komplett reproduzierbar und somit Skript-basiert automatisiert sein muss?	x	x	x	x	(x)	(x)	(x)	(x)
	Welche Softwarewerkzeugen fehlen bisher bei der Arbeit mit aktivitätenbasierten Modellen?	x	x	x	x	x	x		
	Welche Herausforderungen sehen Sie für Software zur Erstellung von ABM sich im Markt zu etablieren			x	x	x	x	x	x
	Welcher Reifegrad muss Software haben, damit sie in der Praxis zur Anwendung kommen kann?	x	x	x	x	x	x		
	Wie schätzen Sie das Marktpotenzial von ABM-Software ein?			x	x	x	x		
	Wie beurteilen Sie die Idee, dass neben den Eingangsdaten (Open Data) auch die Skripte zur Generierung der Modelle verfügbar gemacht werden (Open Source / Open Models):	x	x	x	x	x			
	a)... dem Auftraggeber zur Verfügung gestellt werden muss?								
	b ... als Open Source Code veröffentlicht werden muss?								
	Mit welchen Softwarewerkzeugen denken sie, dass sie in 5 – 10 Jahren arbeiten werden?	x	x	x	x	x	x	x	x

Themenblock	Hauptfrage	Betreiber		Entwickler		Software-Anbieter		Forschende	
		mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit	ohne
		praktische Erfahrung mit ABM							
Auftragsabwicklung und Weiterentwicklung des Modells	Wie erfolgt die Aufteilung der Arbeiten bei Anwendungen des Modells? - Welche Arten von Anwendungen werden direkt vom Betreiber durchgeführt? - Welche extern in Auftrag gegeben?	x	x	x	x				
	- Wie viele externe Büros bearbeiten Aufträge mit dem Modell? Welche Kenntnisse sind dort vorhanden?								
	Wie erfolgt die Aufteilung der Arbeiten bei der Entwicklung des Modells? - Wie wurde die Zusammenarbeit zwischen Entwicklern und Betreiber organisiert? - Welche Entwicklungsarbeiten wurden vom Betreiber geleistet? - Sehen sie bei aktivitätenbasierten Modelle besondere Herausforderungen hinsichtlich der Entwicklung und des Verhältnisses zwischen Betreiber/Besteller und Entwickler?	x	x	x	x	x	x	x	x
	Wie wird die Weiterentwicklung des Modells gewährleistet? - Wie oft werden welche Modellaktualisierungen durchgeführt? - Wie werden zukünftige Anforderungen an das Modell definiert?	x	x	(x)	(x)				
Varia	Sehen Sie wichtige Themen, die bisher im Interview nicht abgedeckt wurden?	x	x	x	x	x	x	x	x

Literaturverzeichnis

Adler, T. J., & Ben-Akiva, M. E. (1979). A Theoretical and Empirical Model of Trip Chaining Behavior. *Transportation Research Part B: Methodological*, 13B(3), 243–257.

Adnan, M., Outay, F., Ahmed, S., Brattich, E., di Sabatino, S., & Janssens, D. (2021). Integrated agent-based microsimulation framework for examining impacts of mobility-oriented policies. *Personal and Ubiquitous Computing*, 25(1), 205–217. <https://doi.org/10.1007/s00779-020-01363-w>

Adnan, M., Pereira, F. C., Azevedo, C. L., Basak, K., Lovric, M., Raveau, S., Zhu, Y., Ferreira, J., Zegras, C., & Ben-Akiva, M. (2016). *SimMobility: A Multi-scale Integrated Agent-Based Simulation Platform*. Transportation Research Board 95th Annual Meeting Transportation Research Board. <https://trid.trb.org/view/1393000>

ARC. (2009). *Activity-Based Travel Model Specifications: Coordinated Travel—Regional Activity-Based Modeling Platform (CT-RAMP) for the Atlanta Region*. http://www.atlanta-regional.com//File%20Library/Transportation/Travel%20Demand%20Model/tp_abmod-elspecifications_102309.pdf

Arendt Consulting. (2015). *Gesamtverkehrsmodell der Region Basel 2012—Endbericht*.

Arentze, T. A., Hofman, F., Mourik, H., & Timmermans, H. J. P. (2000). Albatross: A Multi-Agent Rule-Based Model of Activity Pattern Decisions. *Transportation Research Record*, 1706, 136–144.

Arentze, T. A., & Timmermans, H. J. P. (2004). A Learning-Based Transportation Oriented Simulation System. *Transportation Research Part B: Methodological*, 38(7), 613–633.

Arup, Institute for Transport Studies, & Accent. (2015). *Provision of market research for value of travel time savings and reliability*. Department for Transport.

Association of Metropolitan Planning Organizations. (2019). *ActivitySim: An open platform for activity-based travel modeling*. ActivitySim. <https://activitysim.github.io/>

Atlanta Regional Commission. (2019). *ARC Model Documentation*. https://atlregional.github.io/ARC_Model/index.html

Auld, J., & Mohammadian, A. (2012). Activity planning processes in the Agent-based Dynamic Activity Planning and Travel Scheduling (ADAPTS) model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(8), 1386–1403. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.05.017>

Auld, J., & Mohammadian, A. K. (2009). ADAPTS: Agent-Based Dynamic Activity Planning and Travel Scheduling Model—A Framework. In TRB (Hrsg.), *88th Annual Meeting of the Transportation Research Board*.

Ayed, H., Khadraoui, D., & Aggoune, R. (2015). Using MATSim to simulate carpooling and car-sharing trips. *2015 World Congress on Information Technology and Computer Applications (WCITCA)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/WCITCA.2015.7367046>

Balac, M., Ciari, F., & Axhausen, K. W. (2015). Carsharing demand estimation: Case study of Zurich area. In TRB (Hrsg.), *94th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Transportation Research Board.

- Bar-Gera, H. (2002). Origin-Based Algorithm for the Traffic Assignment Problem. *Transportation Science*, 36(4), 398–417. <https://doi.org/10.1287/trsc.36.4.398.549>
- Beckman, R. J., Baggerly, K. A., & McKay, M. D. (1996). Creating synthetic baseline populations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 30(6), 415–429. [https://doi.org/10.1016/0965-8564\(96\)00004-3](https://doi.org/10.1016/0965-8564(96)00004-3)
- Ben-Akiva, M. E., & Bowman, J. L. (1998). Integration of an activity-based model system and a residential location model. *Urban Studies*, 35(7), 1231–1253.
- Bernardin, V. (2018). *How-to: Think About Model Design for Your Region* (Research Report FHWA-HEP-20-023). Federal Highway Administration.
- Bhat, C. R., Guo, J. Y., Srinivasan, S., & Sivakumar, A. (2004). A Comprehensive Econometric Microsimulator for Daily Activity-Travel Patterns (CEMDAP). *Transportation Research Record*, 1894, 57–66.
- Bischoff, J., Márquez-Fernández, F. J., Domingues-Olavarría, G., Maciejewski, M., & Nagel, K. (2019). Impacts of vehicle fleet electrification in Sweden – a simulation-based assessment of long-distance trips. *2019 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/MTITS.2019.8883384>
- Bodenmann, B., Bürki, P., Philipp, C., Bernhard, N., & Müller, K. (2019). *Synthetische Population 2017—Modellierung mit dem Flächennutzungsmodell FaLC*. Im Auftrag des Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) und der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB).
- Bogner, A., Littig, B., & Menz, W. (Hrsg.). (2009). *Experteninterviews: Theorien, Methoden, Anwendungsfelder*. Verlag für Sozialwissenschaften.
- Bogner, A., Littig, B., & Menz, W. (2014). *Interviews mit Experten*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-531-19416-5>
- Börjesson, M., & Eliasson, J. (2014). Experiences from the Swedish Value of Time study. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 59(0), 144–158.
- Börjesson, M., & Eliasson, J. (2019). Should values of time be differentiated? *Transport Reviews*, 39(3), 357–375. <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1480543>
- Bösch, P. M., Müller, K., & Ciari, F. (2016). *The IVT 2015 Baseline Scenario*. 36.
- Bowman, J. L. (1998). *The Day Activity Schedule Approach to Travel Demand Analysis*. Massachusetts Institute of Technology.
- Bowman, J. L. (2009). Historical Development of Activity Based Model Theory and Practice (Part 2). *Traffic Engineering and Control*, 50(7), 314–318.
- Bowman, J. L., Bradley, M. A., & Gibb, J. (2006). The Sacramento Activity-Based Travel Demand Model: Estimation And Validation Results. In ETC (Hrsg.), *European Transport Conference*.
- Bowman, J. L., Bradley, M. A., Shiftan, Y., Lawton, T. K., & Ben-Akiva, M. E. (1999). Demonstration of an Activity Based Model System for Portland. In H. Meersman, E. van de Voorde, & W. Winkelmanns (Hrsg.), *World Transport Research* (Bd. 3, S. 171–184). Pergamon.
- Bowman, J. L., & Rousseau, G. (2006). Development of Mid-Ohio Regional Planning Commission Tour-Based Model. In T. C. T. D. Forecasting (Hrsg.), *Innovations in Travel Demand Modeling (ITM'06)*. Transportation Research Board. <http://www.trb-forecasting.org/innovationsConference2006.html>

Boyce, D., Ralevic-Dekic, B., & Bar-Gera, H. (2004). Convergence of Traffic Assignments: How Much is Enough? *Journal of Transportation Engineering*, 130(1), 49–55. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:1\(49\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:1(49))

Boyce, D., & Williams, I. (Hrsg.). (2016). *Forecasting Urban Travel: Past, Present and Future*. Edward Elgar.

Bradley, M. A., Bowman, J. L., & Griesenbeck, B. (2010). SACSIM: An applied activity-based model system with fine-level spatial and temporal resolution. *Journal of Choice Modelling*, 3(1), 5–31.

Bruno, R., Mueller, M., Alonso, G., & Hoefler, T. (2019). *Towards High Performance Mobility Simulations*. 16.

Bubenhofer, J., Hool, A., Naef, C., & Hess, J. (2018). *Dichte und Mobilitätsverhalten: Auswertungen des Mikrozensus Mobilität und Verkehr*. Bundesamt für Raumentwicklung (ARE). <https://www.are.admin.ch/are/de/home/medien-und-publikationen/publikationen/grundlagen/dichte-und-mobilitaetsverhalten.html>

Bundesamt für Statistik BFS & Bundesamt für Raumentwicklung ARE. (2017). *Verkehrverhalten der Bevölkerung—Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015* (Nr. 840–1500).

Bützberger, P., & Scherr, W. (2020). Simulation der Mobilität der Zukunft mit dem Verkehrsmodell SIMBA der SBB. *Schweizer Eisenbahn-Revue*, 1, 30–33.

Casati, D., Müller, K., Fourie, P. J., Erath, A., & Axhausen, K. W. (2015). Synthetic Population Generation by Combining a Hierarchical, Simulation-Based Approach with Reweighting by Generalized Raking. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2493, 107–116. <https://doi.org/10.3141/2493-12>

Castiglione, J., Bradley, M., Gliebe, J., Strategic Highway Research Program Capacity Focus Area, Transportation Research Board, & National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2015). *Activity-Based Travel Demand Models: A Primer*. Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/22357>

Chapin, F. S. (1968). Activity systems and urban structure. *Journal of the American Institute of Planners*, 34(1), 11–18.

Chapin, F. S. (1974). *Human Activity Patterns in the City: Things People Do in Time and in Space*. John Wiley & Sons.

Chapin, F. S., & Hightower, H. C. (1966). *Household activity systems—A pilot investigation*. Center for Urban and Regional Studies, University of North Carolina.

Chen, B. Y., Li, Q., Wang, D., Shaw, S.-L., Lam, W. H. K., Yuan, H., & Fang, Z. (2013). Reliable Space–Time Prisms Under Travel Time Uncertainty. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(6), 1502–1521. <https://doi.org/10.1080/00045608.2013.834236>

Citec Ingénieurs Conseils, Bierlaire, M., & Flamm, M. (2017). *Makroskopische Modellierung des Fuss- und Veloverkehrsgrundlagen* (Endbericht SVI 2014/001; S. 199). Bundesamt für Strassen.

Danalet, A., & Mathys, N. (2018). *Mobility Resources in Switzerland in 2015*. 28.

Denver Regional Council of Governments. (2019). *Focus Travel Model*. <https://drcog.org/services-and-resources/data-maps-and-modeling/travel-modeling/focus-travel-model>

Donnelly, R., Erhardt, G., Moekel, R., & Davidson, W. (2010). *Advanced Practices in Travel Forecasting* (NCHRP Synthesis Nr. 406). Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/22950>

Downs, A. (1992). *Stuck in Traffic: Coping with Peak-hour Traffic Congestion*. Brookings Institution Press.

Downs, A. (2000). *Stuck in Traffic: Coping with Peak-Hour Traffic Congestion*. Brookings Institution Press.

Erhardt, G., Brinckerhoff, P., & Francisco, S. (2012). *MTC's Travel Model One: Applications of an Activity-Based Model in its First Year*. 9. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/conferences/2012/4thITM/Papers-A/0117-000082.pdf>

Farooq, B., Bierlaire, M., Hurtubia, R., & Flötteröd, G. (2013). Simulation based population synthesis. *Transportation Research Part B: Methodological*, 58, 243–263. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.09.012>

Fellendorf, M., Haupt, T., Heidel, U., & Scherr, W. (1997). PTV VISION: Activity-based demand forecasting in daily practice. In D. Ettema & H. Timmermans, *Activity-based approaches to travel analysis* (S. 55–71). Elsevier.

FHWA. (2013). *TRANSIMS Background*. <http://www.fhwa.dot.gov/planning/tmip/resources/transims/>

Flick, U. (1999). *Qualitative Forschung. Theorie, Methoden, Anwendung in Psychologie und Sozialwissenschaften*. Rowohlt Tb.

Flötteröd, G. (2017). A search acceleration method for optimization problems with transport simulation constraints. *Transportation Research Part B: Methodological*, 98, 239–260. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.12.009>

Flötteröd, G., Chen, Y., & Nagel, K. (2012). Behavioral Calibration and Analysis of a Large-Scale Travel Microsimulation. *Networks and Spatial Economics*, 12(4), 481–502. <https://doi.org/10.1007/s11067-011-9164-9>

Fourie, P. (2010, August 16). *Agent-based transport simulation versus equilibrium assignment for private vehicle traffic in Gauteng*. Southern African Transport Conference, Pretoria.

Frank, M., & Wolfe, P. (1956). An Algorithm for Quadratic Programming. *Naval Research Logistics Quarterly*, 3, 95–110.

Frejinger, E., Bierlaire, M., & Ben-Akiva, M. (2009). Sampling of alternatives for route choice modeling. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43(10), 984–994. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2009.03.001>

Friedrich, M., Sonnleitner, J., & Richter, E. (2019). Integrating automated vehicles into macroscopic travel demand models. *Transportation Research Procedia*, 41, 360–375. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.09.060>

Gao, W., Balmer, M., & Miller, E. J. (2010). Comparison of MATSim and EMME/2 on Greater Toronto and Hamilton Area Network, Canada. *Transportation Research Record*, 2197(1), 118–128. <https://doi.org/10.3141/2197-14>

Gärling, T., Brännäs, K., Garvill, J., Golledge, R. G., Gopal, S., Holm, E., & Lindberg, E. (1989). Household Activity Scheduling. In WCTR (Hrsg.), *Transport Policy, Management & Technology Towards 2001: Bd. IV* (S. 231–248). Western Periodicals.

Gärling, T., Gillholm, R., & Montgomery, W. (1999). The role of anticipated time pressure in activity scheduling. *Transportation*, 26(2), 173–191. <https://doi.org/10.1023/A:1005123527913>

Gasser, P., Zhang, C., Mortreux, C., Nguyen, M., Delgado, J., Bierlaire, M., & Flamm, M. (2017). *Modélisation macroscopique de la circulation cycliste et piétonne—Bases* (SVI Forschungsbericht Nr. 1641; S. 199). Bundesamt für Strassen.

Gentile, G., Noekel, K., Schmoeker, J. D., Trozzi, V., & Chandakas, E. (2016). The Theory of Transit Assignment: Demand and Supply Phenomena. In G. Gentile & K. Noekel (Hrsg.), *Modelling Public Transport Passenger Flows in the Era of Intelligent Transport Systems: COST Action TU1004 (TransITS)*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25082-3>

Goulias, K. G., Bhat, C. R., Pendyala, R. M., Chen, Y., Paleti, R., Konduri, K. C., Huang, G., & Hu, H.-H. (2011). Simulator of activities, greenhouse emissions, networks, and travel (SimAGENT) in Southern California: Design, implementation, preliminary findings, and integration plans. *2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems*, 164–169. <https://doi.org/10.1109/FISTS.2011.5973624>

Grether, D. (2014). *Extension of a multi-agent transport simulation for traffic signal control and air transport systems*. Technical University Berlin.

Guggisberg Bicudo, D. (2020). *Convergence towards equilibrium in an agent-based transport simulation* [Master Thesis]. ETH Zürich.

Guo, J. Y., & Bhat, C. R. (2007). Population Synthesis for Microsimulating Travel Behavior. *Transportation Research Record*, 2014(12), 92–101.

Haan de, P., Rosser, S., Erny, I., & Clausdeinken, H. (2020). *Szenarien der Elektromobilität in der Schweiz – Update 2020, EBP-Hintergrundbericht* (S. 32) [EBP-Hintergrundbericht]. https://www.ebp.ch/sites/default/files/unterthema/uploads/2020-03-02_EBP_CH_EmobSzen_PKW_2020_def%281%29.pdf

Hägerstrand, T. (1970). What about People in Regional Science? *Papers of the Regional Science Association*, 24(1), 7–21.

Hatzopoulou, M., & Miller, E. J. (2010). Linking an activity-based travel demand model with traffic emission and dispersion models: Transport's contribution to air pollution in Toronto. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15(6), 315–325.

Heilig, M., Mallig, N., Hilgert, T., Kagerbauer, M., & Vortisch, P. (2017). *Entwicklung eines kombinierten Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodells für das Multi-Agenten-Modell mobiTopp*. HEUREKA '17. Optimierung in Verkehr und Transport, Köln.

Hess, S., Erath, A., & Axhausen, K. W. (2008). Joint Valuation of Travel Time Savings Estimation on Four Separate Swiss Data Sets. *Transportation Research Record*, 2082, 43–55.

Hörl, S. (2017). Agent-based simulation of autonomous taxi services with dynamic demand responses. *Procedia Computer Science*, 109, 899–904. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.418>

Hörl, S., Balac, M., & Axhausen, K. W. (2018). A first look at bridging discrete choice modeling and agent-based microsimulation in MATSim. *Procedia Computer Science*, 130, 900–907. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.087>

Hörl, S., Becker, F., Dubernet, T., & Axhausen, K. W. (2018a). *Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge: Eine Abschätzung* (Forschungsbericht SVI 2016/001; S. 207). IVT, ETH Zurich.

Hörl, S., Becker, F., Dubernet, T., & Axhausen, K. W. (2018b). *Induzierter Verkehr durch autonome Fahrzeuge: Eine Abschätzung* (Forschungsbericht SVI 2016/001; S. 207). IVT, ETH Zurich.

Horni, A. (2013). *Destination Choice Modeling of Discretionary Activities in Transport Microsimulations* [ETH Zurich]. <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-010006641>

Horni, A., Nagel, K., & Axhausen, K. (2016). *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. Ubiquity Press. <http://www.ubiquitypress.com/site/books/>

Infras, TransSol, Transoptima, & Ecoplan. (2019). *Mobility Pricing – Wirkungsanalyse am Beispiel der Region Zug* (S. 305) [Schlussbericht]. Bundesamt für Strassen.

Jones, P. M., Dix, M. C., Clarke, M. I., & Heggie, I. G. (1983). *Understanding Travel Behaviour*. Gower.

Joshi, C. (2019). *Activity Based Models (ABM) in New Visum*. PTV User Group Meeting, New Orleans. <https://ptvtraffic.us/resources/activity-based-models-abm-in-new-visum/>

Kaziyeva, D., Wallentin, G., Loidl, M., & Mohr, S. (2018). Reviewing Software for Agent-based Bicycle Flow Models. *Journal for Geographic Information Science*, 6, 291–296. https://doi.org/10.1553/giscience2018_01_

Kühnel, N., Thunig, T., & Nagel, K. (2018). Implementing an adaptive traffic signal control algorithm in an agent-based transport simulation. *Procedia Computer Science*, 130, 894–899. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.086>

Kwan, M.-P., & Hong, X.-D. (1998). Network-Based Constraints-Oriented Choice Set Formation Using GIS. *Journal of Geographical Systems*, 5, 139–162.

Lenntorp, B. (1976). *Paths in Space-Time Environments*. The Royal University of Lund, Department of Geography.

Liao, L., Arentze, T. A., & Timmermans, H. J. P. (2013). Multi-state Supernetwork Framework for the Two-Person Joint Travel Problem. *Transportation*, 40(4), 813–826.

Llorca, C., & Moeckel, R. (2019). Effects of scaling down the population for agent-based traffic simulations. *Procedia Computer Science*, 151, 782–787. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.04.106>

Mallig, N., Kagerbauer, M., & Vortisch, P. (2013). MobiTopp – A Modular Agent-based Travel Demand Modelling Framework. *Procedia Computer Science*, 19, 854–859. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.06.114>

Mayer, H. O. (2012). *Interview und schriftliche Befragung: Grundlagen und Methoden empirischer Sozialforschung: Grundlagen und Methoden empirischer Sozialforschung* (6. Aufl.). Oldenbourg Wissenschaftsverlag.

Meister, K., Balmer, M., Axhausen, K. W., & Nagel, K. (2006). planomat: A Comprehensive Scheduler for a Large-Scale Multi-Agent Transportation Simulation. In IATBR (Hrsg.), *11th International Conference on Travel Behaviour Research (IATBR)*. <http://www.ivt.ethz.ch/vpl/publications/reports/ab388.pdf>

Miller, E. J., & Roorda, M. J. (2003). A Prototype Model of 24-hour Household Activity Scheduling for the Toronto Area. *Transportation Research Record*, 1831, 114–121.

Müller, J., Straub, M., Naqvi, A., Richter, G., Peer, S., & Rudloff, C. (2021). MATSim Model Vienna: Analyzing the Socioeconomic Impacts for Different Fleet Sizes and Pricing Schemes of Shared Autonomous Electric Vehicles. *Transportation Research Board 100th Annual Meeting, TRBAM-21-03707*. <https://trid.trb.org/view/1759674>

- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2013). *Dynamic, Integrated Model System: Jacksonville-Area Application* (S. 22482). Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/22482>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2014). *Dynamic, Integrated Model System: Sacramento-Area Application, Volume 1: Summary Report* (S. 22381). Transportation Research Board. <https://doi.org/10.17226/22381>
- Paag, H., Kjems, S., & Hansen, C. O. (2019). COMPASS: Ny trafikmodel for Hovedstadssområdet. *Artikler fra Trafikdage på Aalborg Universitet (Proceedings from the Annual Transport Conference at Aalborg University)*. <https://journals.aau.dk/index.php/td/article/view/5077/4449>
- Parsons Brinckerhoff. (2017). *Activity-Based Model Specification Report* (S. 113). Atlanta Regional Commission. <https://cdn.atlantaregional.org/wp-content/uploads/abm-specification-report-2017.pdf>
- Parsons Brinckerhoff, & San Francisco County Transportation Authority. (2012). *San Francisco Dynamic Network Assignment Project "DTA Anyway": Final Methodology*. San Francisco County Transportation Authority.
- Perret, C., Muralti, J.-L., Siegenthaler, C., Seewer, C., Kowald, M., Corpataux, A., & Danalet, A. (2017). *Verkehrsverhalten der Bevölkerung Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015* (Themenbereich Mobilität und Verkehr im Internet). Bundesamt für Statistik (BFS).
- Piatkowski, B., & Maciejewski, M. (2013). Comparison of traffic assignment in VISUM and transport simulation in MATSim. *Transport Problems*, 8, 113–120.
- Pinjari, A., Eluru, N., Srinivasan, S., Guo, J. Y., Copperman, R., Sener, I. N., & Bhat, C. R. (2008). *CEMDAP: Modeling and Microsimulation Frameworks, Software Development, and Verification*. 24.
- Pipes, L. A. (1953). An Operational Analysis of Traffic Dynamics. *Journal of Applied Physics*, 24(3), 274–281. <https://doi.org/10.1063/1.1721265>
- Puget Sound Regional Council. (2019). *Soundcast Code Base* [Jupyter Notebook]. Puget Sound Regional Council. <https://github.com/psrc/soundcast> (Original work published 2013)
- Raney, B., & Nagel, K. (2004). Iterative Route Planning for Large-Scale Modular Transportation Simulations. *Future Generation Computer Systems*, 20(7), 1101–1118.
- Rasouli, S., & Timmermans, H. (2013). Activity-based models of travel demand: Promises, progress and prospects. *International Journal of Urban Sciences*, 0(0), 1–30. <https://doi.org/10.1080/12265934.2013.835118>
- Rasouli, S., & Timmermans, H. (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>
- Rieser, M. (2010). *Adding Transit to an Agent-Based Transportation Simulation: Concepts and Implementation* [Ph.D Thesis, Technical University Berlin]. http://opus4.kobv.de/opus4-tuberlin/frontdoor/deliver/index/docId/2642/file/rieser_marcel.pdf
- Rieser, M., Métrailler, D., & Lieberherr, J. (2018). *Adding realism and efficiency to public transportation in MATSim*. 22.

Rieser, N., Tasnady, B., de Vrieess, N., Rothenfluh, M., Fischer, R., Friedrich, M., & Pestel, E. (2018). *Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen* (SVI Forschungsbericht Nr. 2015/001; S. 283). Bundesamt fuer Strassen.

Rieser, N., Tasnady, B., de Vries, N., Rothenfluh, M., & Fischer, R. (2018). *Qualitätssicherung von Verkehrsmodellberechnungen* (Forschungsprojekt SVI 2015/001 Nr. 1645). Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI). <http://www.mobilityplatform.ch>

Ritz, C. (2019). *Modellierung und Wirkungen von Maßnahmen der städtischen Verkehrsplanung*.

Roorda, M. J., Miller, E. J., & Habib, K. M. N. (2008). Validation of TASHA: A 24-h activity scheduling microsimulation model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(2), 360–375. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2007.10.004>

RSG. (2020, September 14). *SEMCOG ActivitySim Deployment Phase I*. Zephyr Transport Event, San Francisco. https://drive.google.com/file/d/13_t5qw9OBGpH-saajHCALxuz9Bw6qMDIQ/view

Sall, E. (2012). *SF-Champ: How we use it*. TMIP Webinar Series. <https://tmip.org/content/sfctas-experience-using-its-sf-champ-activity-based-model>

Scherr, W., & Bützberger, P. (2016, Mai). *Calibration of the Swiss Rail Model Using Longitudinal Demand Observation*. STRC, Ascona.

Scherr, W., Johsi, C., Manser, P., Frischknecht, N., & Métrailler, D. (2020). *Towards agent-based travel demand simulation across all mobility choices – the role of balancing preferences and constraints*. 20(4), 21. <https://doi.org/10.18757/ejtir.2020.20.4.4463>

Scherr, W., Johsi, C., Manser, P., Frischknecht, N., & Métrailler, D. (2019). *An Activity-based Travel Demand Model of Switzerland Based on Choices and Constraints*. 21. http://transp-or.epfl.ch/heart/2019/abstracts/hEART_2019_paper_128.pdf

Scherr, W., Manser, P., & Bützberger, P. (2019). *SIMBA MOBi: Microscopic Mobility Simulation for Corporate Planning*. 14. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.trpro.2020.09.004>

SFMTA. (2019). *San Francisco Mobility Trends, Report 2018*. San Francisco Municipal Transportation Agency. https://www.sfmta.com/sites/default/files/reports-and-documents/2019/01/sfmta_mobility_trends_report_2018.pdf

Sheffi, Y. (1985). *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis With Mathematical Programming Methods*. Prentice Hall.

Soo, J., Ettema, D., & Ottens, H. (2009). Towards a Multi-activity multi-person accessibility measure: Concept and first tests. In R. Kitamura, T. Yoshii, & T. Yamamoto, *Expanding Sphere of Travel Behaviour Research* (S. 745–768). Emerald Group Publishing.

Sun, L., & Erath, A. (2015). A Bayesian network approach for population synthesis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 61, 49–62. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.10.010>

Timmermans, H., & Arentze, T. A. (2011). Transport Models and Urban Planning Practice: Experiences with Albatross. *Transport Reviews*, 31(2), 199–207. <https://doi.org/10.1080/01441647.2010.518292>

Transnationaler Eurodistrict Basel. (2013). *Haushaltsbefragung im deutschen und französischen Teil des TEB* (Stärkung des öffentlichen Verkehrs und der kombinierten Mobilität (P&R/B&R) im Trinationalen Eurodistrict Basel:). Transnationaler Eurodistrict Basel.

Transoptima, TransSol, PTV Transport Consult GmbH, PTV AG, & Strittmatter Partner AG. (2020). *Modelletablierung Nationales Personenverkehrsmodell (NPVM) 2017* [Schlussbericht]. Im Auftrag des Bundesamt für Raumentwicklung (ARE).

Vitins, B. J. (2014). *Shape Grammars for Urban Network Design* [Doctoral Thesis, ETH Zurich]. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010279005>

Vitins, B. J., & Erath, A. (2019). *Destination choice modeling with spatially distributed constraints*. 19th Swiss Transport Research Conference (STRC 2019). <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/342829>

Vitins, B. J., Erath, A., & Axhausen, K. W. (2016). Integration of a Capacity-Constrained Workplace Choice Model: Recent Developments and Applications with an Agent-Based Simulation in Singapore. *Transportation Research Record*, 2564(1), 1–13. <https://doi.org/10.3141/2564-01>

Vovsha, P., Bradley, M. A., & Bowman, J. L. (2004). Activity-based travel forecasting models in the United States: Progress since 1995 and Prospects for the Future. In EIRASS (Hrsg.), *EIRASS Conference in Advances in Activity Based Approaches*. http://www.jbowman.net/papers/2004.Vovsha_Bradley_Bowman.Progress_since_1995.pdf

Vovsha, P., Bradley, M., Bowman, J. L., & Bowman. (2004). Activity-based travel forecasting models in the United States: Progress since 1995 and Prospects for the Future. *EIRASS Conference on Progress in Activity-Based Analysis*. /paper/Activity-based-travel-forecasting-models-in-the-%3A-Vovsha-Bowman/4bd2b4f3803faa4a23ecc2bd42d4829f9ebc277f0

Vovsha, P., Petersen, E., & Donnelly, R. (2002). Microsimulation in Travel Demand Modeling: Lessons Learned from the New York Best Practice Model. *Transportation Research Record*, 1805, 68–77.

Vrtic, M., Schüssler, N., Erath, A., Bürgle, M., Axhausen, K., Frejinger, E., Stojanovic, J., Bierlaire, M., Rudel, R., Scagnolari, S., & Maggi, R. (2007). Einbezug von Reisekosten bei der Modellierung des Mobilitätsverhaltens. *Forschungsauftrag SVI, 2005/004*.

Vrtic, M., Weis, C., & Fröhlich, P. (2016). *Zeitscheiben und Spitzenstundenmodelle für den Basiszustand 2010 und Referenzzustand 2040* [Schlussbericht]. Im Auftrag des Bundesamt für Raumentwicklung (ARE).

Vrtic, M., Weis, C., Fröhlich, P., Uhlig, J., Dugge, B., Landmann, J., Pillat, J., Bodenmann, B., Bürki, P., Philipp, C., Bernhard, N., & Kessler, L. (2020). *Modelletablierung Nationales Personenverkehrsmodell (NPVM) 2017* (S. 339) [Schlussbericht]. 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

Wallace, B., Barnes, J., & Rutherford, G. S. (2000). Evaluating the Effects of Traveler and Trip Characteristics on Trip Chaining, with Implications for Transportation Demand Management Strategies. *Transportation Research Record*, 1718(1), 97–106. <https://doi.org/10.3141/1718-13>

Wang, Y., Szeto, W. Y., Han, K., & Friesz, T. L. (2018). Dynamic traffic assignment: A review of the methodological advances for environmentally sustainable road transportation applications. *Transportation Research Part B: Methodological*, 111, 370–394. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.03.011>

Weis, C., Vrtic, M., Schmid, B., & Axhausen, K. W. (2017). *Analyse der SP-Befragung 2015 zum Verkehrsverhalten im Personenverkehr* [Schlussbericht]. Im Auftrag des Bundesamt für Raumentwicklung (ARE).

WU, J. H., FLORIAN, M., & MARCOTTE, P. (1994). Transit Equilibrium Assignment: A Model and Solution Algorithms. *Transportation Science*, 28(3), 193–203.

Ziemke, D., Metzler, S., & Nagel, K. (2017). Modeling bicycle traffic in an agent-based transport simulation. *Procedia Computer Science*, 109, 923–928. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.424>

Zorn, L., Sall, E., & Bomberg, M. (2012). *Completing the cycle: Incorporating cycletracks into SF-CHAMP*. 4th Transportation Research Board Conference on Innovations in Travel Modeling, Tampa.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 30.8.2021

Grunddaten

Projekt-Nr.: SVI 2018/004
 Projekttitel: Aktivitätenbasierte Verkehrsmodelle
 Enddatum: 31.10.2021

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Mit dieser Studie wird den Betreibern von Verkehrsmodellen eine Entscheidungshilfe zum Einsatz von aktivitätsbasierten Modellen (ABM) gegeben. Die Vor- und Nachteile eines ABM gegenüber aggregierten Verkehrsnachfragemodellen wurden einerseits anhand von Experteninterviews und Literatur und andererseits durch einen konkreten Modellvergleich zwischen dem ABM Basel und dem aggregierten Modell GVM Basel für denselben Perimeter Basel herausgearbeitet. In den Experteninterviews zeigte sich, dass ABMs in der Praxis unter bestimmten Voraussetzungen bereits im Einsatz sind. Dazu zählen die Relevanz der mit dem Modell zu beantwortenden Fragestellungen und die Verfügbarkeit der notwendigen hardwaretechnischen und personellen Ressourcen beim Betreiber. Bei den meisten Betreibern von ABM wird dabei aus Ressourcengründen ein aktivitätsbasiertes Nachfragemodell mit einem aggregierten Umlagemodell gekoppelt. Der Modellvergleich anhand des Perimeters Basel zeigte, dass alle wesentlichen Schritte im ABM wie auch in einem aggregierten Modell abgebildet werden können. In der Nachfrageberechnung eines ABMs können über ein aggregiertes Modell hinaus je nach Modellanforderungen Funktionen und Abhängigkeiten abgebildet werden. Dies erfordert jedoch einen zusätzlichen Erstellungs- und Berechnungsaufwand. Im ABM Basel wurde eine MATSim Simulation angewendet; um das volle Potential und die Vorteile nutzen zu können, wäre die Parameterschätzung insbesondere bei der Zeitwahl und im ÖV noch zu ergänzen. Die beispielhaften Modellanwendungen haben gezeigt, dass alle Modellschritte des ABMs und des aggregierten Modells eine funktionierende, massnahsensensitive Methodik aufweisen. Beim Vergleich der Routenwahl beider Modellansätze ist die Stochastik der agentenbasierten Simulation zu beachten. Generell ist bei einem ABM Einsatz mit einem höheren Erstellungs- und Bearbeitungsaufwand zu rechnen. Zusammenfassend kann keine generelle Überlegenheit eines Modelltyps gefolgert werden. Vielmehr müssen die Methoden kombiniert werden, um eine möglichst optimale Lösung für die Modelleinsätze zu erzielen. Für die zukünftige Entwicklung ist es hilfreich, zusätzliche ABM Modellanwendungen parallel zu einer Anwendung eines aggregierten Modells durchzuführen und auszuwerten, um speziell die Umsetzung und Folgen der methodischen Unterschiede in der Praxis herauszuarbeiten.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die Projektziele konnten erreicht werden. Die Erkenntnisse der Experteninterviews, der Literaturrecherche, des Modellvergleichs sowie der Modellanwendungen anhand mehrerer Beispiele geben einen breiten Überblick über die Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den aktivitätenbasierten Verkehrsmodellen und den klassischen makroskopischen Modellen. Diese Merkmale dienen als Grundlage für die Entscheidungshilfe welche für verschiedene Modellanwendungen die Vor- und Nachteile der Modellansätze und deren Teilmodelle aufzeigt.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die grundsätzliche Funktionalität und Anwendbarkeit eines aktivitätenbasierten Modells (ABM) konnte bei der Nachfrageberechnung wie auch in den durchgeführten Modellanwendungen nachgewiesen werden. Je nach Anwendungszweck empfehlen wir unterschiedliche Vorgehen. Die Kopplung eines aktivitätenbasierten Nachfragemodells mit einem traditionellen aggregierten Umlegungsmodell bietet gegenüber einem Vierstufenmodell Vorteile bezüglich Differenzierbarkeit und Konsistenz der Teilmodelle. Gleichzeitig sind im Vergleich zu einem Ansatz mit agenten-basierte Simulation der Rechenaufwand und Anforderungen der Stochastik geringer. Eine Kopplung mit einem agentenbasierten Simulationsmodell (z.B. MATSim) empfiehlt sich für Anwendungen, welche eine triple convergence mit der Rückkoppelung der Zeit-, Verkehrsmittel- und Routenwahl erfordern und alle personenspezifischen und tourbasierten Informationen der Agenten in allen Teilmodellen und der Simulation verfügbar sein müssen. Als weitere Schritte werden Pilotprojekte mit dem Ziel einer praxisnahen Modellumsetzung sowie die Entwicklung von Verkehrsverhaltensmodellen auf Ebene einzelner Touren empfohlen.

Publikationen:

Vitins, B.J. , A. Erath, M. Fellendorf und M. Arendt (2021): Aktivitätenbasierte Verkehrsmodelle, Schlussbericht, Forschungsprojekt SVI 2018/004.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Vitins

Vorname: Basil

Amt, Firma, Institut: ASE AG, Schweiz

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Alle Arbeitspakete des Forschungsprogramms wurden bearbeitet. Das Forschungsteam hat sehr viel Information zu aktivitätenbasierten Verkehrsmodellen (ABM) zusammengetragen. Die BK-Mitglieder haben davon profitiert. Alle Ziele des Projekts wurden adressiert.

Manche Ziele wurden nicht vollständig erreicht: Die Realitätstests (ABM versus aggregiertes Modell) ermöglichten nur für ausgewählte Modellelemente einen belastbaren Vergleich. In den Grundlagen der Modelltypen (Inputdaten, Verfahren, Parameter) gab es Differenzen, die eine Vergleichbarkeit erschweren. Die Ergebnisse der Realitätstests erlauben keine abschliessende Bewertung über den Reifegrad der ABM oder eine den aggregierten Modellen vergleichbare Plausibilität und Praxistauglichkeit. Die BK anerkennt, dass unter den Rahmenbedingungen der angestrebte Modellvergleich schwierig war.

Die Forschungsstelle hat die BK transparent über den Projektfortschritt informiert (Zwischenberichte, Sitzungen, Präsentationen). Die Forschungsstelle hat auf die umfangreichen Bemerkungen und Fragen der BK mündliche und/oder schriftliche Antworten gegeben und Änderungswünsche der BK im Bericht umgesetzt.

Der Bericht eröffnet die Möglichkeit sich über die Unterschiede zwischen den beiden Modelltypen zu informieren. Die Stärken und Schwächen werden jeweils herausgearbeitet. Der Bericht bietet eine aktuelle Orientierungshilfe für Modellbetreiber und Modellnutzer, wobei er sich mehr für Experten eignet als für LeserInnen ohne Vorkenntnisse in der Verkehrsmodellierung. Qualität und Verständlichkeit des Berichts liegen über dem Durchschnitt von SVI/ASTRA-Berichten.

Weiterentwicklung der ABM-Methoden und Instrumente (Software) bleibt notwendig. Die intensive und leidenschaftliche Diskussion zwischen Forschungsstelle und BK zeigte, dass es für Modellbetreiber in der Schweiz somit schwierig bleibt, zu entscheiden, ob sich Versuche mit der innovativen ABM-Methodik lohnen und - falls ja – wann und für welche Anwendungsbereiche. Eine wichtige Erkenntnis aus den Arbeiten der Forschungsstelle ist es, dass eine parallele Nutzung von ABM und Makromodell eine Option für spezifische Fragestellungen darstellt.

Umsetzung:

Der Bericht eignet sich für Fachleute. Die BK empfiehlt, den Bericht zu veröffentlichen.

Die Erstellung eines SVI-Merkblattes wird nicht empfohlen, da die Forschungsergebnisse aktuell noch keine eindeutigen Empfehlungen zu diesen komplexen Thema zulassen.

weitergehender Forschungsbedarf:

1. In Abkehr von der Frage "entweder ABM - oder aggregiertes Modell" sollten Mischnutzungen untersucht werden (begleitende Forschung):
 - a) Weiterentwicklung bestehender aggregierter Modelle mit ABM-Elementen (Hybrid-Modelle).
 - b) Temporärer Parallelbetrieb von ABM und aggregiertem Modell.
 - c) Einsatz von ABM ergänzend zu den aggregierten Modellen.
2. RoadMap und Aufwandsschätzungen für Modellbetreiber, die in Richtung ABM gehen wollen.
3. Begleitende Forschung von realen Modell-Anwendungen. Wenn möglich Verwendung kalibrierter und in den Eingangsdaten abgestimmter Modelle, z.B. in der Schweiz: NPVM des UVEK und SIMBA MOBI der SBB. Idealerweise auch Modellanalyse vor und nach der Inbetriebnahme des simulierten neuen Verkehrsangebots.
4. Test bestehender ABM-Software-Plattformen (z.B. ActivitySim, ABM-Modul in PTV Visum).
5. Allgemein: Neben MATSim auch andere ABM-Methoden untersuchen (Die Verkehrsforschung in der Schweiz fokussiert seit Jahren auf MATSim).

Einfluss auf Normenwerk:

Keine

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Scherr

Vorname: Wolfgang

Amt, Firma, Institut: SBB

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Bern, 30. 8. 21