

MASTERTHESIS
Florian J. Ocker

Entwicklung eines agentenbasierten multimodalen Verkehrsmodells mit MARS

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK
Department Informatik

Faculty of Computer Science and Engineering
Department Computer Science

Florian J. Ocker

Entwicklung eines agentenbasierten multimodalen Verkehrsmodells mit MARS

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung
im Studiengang Master of Science Informatik
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Thomas Clemen
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Marina Tropmann-Frick

Eingereicht am: 18. Juni 2020

Florian J. Ocker

Thema der Arbeit

Entwicklung eines agentenbasierten multimodalen Verkehrsmodells mit MARS

Stichworte

Verkehrssimulation, Multimodalität, Multi-Agenten Modell, MARS

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines multimodalen Verkehrsmodells für das MARS System. Unter Multimodalität wird die Verfügbarkeit und bedarfsgerechte Wahl von unterschiedlichen Verkehrsmitteln verstanden. Es wird untersucht, ob der vorgestellte Ansatz multimodales Verkehrsverhalten grundsätzlich abbilden kann. Diesbezüglich wird der Reisezeitvorteil der Verkehrsmittel miteinander verglichen. Zudem wird mit Hilfe eines Verkehrsbedarfssystems der Einfluss von verfügbaren Transportmitteln auf die Reisedauer untersucht.

Florian J. Ocker

Title of Thesis

Developing an agent-based multimodal traffic simulation model in MARS

Keywords

Traffic Simulation, Multimodality, Multi-Agent Model, MARS

Abstract

This thesis describes the development of a multimodal traffic model for the MARS system. The proposed model should provide a demand-based choice of different means of transport, the modal types. Therefore the time advantage of different vehicles is compared with each other and with the walking modality. Moreover, the travel time is analysed for a transport needs model in respect to the availability and free choice of different modal types.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Verkehrsforschung mit MARS	2
1.3 Hypothesen	3
1.4 Gliederung der Arbeit	4
2 Grundlagen	6
2.1 Historie der Verkehrsforschung	6
2.2 Modellansätze in der Verkehrsforschung	7
2.3 Mikroskopische Modelansätze	8
2.3.1 Zelluläre Automaten	8
2.3.2 Agenten-basierte Modelle	9
2.4 Multimodalität, Intermodalität und Modal Split	10
2.5 Fahrzeugfolgemodelle	13
2.5.1 Intelligent Driver Modell	14
2.5.2 Wiedemann Modelle	14
3 Anforderungsanalyse	16
3.1 Anforderungen an die Umwelt	16
3.1.1 Straßennetz	16
3.1.2 Straßenverkehrsregeln	17
3.1.3 Geospatale Raumstrukturen für die Routenplanung	18
3.2 Anforderungen an die Agenten	19
3.2.1 Fußgänger	20
3.2.2 Fahrzeugführer	20
3.2.3 Aktivitätenpläne für Verkehrsnachfragemodelle	21
3.2.4 Routensuche für Verkehrsmittel	23

3.3	Anforderungen an das Modell	25
3.3.1	Detailgrad	25
3.3.2	Funktionale Anforderungen	25
3.3.3	Integration weiterer Modaltypen	27
3.3.4	Einschränkende Annahmen	27
4	Experimente	29
4.1	Testumgebung: Hamburg Altona	29
4.2	Experimente für Hypothese 1	32
4.2.1	Experimente der Modellintegration	32
4.2.2	Experimente der Intermodalität	34
4.2.3	Experimente zum Reisezeitvorteil	36
4.3	Experimente für Hypothese 2	36
4.4	Experimente für Hypothese 3	38
5	Konzeption und Implementierung	40
5.1	Design der Umgebungskomponenten	40
5.1.1	Straßennetzkomponente	40
5.1.2	Straßenverkehrsregeln und Ampeln	42
5.1.3	Geospatiale Raumstrukturen für die Routenplanung	44
5.1.4	Multimodale Routensuche	45
5.2	Design des Agenten	47
5.2.1	Kontrakt-Muster	47
5.2.2	Multimodaler Agent	48
5.2.3	Fußgängermodellierung	50
5.2.4	Rolle als Beifahrer	51
5.2.5	Rolle als Fahrzeugführer	52
5.2.6	Domänenmodell	53
5.3	Verkehrsnachfragemodell durch Tagespläne	54
6	Ergebnisse	58
6.1	Ergebnisse für Hypothese 1	58
6.1.1	Ergebnisse der Modellintegration	58
6.1.2	Ergebnisse der Intermodalität	62
6.1.3	Ergebnisse zum Reisezeitvorteil	69
6.2	Ergebnisse für Hypothese 2	71
6.3	Ergebnisse für Hypothese 3	77

7 Diskussion	81
7.1 Diskussion der Hypothese 1	81
7.1.1 Diskussion zur Modellintegration	81
7.1.2 Diskussion zur Intermodalität	83
7.1.3 Diskussion zum Reisezeitvorteil	84
7.2 Diskussion der Hypothese 2	84
7.3 Diskussion der Hypothese 3	86
7.4 Schlussbetrachtung	88
8 Ausblick	91
Literaturverzeichnis	94
Selbstständigkeitserklärung	100

Abbildungsverzeichnis

2.1	Visualisierung der unterschiedlichen Modellansätze: Momentaufnahme eines Straßenabschnitts zu einem Zeitpunkt t_0 wird entweder durch <i>makroskopische</i> Kennzahlen wie Verkehrsdichte $p(x, t_0)$, Fluss $Q(x, t_0)$ oder durchschnittliche Geschwindigkeit $V(x, t_0)$, oder, <i>mikroskopisch</i> , nach der Position $x_a(t_0)$ einzelner Autofahreragenten a dargestellt. Für <i>zelluläre Automaten</i> wird die Straße in Zellen unterteilt, die entweder besetzt oder frei sind. (Kesting et al., 2009)	9
2.2	Verdeutlichung von inter- und multimodalem Verkehrsverhalten (Ahrens et al., 2010)	11
2.3	Modal Split 2017 nach Anzahl Wegen (Verkehrsaufkommen) in Hamburg (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2018)	12
2.4	Übersicht über die Schranken des Wiedemann 99 Modells und deren Auswirkung in Abhängigkeit zu den Achsen, dX , dem Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug und dV , der momentanen Geschwindigkeitsveränderung (Mulack, 2020) (auf Basis von (Wiedemann, 1996)). Detaillierte Beschreibungen der Schranken SDX und SDV (bei Mulack (2020))	15
3.1	Die drei hierarchischen Stufen des Fahrprozesses (Thomson et al., 2006)	21
3.2	Beispielhafter Beginn eines Tagesplanes, welcher bereits mit Verkehrsmittelgruppen zur Zielerreichung angereichert ist (Nguyen et al., 2012)	22
3.3	Vollständiger Tagesplan mit Verkehrsmittel-bezogenen Routen zu den Zielorten (Banos et al., 2005)	23
3.4	Wechsel zwischen verschiedenen verkehrsmodalen Layern an definierten Übergangspunkten (Nguyen et al., 2012)	24
3.5	Themenschwerpunkte in Verkehrssystem sortiert nach dafür typischen Zeitskalen (Kesting et al., 2009)	26
4.1	Hamburg Altona, Stadtteilgrenzen, Lage in Hamburg ¹	29

4.2	Hamburg Altona mit Straßennetz, Parkraum für Automobile (rote Bereiche) und Leihstationen für Fahrräder (blaue Punkte)	30
4.3	Testumgebung Altona Altstadt (Ausschnitt), Parkraum für Automobile (schraffierte Bereiche) und Leihstationen für Fahrräder (blaue Punkte) . .	31
4.4	Testumgebung Bleikenallee mit vier Knoten, Umstiegspunkte für Fahrrad (Symbol) und Automobil (schraffierte Bereiche) an Knoten 2 und 3.	31
4.5	Route von Mörkenstraße 47 (Osten) bis Sülldorfer Kirchenweg 225 (Westen)	33
4.6	Wegevergleich: von Tür zu Tür im Stadtverkehr. Entfernungsabhängige Reisezeitaufwände in Minuten des Fußverkehrs, des Radverkehrs und des Pkw (reduziert nach Quelle Umweltbundesamt (2014))	38
5.1	ISpatialGraphEnvironment und abhängige Komponenten	41
5.2	Implementierung von Ampeln mittels INodeGuard	43
5.3	Parkraumlayer (Ausschnitt Ehrenbergstraße) mit Einzelparkplätzen (parallel zur Straße) und Parkfläche mit Kapazität für mehrere Fahrzeuge . . .	46
5.4	Multimodale Route und Finder	46
5.5	Kontrakt zwischen Agent und zu benutzender Entität, hier Mensch und Automobil	48
5.6	Multimodaler Agent mit Modellausprägungen: Fußgänger (oben) und Autofahrer (unten)	49
5.7	Steuerungsschnittstelle am Beispiel des Autofahrens	52
5.8	Domäne SOH im Zusammenhang mit dem MultimodalAgent	54
5.9	Tagesplan des Citizen-Agent angereichert um Positionen aus GISVectorLayern	55
5.10	Wegzwecke in Abhängigkeit zur Uhrzeit der befragten Personen aus der Studie <i>Mobilität in Deutschland</i> ²	56
6.1	Wunschgeschwindigkeit (in km/h) von Fußgängern nach Geschlecht	59
6.2	Geschwindigkeit (in km/h) eines Fußgängers mit und ohne weitere Passanten	59
6.3	Klassenmodell des integrierten Auto-Agenten	60
6.4	Geschwindigkeitsveränderung eines Automobils von Mörkenstraße 47 bis Sülldorfer Kirchenweg 225, mit Ampelstops	61
6.5	Geschwindigkeitsveränderung eines Radfahrers von Mörkenstraße 47 bis Sülldorfer Kirchenweg 225, mit Ampelstops	62
6.6	Route von Knoten 1 (süd-ost) zu 4 (west) als reiner Fußweg	62

6.7	Route von Knoten 1 (süd-ost) zu 4 (west) als kombinierter Fuß- und Autoweg (beige und rot)	63
6.8	Route von Knoten 1 (süd-ost) zu 4 (west) als kombinierter Fuß- und Fahrradweg (beige und blau)	64
6.9	Anzahl bereitgestellter Routen nach Modaltyp und Anzahl Wegeketten, sowie durchschnittliche Länge intermodaler Routen nach Verkehrsmittel	64
6.10	Intermodale Route mit Umweg (Start im Westen, Ziel im Südosten), Links: ursprüngliche, intermodale Autoroute, Mitte: Rückweg zu ursprünglichem Parkplatz mit Auto, Rechts: Restweg zum Ziel zu Fuß	65
6.11	Intermodale Route (Gehen, Fahren, Gehen; Linien) und Fahrt d. Agenten (Punkte; Größe u. Abstände der Punkte korrelieren mit Geschw.)	66
6.12	Abfahren von drei intermodalen Routen mit Hauptverkehrsmittel Automobil im Geschwindigkeitsverlauf über die Zeit	66
6.13	Intermodale Route Fußgänger-Auto mit Umweg durch Parkplatzsuche. Links oben: Start zu Fuß, Umstieg ins Auto. Oben rechts: Rückweg mit Auto zu ursprünglichem Parkplatz mit freier Parkfläche. Unten: Zielerreichung zu Fuß von abgestelltem Parkplatz ausgehend	67
6.14	Abfahren von drei intermodalen Routen mit Hauptverkehrsmittel Fahrrad im Geschwindigkeitsverlauf über die Zeit	67
6.15	Zufällige Route in Altona-Altstadt mit Hauptverkehrsmittel Fahrrad im Geschwindigkeitsverlauf über die Zeit	68
6.16	Vergleich Isochronen von Fußgängern und simulierte Reichweite Auto (oben) und Fahrrad (unten) für 300, 500, 700, 900 Sekunden (von hellen zu dunkleren Farbtönen)	70
6.17	Reisezeitvorteil Fußgänger gegenüber Autofahrer in Altona-Alstadt	72
6.18	Reisezeitvorteil Radfahrer gegenüber Autofahrer in Altona-Alstadt	73
6.19	Reisezeitvorteil Fußgänger gegenüber Radfahrer in Altona-Alstadt	74
6.20	Reisezeitvorteil Fußgänger gegenüber Autofahrer in Altona (Bezirk)	74
6.21	Reisezeitvorteil Radfahrer gegenüber Autofahrer in Altona (Bezirk)	75
6.22	Reisezeitvorteil Fußgänger gegenüber Radfahrer in Altona (Bezirk)	76
6.23	Umwege von Radfahrer und Autofahrer zu Umsteigepunkten im Vergleich zum direkten Fußweg in Altona-Alstadt und Altona (Bezirk)	76
6.24	Globale Tagesreisezeit mit unterschiedlicher Verfügbarkeit von Modalitäten im Vergleich Altona-Altstadt, Altona (Bezirk) und Altona (Bezirk) mit Autozugang für jeden Agenten statt nur für 32,6%	78

6.25	Modal Split für Altona-Altstadt nach Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung. Links: Verfügbarkeit von Rad und Fuß. Rechts: Verfügbarkeit von Auto (für 32,6%), Rad und Fuß.	78
6.26	Modal Split für Altona (Bezirk) nach Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung. Links: Verfügbarkeit von Rad und Fuß. Rechts: Verfügbarkeit von Auto (für 32,6%), Rad und Fuß.	79
6.27	Modal Split für Altona (Bezirk) nach Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung mit Verfügbarkeit von Auto (für alle Agenten), Rad und Fuß . . .	80

1 Einleitung

Der Verkehr in der Stadt ist vielfältig. Durch das Wachstum großer Städte und der Verfügbarkeit neuer Verkehrsmittel der Elektromobilität verändert sich der urbane Verkehr und stellt Städteplaner und Entscheidungsträger vor Herausforderungen (Ernst et al., 2013). Dies äußert sich beispielsweise in den Wünschen von Bevölkerungsteilen nach autofreien Innenstädten (Andor et al., 2020). Die Funktionsweise des Verkehrs zu untersuchen und Entscheidungswerkzeuge zu entwickeln sind sinnvolle Voraussetzungen für die aktive Gestaltung von Verkehrskonzepten. In diesem Zusammenhang muss vor allem das Zusammenspiel verschiedener Verkehrsmittel betrachtet werden. Können diese frei gewählt und gegebenenfalls kombiniert werden, spricht man von Multimodalität. Die Zukunft der Stadt ist so vielfältig wie ihre Verkehrsmittel, multimodal.

1.1 Motivation

Mobilität ist für eine moderne Gesellschaft ein sehr wichtiges Thema. Verkehr ermöglicht den Austausch von Waren, das Pendeln und die Freizügigkeit von Menschen, es bietet Zugang zu Märkten, Bildung, Pflege, Erholung und weiteren Bereichen der Gesellschaft (Tchappi Haman et al., 2017). Das genaue Wissen um diese Mobilitätsbedürfnisse und das tägliche Verkehrsgeschehen ist eine Voraussetzung zur Bereitstellung der erforderlichen Ressourcen. Während in den vergangenen Jahrzehnten ein stetig wachsender *motorisierter Individualverkehr* (MIV) zu verzeichnen war, konzentrieren sich inzwischen viele Bemühungen darauf, weiteren Verkehrsangeboten wie dem öffentlichen Verkehr, dem Fahrradfahren und dem Zufußgehen mehr Aufmerksamkeit zukommen zu lassen. Nicht nur in Deutschland ist erkennbar, dass ein kontinuierlich wachsender Autoverkehr an Grenzen stößt. Trotzdem wird er ein prägender Bestandteil des Verkehrs bleiben und muss aktiv gestaltet werden. (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2018)

Die Modellbildung und Simulation ist im wissenschaftlichen Bereich ein bedeutender Zweig, da nicht jeder Sachverhalt analytisch zu erfassen ist. Dynamische Systeme können in Simulationsmodellen abgebildet und anschließend wissenschaftlich untersucht werden. Mit Hilfe eines realistischen Simulationsmodells kann Systemverhalten vorhergesagt werden und Änderungen am Modell können kostengünstig und ohne schwerwiegende Folgen untersucht werden. Die Leistungsfähigkeit moderner Computer ermöglicht die Entwicklung von Simulationssystemen zur Analyse des Straßenverkehrs. Die in der Verkehrsplanung eingesetzten Simulationsmodelle können als Entscheidungshilfe dienen. Unter anderem werden Erkenntnisse der Verkehrsforschung zur verbesserten Verkehrssteuerung eingesetzt (Nagel and Schreckenberg, 1992). Ein weiteres Beispiel ist das Verständnis über die Stautentstehung auf Autobahnen, welches einen gezielten Eingriff in den Straßenverkehr zur Stauabmilderung ermöglicht. Für die Analyse des Straßenverkehrs gibt es zu diesem Zweck eine Reihe von unterschiedlichen Verkehrsflussmodellen.

Für die Verkehrsflussmodellierung weiterer Verkehrsarten wie Radfahrer, Läufer oder Inline-Skater existieren im Gegensatz zur Verkehrsplanung nahezu keine Verkehrsflussmodelle, obwohl dafür durchaus Bedarf besteht.

—Treiber and Kesting (2010b, S.59)

Es gibt also nicht nur einen Bedarf für Modelle anderer Verkehrsteilnehmer als dem MIV sondern auch für ihr Zusammenspiel respektive ihrer gegenseitigen Beeinflussung. Die Einführung von Multimodalität ermöglicht sodann einen ganzheitlichen Blick auf den Stadtverkehr. Die sich verändernden Verkehrsangebote und -nutzungen erfordern auch mächtigere Analysewerkzeuge, welche diese Aspekte von Mobilität berücksichtigen. Diese Arbeit kann als Grundlage für ein solches Werkzeug dienen.

1.2 Verkehrsforschung mit MARS

*Multi-Agent Research and Simulation*¹ (MARS) ist der Name einer Forschungsgruppe der Hochschule für Angewandte Wissenschaften in Hamburg mit dem Schwerpunkt Multiagentensysteme (MAS). Die Bandbreite der Modelle, die mit den Simulationswerkzeugen der Forschungsgruppe simuliert werden, reicht von sozio-ökologischen Modellen über Entfluchtungssimulationen bis hin zu epidemiologischen Untersuchungen. Seit 2017 werden Werkzeuge entwickelt, die auf Verkehrsmodelle spezialisiert sind. Diese werden im

¹<https://mars-group.org/>

Rahmen des Projekts *Smart Open Hamburg*² (SOH) kontinuierlich weiterentwickelt. Zum Ausgangspunkt dieser Arbeit stand ein entwickeltes Automobilmodell (Weyl, 2019) sowie ein Fußgängermodell zur Verfügung, welches im Rahmen einer *Smart Rescue*³ Untersuchung modelliert wurde (Löffler, 2019). Zu einem späteren Zeitpunkt kam ein Fahrradmodell dazu, welches zeitgleich zu dieser Arbeit von Mulack (2020) entwickelt wurde. Grundlage dieser drei Fortbewegungsmodelle bildet das `SpatialGraphEnvironment`, eine für das MARS Framework entwickelte Datenstruktur, die ein Verkehrsnetz in einem Graphen kapselt und es für Agenten, die sich an einem vorgegebenen Datenmodell orientieren, verfügbar macht (Weyl et al., 2018). Im Rahmen des *Smart Open Hamburg* Projekts sollen die bestehenden Modelle integriert und um weitere Verkehrsmittel erweitert werden um den stadttypischen *Modal Split* aus öffentlichem Nahverkehr, Fußgänger und Straßenverkehr abbilden zu können (Randelhoff, 2018). Diese Arbeit integriert Fußgänger, Fahrradfahrer und Autofahrer zu einem multimodalen Verkehrsmodell und bildet die Grundlage für spätere Weiterentwicklungen im Kontext von SOH.

1.3 Hypothesen

Aus der Entwicklung einer Verkehrssimulation folgt die Erwartung damit domänenspezifische Fragestellungen untersuchen zu können. Die Integration verschiedener Modelle mit monomodalen Verkehrsmitteln führt zu einem detailliertem Verkehrsnachfragemodell. Nicht nur die Darstellungsmöglichkeit intermodaler Verkehrsketten, also das Wechseln zwischen Transportmitteln auf einer Route, sondern auch die Notwendigkeit von Einsteige- und Umsteigepunkte verändert den Wegeverlauf hin zum Ziel. Multimodalität bedeutet auch die Verfügbarkeit verschiedener Verkehrsmittel und somit die Möglichkeit der Auswahl. Diese Aspekte verändern das Mobilitätsverhalten und führen zur Annahme von folgenden Hypothesen bezüglich der Charakteristik der Verkehrssimulation.

H1 Der Agentenentwurf ist grundsätzlich dazu geeignet Multimodalität im Stadtverkehr zu modellieren.

Die erste Hypothese unterstellt, dass alle integrierten Verkehrsmittel im Modell genutzt werden können. Verkehrsmittel sollen, dem Detailgrad dieser Arbeit zur Folge, eine räumliche Ausdehnung haben und müssen somit bei Nichtbenutzung auf entsprechenden Parkflächen abgestellt werden. Es müssen sodann intermodale Reiseketten genutzt werden,

²<https://www.smartopenhamburg.de/>

³Smart Rescue hat die zeitnahe Verfügbarkeit von Ersthelfern am Einsatzort zum Ziel.

um die Umsteigepunkte zu den Transportmitteln zu erreichen. Schließlich soll untersucht werden, ob es unter Rücksichtnahme des situativen Angebots zu einer freien Wahlmöglichkeit kommt und diese auf Basis der Reisezeitverkürzung gewählt wird.

H2 Die Reisezeitvorteile des Pkw im Stadtverkehr werden häufig überschätzt. Bis zu einer Distanz von 1,5 km kann das Zufußgehen und bis 5 km das Fahrradfahren schneller sein als die Fahrt mit dem Pkw aufgrund der verhältnismäßig langen Parksuchdauer.

Durch die Notwendigkeit des Abstellens nicht genutzter Transportmittel erlaubt das Modell die Untersuchung einer These von Randelhoff (2018), welcher prognostiziert, dass für verhältnismäßig kurze Wege das Zufußgehen und für mittellange Wege das Fahrradfahren von Vorteil sind. Die unterschiedliche Verteilung von Parkraum über die Stadt und die Verdichtung von Parkraum in zentrumnäheren Gegenden wird Einfluss darauf haben, ob der Reisezeitvorteil des PKWs aufgehoben wird oder nicht.

H3 Die Hinzunahme weiterer Modalitäten in der Reihenfolge (Fußgänger, Fahrrad, Automobil) senkt die global zusammengefasste Reisedauer aller Verkehrsteilnehmer und nähert sich in der Verkehrsmittelwahl dem Modal Split an.

Die aufgezählte Reihenfolge der Transportmittel ist nach ihrer Höchstgeschwindigkeit sortiert. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass die Wegezeit mit der jeweiligen Hinzunahme des Verkehrsmittels kürzer wird. Automobil und Fahrrad teilen sich jedoch das Straßennetz, wodurch es wiederum zur Verlangsamungen aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung kommen kann (siehe Mulack (2020)). Hinzunahme von Verkehrsmitteln bedeutet jedoch auch Wahlfreiheit und Intermodalität. Deshalb überwiegt die Erwartung, dass sich die globale Reisedauer eines vergleichbaren Verkehrsnachfragemodells im Ganzen durch die Diversifizierung der Transportmittel verringern lässt. In den Versuchsreihen, die alle verfügbaren Verkehrsmittel integrieren, wird angenommen, dass der Modal Split von Altona, welches als Versuchsgebiet gewählt wurde, angenähert werden kann. Der Modal Split vergleicht den Anteil der Nutzung aller Verkehrsmittel miteinander.

1.4 Gliederung der Arbeit

Kapitel 2 (Grundlagen) führt umfassend in den Themenschwerpunkt der Arbeit ein indem verwandte Arbeiten in diesem Bereich vorgestellt werden. Bevor die Modellierung des Systems erfolgen kann, wird in Kapitel 3 eine Anforderungsanalyse durchgeführt.

Zur Untersuchung des Modells hinsichtlich der Hypothesen werden in Kapitel 4 Experimente beschrieben. Die Analyse und ausformulierten Experimente erlauben nun eine Modellbeschreibung. Design und Umsetzung finden sich in Kapitel 5 (Konzeption und Implementierung). In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Experimente dargelegt und diese dann in Kapitel 7 (Diskussion) diskutiert. Schließlich wird ein Ausblick für potentielle Weiterentwicklungen in Kapitel 8 angeregt.

2 Grundlagen

Das Kapitel Grundlagen befasst sich mit dem Feld der Verkehrssimulationen. Zunächst wird die historische Entwicklung der Verkehrsforschung beleuchtet. Die Unterschiedlichkeit der Fragestellungen in diesem Bereich führt zu dem Einsatz verschiedener Modelle, die sich in wesentlichen Aspekten voneinander unterscheiden. Ein besonderes Augenmerk wird auf die gewählte Detailtiefe gelegt. Dem wird durch die Darstellung mikroskopischer Modelansätze Rechnung getragen. Schließlich wird der Blick von allgemeinen Verkehrsmodellen auf die Unterklasse des multimodalen Ansätze verengt. Schwerpunkte in dieser Domäne werden anhand des aktuellen Forschungsstandes vorgestellt.

2.1 Historie der Verkehrsforschung

The volume of vehicular traffic in the past several years has rapidly outstripped the capacities of the nation's highways. It has become increasingly necessary to understand the dynamics of traffic flow and obtain a mathematical description of the process.

Das Verkehrsaufkommen hat in den letzten Jahren die Kapazität der Fernstraßen bei weitem überschritten. Damit einher steigt die Notwendigkeit, die Verkehrsdynamik zu verstehen und mathematisch beschreiben zu können.

—Harold Greenberg (1959)

Den Verkehr zu untersuchen und zu verstehen ist ein über mehrere Dekaden andauernder Prozess. Dies begann bereits in den 30er Jahren des 19. Jahrhunderts mit Untersuchungen von Verkehrsgrößen, wie der Verkehrszählung (Greenshields, 1935). Mit zunehmenden Straßenverkehr wuchs auch die Relevanz und damit einhergehend das Forschungsfeld. Induktionsschleifen zur automatisierten Verkehrszählungen (Greenberg, 1959) waren zu dieser Zeit noch nicht erfunden und so wurde manuell mit Stoppuhren gezählt. Der

Studienschwerpunkt verlagert sich anschließend von der Betrachtung des Gesamtsystems hin zu spezifischeren Ereignissen, wie dem Entstehen von Staus. Dafür wurde sich nicht mehr nur auf statistische und stochastische Modelle beschränkt sondern Ansätze aus der physikalische Strömungsdynamik untersucht (Lighthill and Graham, 1955; Nagel and Schreckenberg, 1992). Erkannt wurde, dass zum einen so genannte *Traffic humps* (streckenabschnitts-verdichteter Verkehr), die auf Engstellen (*Bottlenecks* wie Unfälle, Bauarbeiten oder Fahrbahnverengungen) treffen, ursächlich sind (Treiber et al., 2000). Zum anderen treten Staus aber ebenfalls in Situation auf, bei dem die reine Verkehrsdichte unterhalb der Straßenkapazität verbleibt. Dies lässt sich durch das individuelle Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer erklären, welche durch Rückkopplungseffekte den Verkehr verdichten bis hin zur Staubildung (Newell, 1961; Schadschneider, 2004; Treiber and Kesting, 2010a). Dem hierfür entwickelten Simulationsmodell folgten in den kommenden Dekaden eine Vielzahl unterschiedlicher Modellansätze. Diese können anhand ihrer Granularität in makroskopische, mesoskopische und mikroskopische Modelle unterteilt werden (Schadschneider, 2004; Tchappi Haman et al., 2017; Dallmeyer, 2014). Die aus diesen Modellansätzen entstanden Simulationsframeworks unterscheiden sich grundsätzlich in dem Detaillierungsgrad der Verkehrsbetrachtung. Einige der bedeutsamen mikroskopische Simulationswerkzeuge in der Verkehrsforschung sind: Matsim (Dallmeyer, 2014; Kesting et al., 2009), SUMO (Lopez et al., 2018), Vissim (Dallmeyer, 2014; Reimann, 2007) und Transims (Smith et al., 1995; Sokolowski and Banks, 2009). So wie sich die Verkehrsplanung in vielen großen Städten über den Großteil des 20. Jahrhunderts das Auto in den Mittelpunkt gestellt haben, spiegelte sich diese Priorisierung auch in der Forschung wieder (Treiber and Kesting, 2010b). In den letzten Jahrzehnten hat die Relevanz alternativer Fortbewegungsmittel erheblich zugenommen, so dass auch der Bedarf nach Simulationen anderer Mobilitätsmittel stieg (Kesting et al., 2009). Die Kombination von Verkehrsmitteln innerhalb desselben Modells, so genannten multimodalen Modellen, ist für eine umfassenderen Mobilitätssimulation im urbanen Raum notwendig geworden. Zu einem gewissen Grad können einige der oben genannten Werkzeuge so weiterentwickelt werden, dass sie auch multimodalen Verkehr abbilden können (Behrisch et al., 2010; Kagerbauer, 2010).

2.2 Modellansätze in der Verkehrsforschung

Die Simulationsmodelle in der Verkehrsforschung werden in drei Kategorien hinsichtlich ihrer Detailtiefe unterteilt: makroskopische, mikroskopisch und mesoskopisch (Reimann,

2007). In einem makroskopischen Modell wird der Verkehr beispielsweise als Partikelsystem beschrieben in denen Straßen eine bestimmte Kapazität haben und die Verkehrsteilnehmer als Partikel mit einer bestimmten Größe und einem vorgegebenen Abstand zu einander durch das System geleitet werden. Phänomene wie bspw. einen Spurwechsel sind nicht darstellbar. Dies ist hingegen in den mikroskopischen Modellen möglich, welche die einzelnen Verkehrsteilnehmer wie Busse, Autos und Fußgänger mit ihren spezifischen Eigenschaften modellieren. Im Kontrast zu den mathematischen Modellen des makroskopischen Ansatzes, entsteht der Verkehrsfluss durch die Interaktion der verschiedenen Entitäten miteinander und ihrer Umwelt. Das mesoskopische Modell schließlich verbindet Ansätze aus den beiden Modellen. Für bestimmte Bereiche der Simulation werden mikroskopische Modelle verwendet während der Gesamtfortschritt und die Gültigkeit der Simulation auf makroskopischer Ebene geprüft wird. (Tchappi Haman et al., 2017; Dallmeyer, 2014; de Souza et al., 2019)

2.3 Mikroskopische Modelansätze

Mikroskopische Simulationen können des weiteren in zwei Untergruppen unterteilt werden: Agenten-basierte Systeme und zelluläre Automaten (Treiber et al., 2000). Beiden Modellen ist gemein, dass sie jeden einzelnen Verkehrsteilnehmer mit seinen spezifischen Eigenschaften darstellen. Das führt zu hochdetaillierten Simulationen, da die Verkehrsteilnehmer nicht nur ihr persönliches Bewegungsverhalten umsetzen, sondern in Interaktion miteinander stehen. In der Vergangenheit wurde vornehmlich mit zellulären Automaten modelliert, da sie aufgrund ihrer Diskretisierung in Zeit und Raum deutlich weniger rechenintensiv waren als agenten-basierte Ansätze, welche nur in der Zeit nicht aber im Raum diskretisieren (Dallmeyer, 2014). Die stetige Steigerung der Rechenleistung führte dazu nun auch deutlich größere Szenarien umsetzen zu können (Foytik et al., 2017; Weyl et al., 2018).

2.3.1 Zelluläre Automaten

Für die Verkehrsforschung war das *Nagel-Schreckenberg*-Modell ein Meilenstein. Basierend auf einem zellulären Automaten, also sowohl zeit- als auch raumdiskret, konnten performante Simulationen durchgeführt werden, die in ihrer Ausprägung des Verkehrsflusses dennoch den Ergebnissen der makroskopischen Verkehrsmodelle ähnelten (Nagel

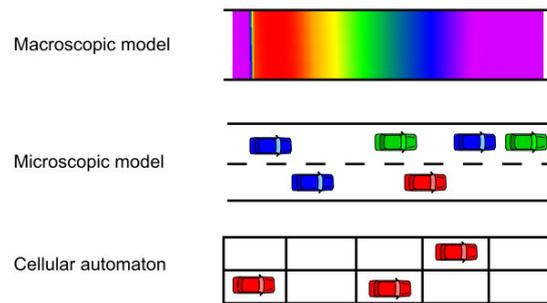


Abbildung 2.1: Visualisierung der unterschiedlichen Modellansätze: Momentaufnahme eines Straßenabschnitts zu einem Zeitpunkt t_0 wird entweder durch *makroskopische* Kennzahlen wie Verkehrsdichte $p(x, t_0)$, Fluss $Q(x, t_0)$ oder durchschnittliche Geschwindigkeit $V(x, t_0)$, oder, *mikroskopisch*, nach der Position $x_a(t_0)$ einzelner Autofahreragenten a dargestellt. Für *zelluläre Automaten* wird die Straße in Zellen unterteilt, die entweder besetzt oder frei sind. (Kesting et al., 2009)

and Schreckenberg, 1992). Modelliert wurde zunächst ein 1-spuriges Modell, welches in gleichmäßige Segmente unterteilt wurde. Jedes dieser Segmente konnte entweder ein Auto vollständig enthalten oder leer sein (boolesche Belegung; siehe Abbildung 2.1). Die Geschwindigkeit wurde als Anzahl der durchlaufenden Segmente pro Zeitschritt angegeben. Jedes Fahrzeug kalkuliert mit einem Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug um Kollisionen zu vermeiden. Dennoch kann es zu zufälligem Bremsverhalten kommen und in der Folge zu Staubildung. Dies ist in der starke Simplifizierung des Modells begründet. Trotz dieser Einschränkung können die relevanten Verkehrsgrößen durch die Simulationen nachgebildet werden, wodurch das Modell eine intensive Nutzung und Verbreitung fand (Dallmeyer, 2014).

2.3.2 Agenten-basierte Modelle

Agenten sind selbständige Einheiten in einem Modell, welche mit einer Form der Wahrnehmung ausgestattet sind, die in eine interne Repräsentation der Umwelt resultiert. Aus diesem individuellem Zustand und den persönlichen Eigenschaften des Agenten resultiert sein Verhalten. Im Gegensatz zu zellulären Automaten können Wahrnehmung und Interaktion über größere und weitere Distanzen erfolgen, da die Agenten nicht durch die Diskretisierung des Raumes beschränkt sind. In der Verkehrsforschung werden im Kontext der Simulation des Straßenverkehrs, so genannte Fahrerfolgemodelle eingesetzt

(Schadschneider, 2004). In diesen Modellen berechnet jeder Agent seine Geschwindigkeit und den notwendigen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeugen mittels mathematischer Gleichungen. Die Einflussgrößen können zwischen den Autos variieren wie bspw. die Beschleunigungsrate oder der gewünschte Sicherheitsabstand (Treiber et al., 2000; Treiber and Kesting, 2013).

Agents are best suited for applications that are modular, decentralized, changeable, ill-structured, and complex.

Agenten sind am besten für Anwendung geeignet, die modular, dezentral, veränderbar, problembehaftet und komplex sind.

—H. van Dyke Parunak (2000)

Die von Parunak (2000) beschriebene Flexibilität von Agenten erlaubt es, diese in verschiedenen Kontexten einzusetzen. Der Wechsel eines Verkehrsmittels wäre in einem mikroskopischen Modell auf Basis von zellulären Automaten aufgrund der Diskretisierung problembehaftet, da eine einheitliche Segmentgröße für unterschiedlich große Verkehrsteilnehmer schwierig zu ermitteln ist. Durch ihre Variabilität können Agenten-basierte Systeme hingegen den Modellanforderungen im Kontext von Multimodalität genügen.

2.4 Multimodalität, Intermodalität und Modal Split

Das Bundesministerium für Verkehr hat in seinem Mobilitätsbericht drei verschiedene Definitionen für *Multimodalität* festgelegt. Dabei wird zwischen Angebot, Einstellung und Verhalten unterschieden. Unter angebotsseitiger Multimodalität wird die Verfügbarkeit von verschiedenen Verkehrsmitteln für den Verkehrsteilnehmer verstanden. Einstellungsbezogene Multimodalität folgt aus der Beobachtung, dass Personen die Bereitschaft haben sich für die subjektiv optimale Verkehrsmittel zu entscheiden. Die verhaltensseitige Multimodalität liegt dann vor, wenn Personen diese Möglichkeiten schließlich auch nutzen (Bundesministerium für Verkehr, 2016).

Ein Mobilitätsangebot wird als multimodal bezeichnet, wenn den Verkehrsteilnehmerinnen und Verkehrsteilnehmern für ihre konkreten Mobilitätsbedürfnisse mindestens zwei zumutbare Verkehrsmittelalternativen in einem bestimmten (Beobachtungs-)Zeitraum zur Verfügung stehen.

— Definition *Multimodalität* – angebotsseitig, Bundesministerium für Verkehr (2016)

Wie bereits angedeutet ist der Begriff Multimodalität im Bereich der Verkehrswissenschaften bislang nicht einheitlich und oftmals synonym mit dem Begriff der Intermodalität verwendet. Die exakte Begriffsabgrenzung im personenbezogenen Kontext wird durch den Umstand erschwert, dass beide Begriffe ursprünglich aus dem Güterverkehr stammen, dort jedoch mit etwas anderer Bedeutung (Gronalt et al., 2010). Um die Unterschiede in dieser Arbeit klarer bezeichnen zu können, werden die Begriffe wie folgt voneinander abgegrenzt.

Intermodalität wird als Sonderform der Multimodalität betrachtet (von der Ruhren et al., 2005). Multimodalität wird im Personenverkehr als die grundsätzliche Möglichkeit angesehen, verschiedene Verkehrsmittel zu nutzen. Intermodalität ergänzt dies durch die Möglichkeit über Umsteigepunkte während einer Reise direkt zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln zu wechseln. Verkehrsteilnehmer, die unterschiedliche Verkehrsmittel innerhalb eines definierten Zeitraumes nutzen (für jeweils unterschiedliche Wege), werden demzufolge als multimodal bezeichnet und diejenigen, die während eines Weges mehrere Verkehrsmittel nutzen, werden als intermodal bezeichnet. Abbildung 2.2 verdeutlicht, dass Multimodalität die *Variation von Verkehrsmitteln* bezeichnet und sich Intermodalität dementsprechend auf die *Verkettung von Verkehrsmitteln* bezieht (Ahrens et al., 2010).

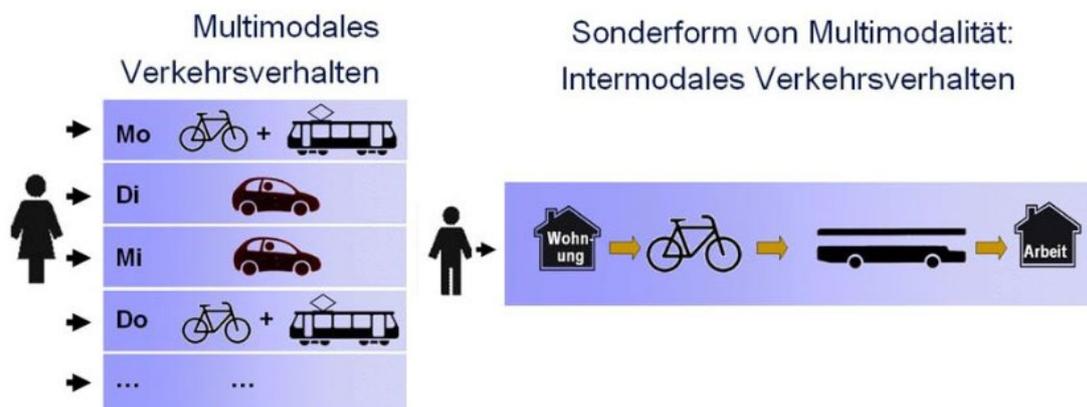


Abbildung 2.2: Verdeutlichung von inter- und multimodalem Verkehrsverhalten (Ahrens et al., 2010)

Weiterhin verwendet Groth (2019) den Begriff *Multioptionalität* um den Unterschied zwischen potenzieller zu realisierter Verkehrsmittelwahl zu beschreiben. Dabei werden neue strukturelle Möglichkeiten zur individuellen Realisierung von multimodalen Verhaltensweisen als Gegenwartsphänomen betrachtet. Diese werden vornehmlich nicht durch

weitere Verkehrsmittel erreicht, sondern vor allem durch eine Restrukturierung von Regeln und Ressourcen der Verkehrsmittelauswahl und -nutzung. Diese drücken sich bspw. in neuen Zugangsmedien wie der App-Nutzung aus.

Als *Modal Split* wird eine Kenngröße zur Aufteilung der Verkehrsnachfrage auf verschiedene Verkehrsmittel bezeichnet. Dabei wird die prozentuale Verteilung des Verkehrsaufkommens (z.B. Wege) oder der Verkehrsleistung (z.B. Personenkilometer) differenziert nach Verkehrsmitteln dargestellt. Der Modal Split drückt somit die Anteile der einzelnen Verkehrsarten an den gesamten zurückgelegten Kilometern oder den pro Tag unternommenen Wegen aus (Randelhoff, 2018).

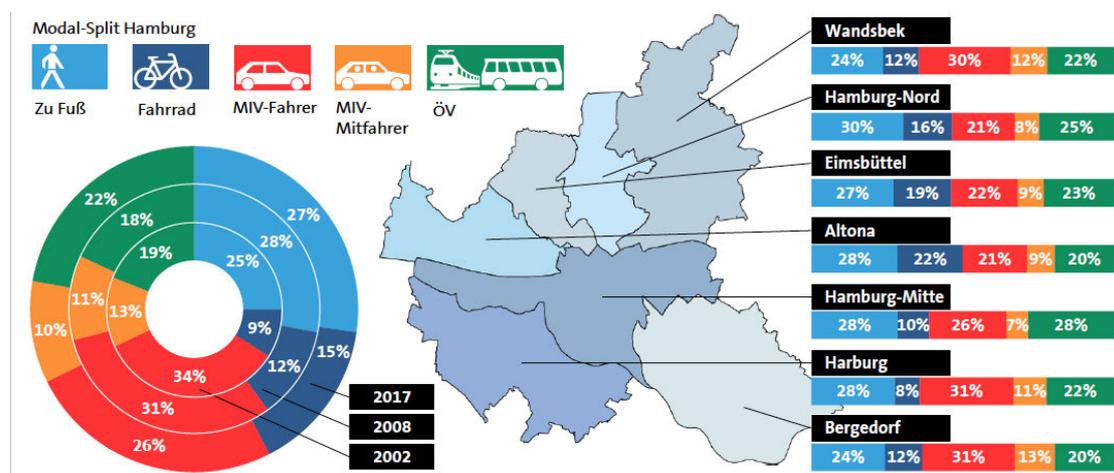


Abbildung 2.3: Modal Split 2017 nach Anzahl Wegen (Verkehrsaufkommen) in Hamburg (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2018)

In Hamburg werden täglich im Durchschnitt 6 Mio. Wege und damit 70 Mio. Personenkilometer zurückgelegt. Für die Metropolregion sind die Zahlen nahezu doppelt so hoch. Die Aufteilung der neusten Zahlen aus dem Jahr 2017 sind in Abbildung 2.3 dargestellt und zeigen, dass in Altona 28% der Wege zu Fuß unternommen werden. Der *Motorisierter Individualverkehr* (MIV) als Fahrer, der *Öffentlicher Nahverkehr* (ÖV) und das Fahrrad liegen bei ca. 20% fast gleichauf. Das Mitfahren im MIV hat mit 9% eine untergeordnete Relevanz (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2018). Entscheidend bei der Betrachtung der Werte ist die oben beschriebene Unterscheidung zwischen Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung. Es werden zwar 28% der Wege zu Fuß unternommen, aber die zurückgelegte Strecke ist bei anderen Verkehrsmitteln meist deutlich größer. Daraus lässt sich eine Hierarchisierung nach der größten entfernungsbezogenen Leistungsfähigkeit festlegen, wie im Folgenden durch Ahrens et al. (2016).

1. Fernzug
2. Nahverkehrszug
3. S-Bahn
4. U-Bahn
5. Straßenbahn
6. Bus
7. Taxi
8. Mitfahrer Carsharing-Pkw
9. Mitfahrer im anderen Pkw
10. Mitfahrer im Haushalts-Pkw
11. Fahrer im Carsharing-Pkw
12. Fahrer im anderen Pkw
13. Fahrer im Haushalts-Pkw
14. Motorisiertes Zweirad (Mofa, Motorroller, Moped, Motorrad)
15. Fahrrad (auch Elektro-, Miet- oder Leihfahrrad)
16. zu Fuß

Die Verkehrsmittel können, wenn sie kombiniert werden, zu Verkehrsmittelgruppen zusammengefasst werden. Falls mehrere Verkehrsmittel auf einem Weg zum Einsatz gelangen, wird für die Auswertung ein hauptsächlich genutztes Verkehrsmittel, das *Hauptverkehrsmittel*, bestimmt. Dies geschieht entlang der Verkehrsmittelhierarchie von oben beginnend. Somit lassen sich auch Verkehrsmittelgruppen nach ihrem Hauptverkehrsmittel auswerten (Ahrens et al., 2016). Die Hierarchie beginnt mit allen Verkehrsmitteln, bei denen Personen lediglich mitfahren. Dann folgen die aktiv zu führenden Fahrzeuge und schließlich das zu Fuß gehen. Zur realitätsgetreuen Modellierung von Fahrzeugen wurden so genannte Fahrzeugfolgemodelle entwickelt.

2.5 Fahrzeugfolgemodelle

Für die Simulation des Autoverkehrs gibt es eine Vielzahl verschiedener Ansätze für Fahrzeugfolgemodelle. Diese Modelle basieren auf Gleichungen, welche Beschleunigung bzw. Abbremsungsrate in Abhängigkeit zu Verkehrsmittel, der Situation und den persönlichen Präferenzen errechnen (Dallmeyer, 2014). Die unterschiedliche Fahrzeugtypen dieser Arbeit können durch für sie günstige Fahrzeugfolgemodelle umgesetzt werden. Das Wiedemann Modell und das Intelligent Driver Modell wurden in den Fahrzeugmodellen für Fahrrad und Auto umgesetzt, welche die Grundlage für diese Arbeit bilden.

2.5.1 Intelligent Driver Modell

Die in dieser Arbeit verwendeten Autos wurden mit dem Ansatz des *Intelligent Driver Modell* (IDM) umgesetzt (Weyl, 2019). Das IDM gilt als einfaches und dennoch vollständiges Model, welches realistische Beschleunigungsprofile erzeugt, kollisionsfrei bleibt und sinnvolles Verhalten in allen Verkehrssituationen von einspurigen Szenarien zeigt (Treiber and Kesting, 2013). Zur Kollisionsvermeidung wird beim IDM die relative Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs bestimmt, welche einen steigenden Einfluss bei geringer werdendem Abstand hat. Die geringe Parameteranzahl macht das IDM einfach zu benutzen und performant. Es bedarf neben der eigenen Fahrzeuggeschwindigkeit (v_n), den Abstand zwischen den Autos (s_n) noch den oben benannten Geschwindigkeitsunterschied (Δv) zum vorausfahrenden Fahrzeug. Hinzu kommen noch fahrzeugspezifische Konstanten, wie Maximalbeschleunigung α und Fahrzeuglänge, sowie Fahrparameter wie gewünschte Mindestabstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen in Staus s' sowie s'' oder die momentane Wunschgeschwindigkeit v_0 (Schadschneider, 2004). Die zugehörige Formel zur Berechnung der Beschleunigung ist in 2.1 dargestellt.

$$\dot{v}_n = \alpha \left[1 - \left(\frac{v_n}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*}{s_n} \right)^2 \right] \quad (2.1)$$

mit der minimalen Wunschlücke

$$s^*(v_n, \Delta v_n) = s'_n + s''_n \sqrt{\frac{v_n}{v_0}} + T v_n + \frac{v_n \Delta v_n}{2\sqrt{\alpha b}} \quad (2.2)$$

und Lücke zum Vorausfahrendem $s_n = \Delta x_n - l_{n-1}$, dem Beschleunigungsexponenten δ , der komfortablen Verzögerung b und dem zeitlichem Sicherheitsabstand T (Dallmeyer, 2014).

2.5.2 Wiedemann Modelle

Das in dieser Arbeit referenziert Fahrradmodell setzt das zweite Fahrzeugfolgmodell von Rainer Wiedemann um (Mulack, 2020). Wiedemann entwickelte 1974 ein psychisch-physikalisches Verhaltensmodell, welches das *Gazis-Herman-Rothery-Modell* (GHR Modell) um eine Wahrnehmungsschwelle erweitert. Im GHR-Modell reagiert ein simuliertes Auto n auf jede Geschwindigkeitsänderung des Autos $n - 1$. Durch die Wahrnehmungsschwellen reagieren Fahrer lediglich auf spürbare Änderungen der Geschwindigkeit des

Vorausfahrenden. Das Modell besitzt dafür verschiedene Schranken in dessen Bereichen das Verhalten für die jeweilige Verkehrssituation angepasst ist: Folgen, freies Fahren, Annähern und Notfallregelungen (Dallmeyer, 2014; Wiedemann, 1974; Olstam and Tapani, 2004).

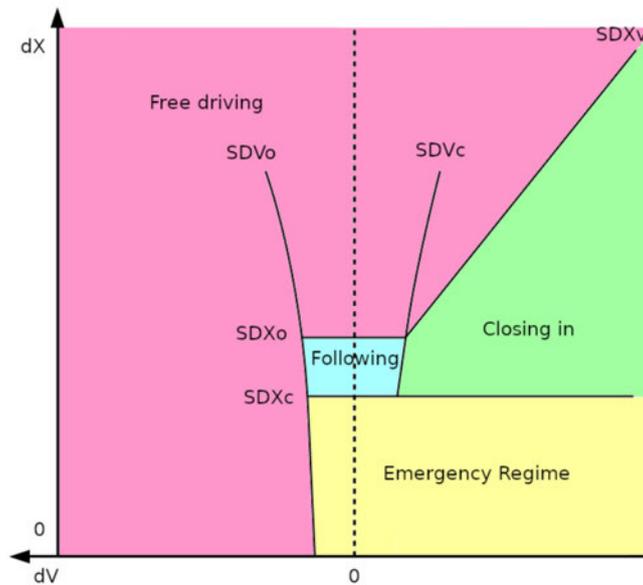


Abbildung 2.4: Übersicht über die Schranken des Wiedemann 99 Modells und deren Auswirkung in Abhängigkeit zu den Achsen, dX , dem Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug und dV , der momentanen Geschwindigkeitsveränderung (Mulack, 2020) (auf Basis von (Wiedemann, 1996)). Detaillierte Beschreibungen der Schranken SDX und SDV (bei Mulack (2020))

Wiedemann modifizierte um 1999 sein Modell. Dafür wurden diverse Schranken überarbeitet um eine Vereinfachung zu erzielen (siehe Abbildung 2.4). Auch dieses Modell weist eine Vielzahl an Parametern auf, wodurch das Verhalten justiert werden kann. Daraus ergeben sich wiederum die folgenden vier Bereiche: Freies Fahren (Geschwindigkeit erhöhen oder beibehalten), Folgen (beschleunigen oder verzögern, um die Distanz zu halten), Auffahren (bremsen mit einer Verringerung des Abstandes) und die Notfallaktion (bremsen zur Vergrößerung des Abstandes) (Wiedemann, 1996; Dallmeyer, 2014).

3 Anforderungsanalyse

Mikroskopische Verkehrsmodelle können verschiedene Verkehrsteilnehmertypen berücksichtigen. Makroskopische Modelle beschränken sich üblicherweise auf monomodale Modelle wie z.B. dem reinen Automobilverkehr. Ein makroskopisches Modell eignet sich z.B. zur Modellierung von Autobahnverkehr über große Strecken mit geringem Berechnungsaufwand. Es lässt sich jedoch nicht zur Simulation von innerstädtischem Verkehr mit komplexen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Verkehrsteilnehmern und häufigen Störungen durch Ampelschaltungen verwenden. Auch der Wechsel von Transportmitteln oder die Kombination der Verkehrsmittel erfordern den Detailgrad mikroskopischer Modelle (Dallmeyer, 2014). Diese Feststellung ordnet die vorliegende Arbeit bereits grob ein. Im Weiteren wird analysiert welche Anforderungen es für Umwelt, Agent und Modell gibt.

3.1 Anforderungen an die Umwelt

Die Agenten benötigen eine Umwelt über welche sie wahrnehmen und agieren können. Zur Wahrnehmung gehören das Erfassen von Situationen, wie die Position im Raum, verwendbare Interaktionsobjekte und andere Agenten im Wahrnehmungsbereich. Zum Agieren und Reagieren bedarf es Auswahlmöglichkeiten von Aktionen und Interaktionsschnittstellen mit Objekten und Agenten. Die primäre Umweltkomponente in der Verkehrssimulation bildet das Straßennetz.

3.1.1 Straßennetz

Interaktionen zwischen Vehikel-Agenten basieren auf Stigmergie¹ (Tchappi Haman et al., 2017), d.h. die Kommunikation zwischen Fahrzeugen geschieht über die Position und

¹Stigmergie ist ein Konzept zur Beschreibung einer besonderen Form der Koordination von Kommunikation in einem dezentral organisierten System, das eine große Anzahl von Individuen umfasst.

Geschwindigkeit der Verkehrsteilnehmer, welche über das Straßennetz kontrolliert und propagiert werden können.

Das Simulationswerkzeug MARS soll für die Untersuchung von Szenarien in Städten oder Stadtteilen eingesetzt werden. Es bedarf also der Möglichkeit die echtweltliche Struktur des Straßennetzes in eine für die Simulation geeignete Datenstruktur zu überführen. Dafür wurde das *SpatialGraphEnvironment* (SGE) entwickelt, welches einen Graphen abbildet und die Wahrnehmung sowie Fortbewegung von Entitäten auf dem Graphen ermöglicht und überwacht (Weyl et al., 2018). Über einen Importservice können ausgewählte Areale von *OpenStreetMap*² (OSM) in das SGE überführt werden (Weyl, 2019). Die verfügbare Datenqualität von einer durch eine *Community* gepflegte Datenquelle kann variieren, ist aber für Ansprüche an Genauigkeit sowie für die gewählten Stadtgebiete in dieser Arbeit ausreichend (Briem et al., 2019).

Das SGE ermöglicht die Verhinderung von Kollisionen, aber keine modellrelevante Korrektur von ungültigen Bewegungsversuchen. Zur Erreichung realistischer Bewegungsmuster müssen Fahrzeugfolgemodelle (siehe Kapitel 2.5) eingesetzt werden. Die verfügbaren Daten des Straßennetzes geben zwar auch Hinweise über den Straßentyp (bspw. reguläre Straße oder Autobahn), jedoch fehlt derzeit die Darstellung von Fußwegen. Diese müssen aber als essentieller Teil multimodaler Verkehrsketten dargestellt werden und dürfen nicht zum Ausbremsen des MIV führen (beispielhaftes Szenario: Fußgänger und Auto teilen sich eine Spur und das Auto wird durch den langsameren Fußgänger ausgebremst). Die Modellierung von Fußgängerwegen muss also ebenso gewährleistet sein, wie die Darstellung verschiedener Spuren für den Straßenverkehr.

3.1.2 Straßenverkehrsregeln

Zum regulären Straßenverkehr gehören Steuerungselemente, die vor allem an Kreuzungen die Vorfahrt regeln. Dazu gibt es grundsätzlich Verkehrszeichen und in besonderen Fällen auch Ampelsteuerungen. Zunächst zu der Beschreibung von Kreuzungen: das SGE besteht graphentypisch aus Knoten (Kreuzungen) und Kanten (Straßen). Die Knoten haben dabei keine räumliche Ausdehnung sondern werden in ihrem Mittelpunkt durch einen geographischen Punkt beschrieben. Die ausgehenden Kanten eines Knoten stehen in einem Winkel zur eingehenden Kante. Es kann somit ermittelt werden, wie stark ein

²<https://www.openstreetmap.org/>

etwaiges Abbiegeverhalten zu erfolgen hat und somit auch die dafür notwendige Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Es gibt bestimmte Formen von Kreuzungen, die so kompliziert sind, dass sie nicht mittels eines Knoten dargestellt werden sondern deren Teile (bspw. Abbiegespuren bis zur Kreuzungsmitte) wiederum Kanten enthalten. In solchen höher-komplexen Strukturen kommen zumeist Ampeln zum Einsatz. Ampeln stehen am jeweiligen Eingang einer Kreuzung und koordinieren alle ein- und ausgehenden Straßen der Gesamtkreuzung. Für ihren Betrieb gibt es zwei verschiedene Modi: zum einen eine feste Taktung, bei der zeitgesteuert zwischen den verschiedenen Ampelphasen gewechselt wird. Zum anderen einen zweiten Modus, welcher zwar auch innerhalb von Zeitfenstern wechselt, die Dauer dieser Phasen jedoch dem aktuellen Verkehrsfluss anpasst. Die selben Ampeln können abhängig von Wochentag und Uhrzeit ihren Modus verändern, um dem unterschiedlichen Verkehrsaufkommen gerecht zu werden. An allen nicht durch Ampeln gesteuerten Kreuzungen regeln entweder Verkehrsschilder den Verkehr oder die allgemeinen Straßenverkehrsregeln³ (StVO). Verkehrsschilder werden insofern verfügbar über die OSM-Schnittstelle importiert. Für die Planung der Route werden weitere Umweltinformationen benötigt, die über das Straßennetz hinausgehen.

3.1.3 Geospatale Raumstrukturen für die Routenplanung

Die tagesstrukturelle Planung der Agenten benötigt zur Identifizierung relevanter Zielpunkte weitere Datenquellen, die in einer Umweltkomponente zur Verfügung gestellt werden müssen. Dazu werden Daten aus den Quellen *Die Geofabrik*⁴ und des Transparenzportals Hamburg⁵ genutzt, welche Auskunft über Gebäude, Landnutzung (bspw. Industriegebiete oder Wohngegenden) und so genannten *Points of Interests* (POI, wie z.B. öffentliche Einrichtungen wie Poststationen oder Bibliotheken) geben.

Geospatial werden diese Daten genannt, weil sie immer einen geographischen Raumbezug aufweisen, somit entweder einen Punkt oder eine Fläche beschreiben und mit weiteren Metainformationen anreichern. Diese lassen sich aktuell in MARS als Rasterdaten oder als Vektordaten importieren. Rasterdaten beschreiben einen rechteckigen Raum, der wiederum in gleichgroße Segmente unterteilt ist. Die Information eines jeden Segments wird durch ein Skalar beschrieben. Somit gilt für alle Koordinaten innerhalb des Segments, dieser Wert. Vektordaten hingegen beschreiben Koordination für geometrische Formen

³<https://www.stvo.de/strassenverkehrsordnung>

⁴www.geofabrik.de

⁵<http://transparenz.hamburg.de/>

(wie Punkte, Linien, Polygone oder Multi-Polygone). Auch diese werden wiederum durch weitere Informationen angereichert, welche Auskunft über das so genannte *Feature*⁶ geben (Teege, 2001; Weichert, 2007; Winter, 1998).

Die für die Auswahl von Zielpunkten des Tagesverlauf genutzten Geoquellen wurden bereits eingeführt. Für die Ermittlung der jeweiligen Routen zu diesen Zielen bedarf es aber noch weiterer Geodaten. Die Nutzung von Automobilen soll nur mittels *Park and Ride* möglich sein. Es müssen also Parkräume⁷ ermittelt werden auf denen Autos abgestellt werden können. Ähnlich verhält es sich bei Fahrrädern, die über das Leihsystem der *Deutschen Bahn*⁸ entliehen werden können. Dafür müssen die Leihstationen für Fahrräder lokalisiert und in das Modell integriert werden. Das umfassende Angebot an Informationen und Interaktionsmöglichkeiten der Umweltkomponente ermöglicht nun eine Beschreibung des Agenten.

3.2 Anforderungen an die Agenten

Zur Definition von Agenten bedarf es die Identifikation von Regeln und Strukturen nach denen sich die Agenten richten (Sokolowski and Banks, 2009). Dafür ist es zunächst notwendig das Verkehrsverhalten der am Verkehr teilnehmenden Personen zu analysieren. Die Verkehrsteilnehmer können nach Kagerbauer (2010) in verschiedenen Verhaltensebenen reagieren, um ihre Entscheidungen zu beeinflussen oder ihr Verhalten an die Gegebenheiten anzupassen:

- Aktivitätenebene: Modifikation der Aktivitäten und Aktivitätenabfolge oder Umverteilung der Aktivitäten z.B. innerhalb der Familie
- Zeitebene: Zeitliche Verschiebung der Aktivitäten
- Modalwahlebene: Verwendung von verschiedenen Verkehrsmitteln
- Routenwahlebene: Nutzung von alternativen Strecken
- Alle Ebenen: Verzicht oder Generierung neuer Aktivitäten

⁶Aggregate sind Informationen, die anhand beschriebener Objekte zusammengefasst sind. Aggregate werden in der Geoinformatik als Features bezeichnet (Teege, 2001)

⁷über das Geoportal Hamburg <https://geoportal-hamburg.de/geo-online/>

⁸<https://stadtrrad.hamburg.de/>

Die Agenten müssen demzufolge zunächst eine grobe Tagesplanung für sich ermitteln (Aktivitätenebene). In der Abarbeitung der Aktivitäten folgt die Modal- und Routenwahl. Können die Ziele nicht erreicht werden, so muss die Erreichung von Aktivitätsorten angepasst werden oder diese entfallen. Für die Routenwahl stehen verschiedene Modalitäten zur Verfügung, zunächst das Zufußgehen.

3.2.1 Fußgänger

Das Zufußgehen als eigenständige Bewegungsform hat seine Relevanz nicht nur als Größe des Modal Split (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2018), sondern auch als Teil einer aggregierten Verkehrsmittelgruppe (bspw. Fußweg-Autofahrt-Fußweg) (Ahrens et al., 2016). Die Geschwindigkeit des Gehens hängt von verschiedenen Einflussgrößen ab. Dazu zählen persönliche Faktoren wie Alter, Geschlecht, physische Konstitution sowie Zweck der Bewegung (Weidmann, 1993). Darüber hinaus spielen auch äußere Faktoren wie die Dichte des Fußgängerverkehrs und dem Mix aus verschiedenen Bewegungsgeschwindigkeiten eine Rolle (Cheng et al., 2014). Einige Einschränkungen werden an dieser Stelle vorgenommen, welche den verfügbaren Daten oder zugrundeliegenden Modellen geschuldet sind. Durch die Begrenztheit des Graphen werden weder Treppen noch andere Formen von Steigungen, die sonst einen Einfluss auf die Geschwindigkeit haben können, modelliert. Weiterhin wird die Altersspanne von Fußgängern auf 18 bis einschließlich 64 Jahre begrenzt. Weitere Einflussfaktoren wie Körpergröße, welche bspw. über die Beinlängenproportionen Einfluss auf Geschwindigkeit haben könnte, werden mangels Daten außer Acht gelassen. Die bevorzugte Geschwindigkeit eines jeden Fußgängers wird unter Abgrenzung der zuvor genannten Faktoren mit Hilfe einer Normalverteilung nach Weidmann (1993) errechnet (Löffler, 2019). Das Führen eines Fahrzeugs bleibt von den hier benannten Einflussfaktoren größtenteils unberührt und bedarf einer eigenständigen Analyse.

3.2.2 Fahrzeugführer

Ein Fahrzeugführer ist grundsätzlich jemand, der ein Fahrzeug, also ein Kraftfahrzeug oder ein Fahrrad, unmittelbar lenkt oder steuert. Die Aufgaben des Menschen beim Fahren können hierarchisch in drei Stufen (siehe Abbildung 3.1) unterteilt werden: Regelung, Führung und Navigation (Lunenfeld and Alexander, 1990).

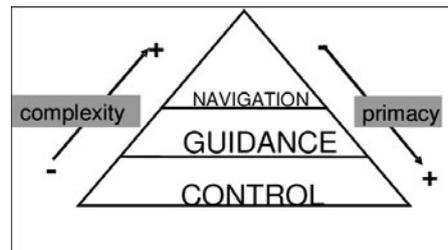


Abbildung 3.1: Die drei hierarchischen Stufen des Fahrprozesses (Thomson et al., 2006)

Die Regelung (*Control*) umfasst elementare Aktionen des Fahrens, wie Lenken, Bremsen oder Beschleunigen. Diese Aktionen laufen, nachdem sie in einer Lernphase, der Fahrschule, eintrainiert wurden, meist unterbewusst und deswegen in Sekundenbruchteilen ab. Auf der Führungsebene (*Guidance*) werden taktische Entscheidungen, wie die Geschwindigkeitswahl, das Abstandhalten beim Folgen, aber auch die Initiation eines Überholvorganges oder ein Fahrstreifenwechsel bewusst getroffen. Die Navigationsebene beinhaltet höhere strategische Entscheidungen, wie die Routenplanung, vorrausschauende Fahrstreifenwahl, aber auch die Verkehrsmittelwahl (Reimann, 2007; Lunenfeld and Alexander, 1990). Auf eine getrennte Implementierung von *Control* und *Guidance* kann in dieser Arbeit verzichtet werden, da die bestehenden Modelle dies bereits in einer Steuerungskomponente zusammenfassen. Teilbereiche sind jedoch über funktionale Teilkomponenten umgesetzt. So wird die Beschleunigung inklusive Abstandhalten und dem Notfallbremsens durch Fahrzeugfolgemodelle (vgl. Kapitel 2.5) ermöglicht. Fahrspurwechsel und die grundsätzliche Geschwindigkeitwahl sind wie im hierarchischen Modell übergeordnet zu entscheiden. Durch die Vielzahl von Fahrern gibt es eine Bandbreite an unterschiedlichen Eigenschaften, welche Einfluss auf das Fahrverhalten haben können. So variieren auch die Fähigkeiten der Fahrer aufgrund von Erfahrung oder Einschränkungen in ihrem Wahrnehmungsbereich (Lunenfeld and Alexander, 1990). Die hier festgestellte Varianz soll Einfluss auf das Fahrverhalten der Agenten finden und muss somit konzeptionell vorgesehen werden. Die dritte Hierarchiestufe, die Navigation, wird im Abschnitt 3.2.4 Routensuche für Verkehrsmittel näher beschrieben, zunächst müssen grundsätzliche Zielpunkte für die Agenten gefunden werden.

3.2.3 Aktivitätenpläne für Verkehrsnachfragemodelle

Um den Verkehr realistisch anzunähern muss das Verkehrsaufkommen abhängig von Tageszeit und bestimmten Bereichen, die eine höhere Belastung zu erwarten haben, variiert

ren. Die Verkehrsteilnehmer sollen deshalb als Bürger mit einem Tagesablauf modelliert werden. So hat jeder Bürger zunächst einen festen Wohnort. Dazu wird auf die oben genannten geospatialen Datenquellen zurückgegriffen (siehe Abschnitt 3.1.3 und Manson et al. (2012)). Die Struktur der Tagespläne basieren auf den Studien *Mobilität in Deutschland* (MiD) des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017) und dem *Statistischen Jahrbuch Hamburg und Schleswig-Holstein* des Statistikamt Nord (2018). Von dem Wohnort ausgehend werden die Tagespläne generiert. Der Betrachtungsraum jedes Tagesplan liegt bei einem Tag. Durch diese zeitliche Beschränkung werden jedoch einige Verhaltensaspekte vernachlässigt: Personen handeln von Tag zu Tag nicht komplett unabhängig voneinander (Hilgert, 2019). Dennoch bieten die Tagespläne eine ausreichend gute Grundstruktur um eine temporalabhängige und sinnvolle Verkehrslast und -verteilung zu gewährleisten. Die dafür ursächlichen Tagespläne unterscheiden zunächst nach beruflichem Status. Ein Vollzeitbeschäftigter wird pro Tag 8 Stunden arbeiten, ein Teilzeitbeschäftigter hingegen lediglich 5 Stunden. Neben der Erwerbstätigkeit hat ein Agent folgende Kategorien für Tätigkeiten: Essen, Zeit-zu-Hause, Freizeit und Besorgungen. Für die jeweiligen Tätigkeiten wurden zeitliche Verhältnisse nach den in der Studie MiD genannten Daten festgelegt (Löffler, 2019). Somit entstehen zunächst Pläne, die lediglich Zielorte und Zeitpunkte enthalten. Diese müssen dann wie in Abbildung 3.2 dargestellt noch um Routen und Transportmittel ergänzt werden.

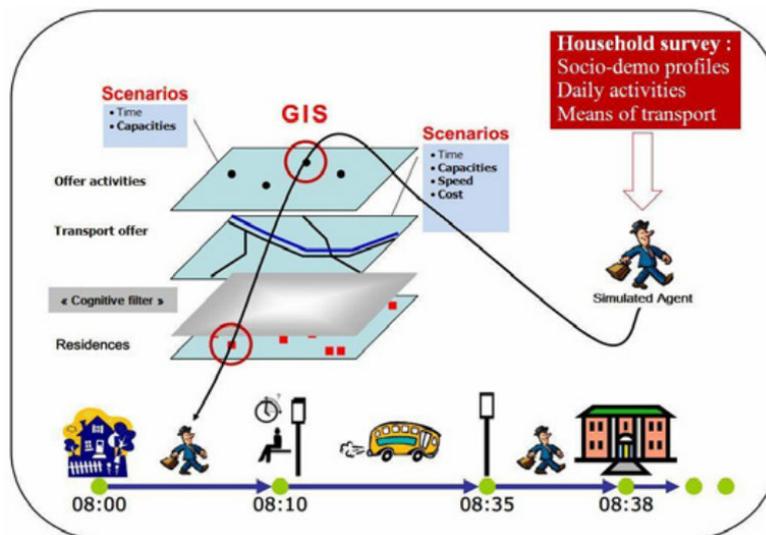


Abbildung 3.2: Beispielhafter Beginn eines Tagesplanes, welcher bereits mit Verkehrsmittelgruppen zur Zielerreichung angereichert ist (Nguyen et al., 2012)

3.2.4 Routensuche für Verkehrsmittel

Ein Weg (später als Route bezeichnet) im Sinne des *Systems repräsentativer Verkehrsbefragungen* (SrV) (Ahrens et al., 2016) ist eine Ortsveränderung, deren Quelle und/oder Ziel außerhalb des Grundstückes liegt, auf dem die Person ihren Wohnsitz hat. Weiterhin ist zu beachten, dass ein Weg durch genau einen Zweck definiert ist (z.B. zur Arbeit, zum Einkauf, nach Hause). Dargestellt werden also Wege, dessen Zweck die Zielerreichung ist und nicht die Bewegung als Selbstzweck (z.B. als Freizeitbeschäftigung). Ein Weg kann aus mehreren Etappen bestehen, d.h. auf einem Weg können mehrere Verkehrsmittel benutzt werden (mögliche Verkehrsmittelreihenfolge z.B. zu Fuß → Fahrrad → zu Fuß). Unter Verkehrsmitteln werden technische Hilfsmittel für die Durchführung von Ortsveränderungen verstanden. Für Auswertungen von Haushaltsbefragungen bzw. im planungspraktischen Sprachgebrauch wird das Zufußgehen auch als Verkehrsmittel bezeichnet. Falls mehrere Verkehrsmittel auf einem Weg zum Einsatz gelangen, lässt sich aus Auswertungsgründen mittels einer festgelegten Verkehrsmittelhierarchie (siehe 2.4) das Hauptverkehrsmittel eines Weges bestimmen (Ahrens et al., 2016). Somit können nun wie in Abbildung 3.3 angedeutet, die verschiedenen Routen zu den jeweiligen Zielorten mit Verkehrsmitteln beschrieben werden.

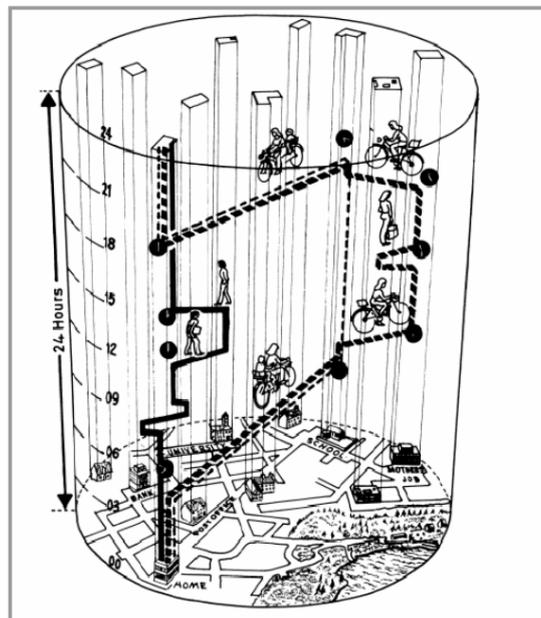


Abbildung 3.3: Vollständiger Tagesplan mit Verkehrsmittel-bezogenen Routen zu den Zielorten (Banos et al., 2005)

Die Verkettung verschiedener Verkehrsmittel innerhalb der selben Route führt zur Notwendigkeit, multimodale Routen beschreiben zu können (Kirchler, 2013). Diese sind eine Abfolge von Modalrouten, die jeweils mit dem Verkehrsmittel verknüpft sind. Es bedarf dazu einer Beschreibung, wie ein Wechsel an den Enden der jeweiligen Modalrouten in das nächste Transportmittel zu erfolgen hat. Diese könne wie in Abbildung 3.4 symbolisiert nur an möglichen Wechsellpunkten erfolgen. Die Wechsel erfolgen i.d.R. am Ort des zu betreten Verkehrsmittels. Über die modalen Layer muss also eine Abfragemöglichkeit bestehen, um diese Lokalisierung (womöglich auch in temporaler Abhängigkeit) zu erfragen. Die oben erwähnten geospatialen Strukturen (siehe Abschnitt 3.1.3) können bspw. einen Parkraumlayer für Automobile oder Leihstationen für Fahrräder zur Verfügung stellen. Eine Suchfunktion wird benötigt, die in Abhängigkeit zu den Wünschen, Fähigkeiten und Möglichkeiten des Verkehrsteilnehmers multimodale Routen zur Verfügung stellt, die verarbeitet und genutzt werden können.

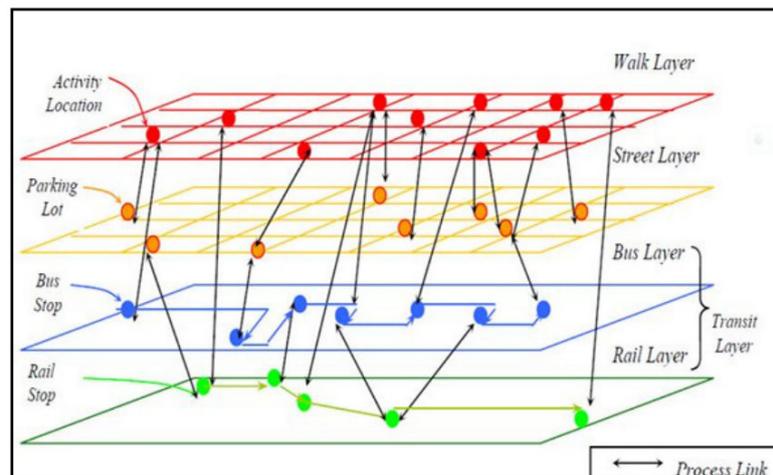


Abbildung 3.4: Wechsel zwischen verschiedenen verkehrsmodalen Layern an definierten Übergangspunkten (Nguyen et al., 2012)

Einschränkende Betrachtung Multimodale Routen basieren auf den bereits vorhandenen modalen Routen des SGE. Das Abschließen einer modalen Route kann für multimodale Modelle in unterschiedlicher Weise realisiert werden. So hat das Automodell aufgrund der, dem Modell bedingten Unschärfeannahmen, eine Zielerreichung, so bald die Distanz zum Ziel einen Schwellwert unterschreitet. Diese Annahme ist modellspezifisch und wird nicht in den Routen gespeichert. Die multimodale Verarbeitung bezieht sich jedoch auf den Zustand der Modalrouten. Bewegt sich ein Verkehrsteilnehmer, in

diesem Fall z.B. ein Auto, nicht mehr weiter, da es in seiner internen Verarbeitung ein Ziel erreicht hat, dies aber nicht über die Route propagiert werden kann, stockt die nachfolgende Weiterverarbeitung, da auf interne Zustände des Modelle nicht zugegriffen werden kann. Es bedarf einer Lösung, um die internen Zustände an das multimodale Gesamtsystem weiter zu reichen.

3.3 Anforderungen an das Modell

Die beiden Hauptsächlichen Anforderungen an das Modell wurden bereits ausführlich beschrieben: Umwelt und Agent. Den Blick auf die Gesamtsimulation und das Zusammenspiel richtend, können noch weitere Anforderungen formuliert oder vertiefend betrachtet werden.

3.3.1 Detailgrad

Die grundsätzlichsste Frage einer mikroskopischen Simulation ist die des Detailgrades also der Zeitschrittauflösung. Abbildung 3.5 zeigt die zu untersuchenden Aspekte nach Auflösungsgrad. In diesem Modell sollen Aspekte untersucht werden, die verschiedenen Zeitskalen zugeordnet werden können. Sowohl das Auftreten von Stoßverkehr (Rush/Peak hour), Verkehrsmuster von gröberen Strukturen bis hin zur Interaktion zwischen Verkehrsteilnehmer kann Teil der Untersuchung sein. Zudem sind die zu integrierenden Modell mit einer Sekundenauflösung

$$\Delta t = 1s \tag{3.1}$$

umgesetzt.

Somit verbleibt der Detailgrad bei einer Sekunde pro Zeitschritt (Tickgröße Δt).

Die Integration bestehender Verkehrsmodelle (Weyl, 2019; Löffler, 2019; Mulack, 2020) hat nicht nur Einfluss auf den Detailgrad sondern erfordert unter anderem auch weitere funktionale Anforderungen an das Modell.

3.3.2 Funktionale Anforderungen

Die im Folgenden aufgeführten funktionalen Anforderungen sind teilweise schon erwähnt worden, sollen aber zur Verdeutlichung der Funktionsweise des Gesamtsystems an dieser

Time Scale	Subject	Models	Aspects
0.1 s	Vehicle Dynamics	Sub-microscopic	Drive-train, brake, ESP
1 s			Reaction time, Time gap
10 s	Traffic Dynamics	Car-following models	Accelerating and braking
1 min		Fluid-dynamic models	Traffic light period
10 min			Period of stop-and-go wave
1 h			Peak hour
1 day	Transport. Planning	Traffic assignment models	Day-to-day human behavior
1 year		Traffic demand model	Building measures
5 years		Statistics	Changes in spatial structure
50 years		Prognosis	Changes in Demography

Abbildung 3.5: Themenschwerpunkte in Verkehrssystem sortiert nach dafür typischen Zeitskalen (Kesting et al., 2009)

Stelle nochmal zusammenfassend beschrieben werden. Auf Anregungen durch verwandte Arbeiten, welche ihre Verkehrssimulationssysteme um Multimodalität erweiterten, wird verwiesen. Die Anforderungen sind zur Referenzierung nummeriert, wodurch aber keine Gewichtung zum Ausdruck kommen soll.

1. Die Ausgangsmodelle: Fußgänger, Fahrradmodell und Automobilverkehr bleiben in ihrer unabhängigen Ausführbarkeit bestehen
2. Der gesamte Tagesplan kann mit den zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteln erfolgreich durchlaufen werden (vgl. Behrisch et al. (2010))
3. Ein multimodaler Layer ermöglicht den Zugriff zu den Layern aller Fortbewegungsmitteln.
4. Die multimodale Routensuche ergibt für jeden möglichen Weg eine valide Route (welche aber u.U. nur eine Modalität enthält).
5. Die multimodale Routensuche hängt von den vorhandenen Fähigkeiten des Agenten ab.
6. Es gibt einen Agententypen, welcher dynamisch mit unterschiedlichen Fähigkeiten initialisiert werden kann.
7. Fußgänger und Straßenverkehr behindern sich nicht gegenseitig.
8. Fußwege sind gleichberechtigte Modaltypen und werden in der Auswertung (bspw. bezüglich des Zeitverbrauchs) vergleichbar behandelt (vgl. Behrisch et al. (2010))
9. Autofahrer aktualisieren ihre Route zu einem neuen, freien Parkplatz, wenn die ursprüngliche ausgewählte Parkfläche bei Zielerreichung belegt ist.

10. Der Parkraum kann nach einem statistischen Durchschnittswert grundausgelastet werden. Die simulierten Autos werden in diesen Wert integriert, so dass weiterhin ausreichend Parkmöglichkeiten vorhanden sind (eine Auslastung über 100% findet nicht statt).

3.3.3 Integration weiterer Modaltypen

Die funktionalen Anforderungen sind eine Betrachtung an das aktuelle Gesamtsystem. Diese basieren auch auf der Integration bestehender Modelle. Eine generischen, multimodales Verkehrssystem muss aber auch die Möglichkeit haben, weiterhin um zusätzliche Modaltypen erweitert zu werden. So ist die Integration des öffentlichen Nahverkehrs sowie die Möglichkeit des Mitfahrens im MIV nicht Teil dieser Arbeit. Die entwickelte Architekturstruktur muss eine möglichst einfach Integration aber erlauben. Dazu bedarf es abstrakter Beschreibung von Modaltypen durch ihre Anforderungen an die Fähigkeiten des Benutzers (Capabilities), die Möglichkeit einer Interaktionsbeschreibung (Nutzungskontrakt) sowie eine Benutzungsschnittstellen (Handle-Prinzip). Der Zugriff auf (womöglich temporale) Verfügbarkeit (Fahrpläne, Treffpunkte) und die Orte des Zu- und Ausstiegs über geospatiale Datenstrukturen schließen die Anforderungsliste ab.

3.3.4 Einschränkende Annahmen

Der Zu- und Ausstieg in und aus dem SGE ist derzeit nur über Knoten möglich, da noch keine effiziente Möglichkeit entwickelt wurde, Positionen auf Kanten zu errechnen, an denen ein Hinzufügen auf die Kante sinnvoll wäre. Somit sind die Umsteigepunkte der modalen Transportmittel auch nur an Knoten möglich. Ein Einstieg in ein Auto ist somit am dem Parkraum nächstgelegenen Knoten möglich. Die Entfernung des Parkraums zum Knoten wird als Ungenauigkeit der Modellierung betrachtet.

Eine Verknüpfung zwischen Fußgängergraphen und Straßengraph ist derzeit ebenfalls nur über die Knoten möglich. Es gibt somit z.B. keine Möglichkeit für einen Fahrradfahrer den Fußweg zu verlassen um auf der Straße weiter zu fahren, so lange der Radfahrer sich noch auf der Kante befindet. Das Wechseln des Graphen zu Überholzwecken ist in der Arbeit von Mulack (2020) zwar angedacht, aber nicht umgesetzt worden und somit ebenfalls kein Bestandteil dieser Arbeit.

Automobile fahren auf dem mehrspurigen Straßengraphen und können auch die Spur wechseln insofern es für sie sinnvoll ist, bspw. für eine Abbiegemanöver nach links. Sie können aber nicht einen Überholvorgang durchführen, da diese Funktionalität nicht in der Arbeit von Weyl (2019) umgesetzt wurde. Gleiches gilt für Fahrräder und somit für beide Modelle in dieser Arbeit.

4 Experimente

Zur Untersuchung der Hypothesen wurden Experimente vorbereitet, welche in diesem Kapitel vorgestellt werden. Die Experimente werden beschrieben und anschließend das zu erwartende Resultat skizziert. Die tatsächlichen Ergebnisse werden in Kapitel 6 beschrieben und im Kapitel 7, der Diskussion, bewertet. Bevor die Experimente beschrieben werden, wird die Testumgebung, in welcher die Szenarien stattfinden, vorgestellt.

4.1 Testumgebung: Hamburg Altona

Multiagentensysteme haben dort Vorteile wo abweichendes Verhalten von ähnlichen Entitäten abhängig von ihrer Situation erfolgt. Die dynamische Analyse von Verkehrsströmen bedarf zudem ein relative Ballung an neuralgischen Punkten, damit eine Verzögerung gegenüber der freien Fahrt dargestellt werden kann. Beides zusammengenommen führt zu dem Bedarf an einer ausreichend großen Anzahl von Agenten in den selben geographischen Abschnitten für die gleichen Zeitfenster. Dem entgegen steht die erforderliche Rechenleistung für einen Simulationslauf in einer Sekundenauflösung ($\Delta t = 1s$) mit großen Agentenmengen (Weyl et al., 2018).

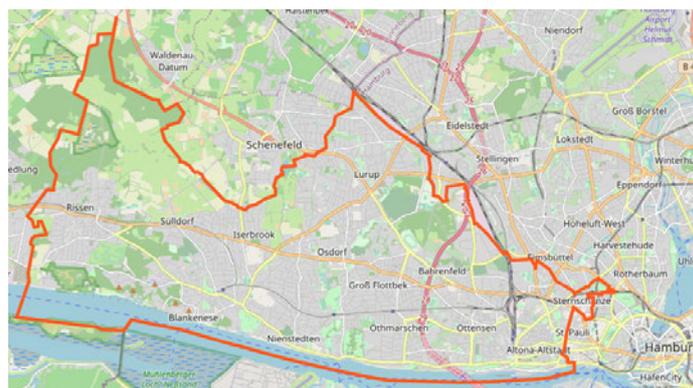


Abbildung 4.1: Hamburg Altona, Stadtteilgrenzen, Lage in Hamburg ¹

Aus diesem Grund wird die Testumgebung auf den Hamburger Bezirk Altona begrenzt, welches bereits als eines der Untersuchungsgebiete im SOH Projekt ausgewählt wurde (Weyl, 2019). Altona hat sowohl Wohn- als auch Geschäftsgegenden so dass Berufspendeln dargestellt werden kann. Weiterhin gibt es eine qualitativ gute Datenlage bezüglich POI, Gebäudenutzung, Parkplätze und Fahrradleihstationen (Hamburg Bezirksamt Altona, 2010, 2011). Das Straßennetz ist mit Parkplätzen und Leihstationen in Abbildung 4.2 dargestellt.

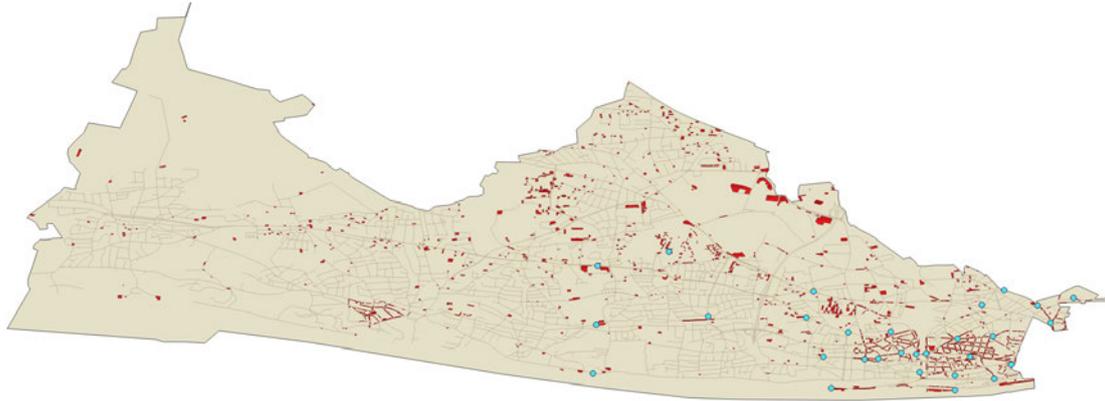


Abbildung 4.2: Hamburg Altona mit Straßennetz, Parkraum für Automobile (rote Bereiche) und Leihstationen für Fahrräder (blaue Punkte)

Ein aktueller und umfassender Bewegungsgraph steht als Grundlage für die umgesetzten Bewegungsmittel zur Verfügung. Dieser wird noch unterteilt in einen Straßengraphen und einem detaillierteren Graphen für Fußgänger. Zweiter hält zu den Straßen (bzw. den dazugehörigen Fußgängerwegen) auch noch Wege, die nur zu Fuß zu benutzen sind, wie bspw. Trampelpfade. Die Quelle der beiden Graphen ist jeweils OSM.

Teilgebiet: Altona-Altstadt

Das Verhalten der Agenten ist adaptiv und hängt nicht von der Größe oder Beschaffenheit der Umgebung ab. Somit muss das Verhalten stabil auch in einer alternativen Testumgebung nachweisbar sein. Für die exakte Untersuchung von erwartendem Verhalten wird die Szenariogröße auf Teilbereiche Altonas reduziert. Ein vereinfachtes, kleineres Modell bietet sodann den Vorteil durch Testläufe in höherer Zahl, spezifische Aspekte des Modells im Detail zu untersuchen. Der Stadtteil Altona-Altstadt bietet viele Leihradstationen und eine große Anzahl Parkplätze an, die gleichmäßig über das Gebiet verteilt sind.

¹<https://www.openstreetmap.org/relation/30223#map=12/53.5850/9.9354>



Abbildung 4.3: Testumgebung Altona Altstadt (Ausschnitt), Parkraum für Automobile (schraffierte Bereiche) und Leihstationen für Fahrräder (blaue Punkte)

Teilgraph Bleickenallee

Eine Menge von spezifischen Tests benötigt lediglich einen vereinfachten Teilgraphen, welcher die Möglichkeit von Umstiegen in andere Verkehrsmittel durch Parkplätze oder Leihstationen bietet und mittels Fußwegen zu erreichen ist. Für diese spezifischen Szenarien wird ein Teil der Bleickenallee ausgewählt und ein Graph mit vier Knoten erstellt, welcher exakt die Bedingungen bereit stellt, die für diese Experimente gefordert sind.

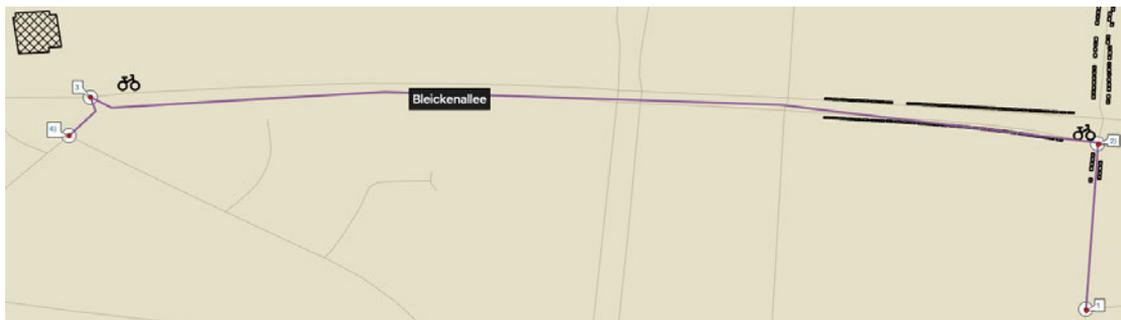


Abbildung 4.4: Testumgebung Bleickenallee mit vier Knoten, Umstiegspunkte für Fahrrad (Symbol) und Automobil (schraffierte Bereiche) an Knoten 2 und 3.

4.2 Experimente für Hypothese 1

H1 Der Agentenentwurf ist grundsätzlich dazu geeignet Multimodalität im Stadtverkehr zu modellieren.

Um diese Hypothese zu untersuchen, wird zunächst überprüft, ob die einzelnen, modalen Verkehrsmittel in ihrer individuellen Ausführbarkeit bestehen können. Anschließend soll erprobt werden, ob Wege mit verketteten Transportmittelgruppen darstellbar sind. Diese werden dahingehend untersucht, ob ein sauberer Wechsel zwischen den Verkehrsmitteln erfolgt. Schließlich werden die Transportmittel miteinander verglichen und dazu eine Isochronen-Analyse durchgeführt.

4.2.1 Experimente der Modellintegration

Die erste Gruppe an Experimenten untersucht, ob die integrierten Modelle in ihrer selbständigen Ausführbarkeit weiterhin bestehen. Dazu werden beliebige Routen in der Testumgebung Altona generiert und von den jeweiligen Agententypen durchlaufen. Es soll untersucht werden, ob die vorgegebenen Transportmittel genutzt werden und ob ein für dieser Verkehrsmittel zu erwartendes Bewegungsverhalten erfolgt. Für Autofahrer und Radfahrer werden Kennzahlen ermittelt, die typische Verhaltensweisen ähneln. Eine statische Analyse der Codeintegration ersetzt die detaillierten Experimente, die in den jeweiligen Arbeiten für Auto (Weyl, 2019) und Fahrrad (Mulack, 2020) zu finden sind.

Experiment: Modellintegration Fußgänger

Der Fußgänger (*Pedestrian*) ist eine von Löffler (2019) entwickelter Agent, welcher aber nicht als eigenständiger Modal-Agent angesehen werden kann, da für die Bewegung relevante Funktionalitäten in der Subklasse *Citizen* umgesetzt wurde. Für diese Arbeit relevant sind die Initialisierung der bevorzugten Gehgeschwindigkeit der Fußgänger, welche durch eine Normalverteilung in Abhängigkeit des Geschlechts ermittelt wird. Weiterhin wird die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl und Nähe umstehender Passanten reduziert. Diese beiden Funktionalitäten sollen in die neue Agentenarchitektur übernommen und in diesem Experiment untersucht werden.

Dazu werden 1000 Agenten erzeugt und ihre bevorzugten Gehgeschwindigkeiten miteinander verglichen. Der zweite Versuchsteil lässt einen Fußgänger auf einem Graphen (siehe Abbildung 4.4) zufällige Routen abschreiten. Zunächst durchläuft der Fußgänger

den Graphen allein, anschließend noch einmal mit 500 weiteren Passanten. Nun werden die erzielten Geschwindigkeiten des betrachteten Fußgänger-Agenten in den beiden Szenarien verglichen.

Resultatserwartung Zu erwarten ist, dass die individuellen, präferierten Laufgeschwindigkeiten in einem geschlechterabhängigen Rahmen bewegen. Mit zunehmend höherer Dichte soll eine Verlangsamung der Bewegungsgeschwindigkeit deutlich werden.

Experiment: Modellintegration Autofahrer

Die von Weyl (2019) entworfenen Auto-Agenten basieren auf dem MARS-Framework. Diese Agenten benutzen bereits das SGE sind aber nicht in die multimodale Agentenarchitektur eingebunden. Das Fahrzeug und die steuernde Person sind dort in einer Einheit zusammengefasst. Es muss also untersucht werden, ob die Trennung von Repräsentation des Fahrzeugs und der Steuerungslogik ohne Einschränkungen der Fahrfunktionalität möglich ist. Es muss jedoch weiterhin die Möglichkeit bestehen Auto-Agenten in ihrer vorherigen Funktionalität durch die bestehenden Modell- und Szenarienbeschreibungen ausführen zu können. Zur Validierung wird ein randomisierter Start- und Zielpunkt im Testgebiet ausgewählt (siehe Abbildung 4.5), um die dazwischenliegende Route vom Agenten exemplarisch befahren zu lassen. Die von Weyl entworfenen Experimente, welche als Unit-Tests vorliegen, können nach wie vor fehlerfrei durchgeführt werden.

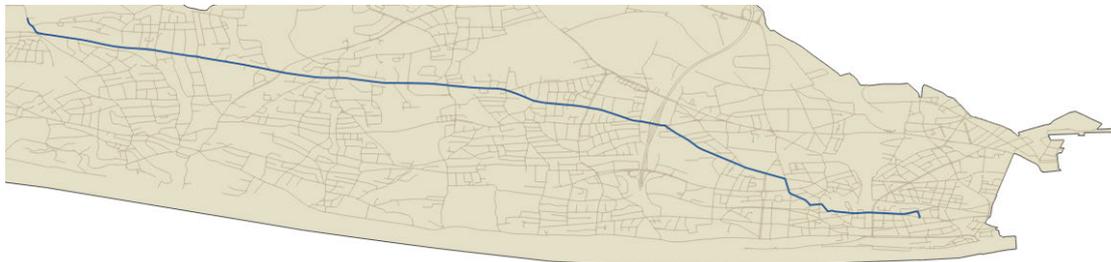


Abbildung 4.5: Route von Mörkenstraße 47 (Osten) bis Sülldorfer Kirchenweg 225 (Westen)

Resultatserwartung: Die Funktionalität der Auto-Agenten bleibt in ihrer bisherigen Form erhalten. Die Agentenarchitektur ändert nichts an der grundsätzlichen Funktionalität, wie Beschleunigung und Bremsverhalten, Einhaltung von Tempolimits, Verhalten

bei Ampeln und Kreuzungen sowie die korrekte Fahrspurwahl. Autos können beliebige Routen abfahren und haben dabei eine durchschnittliche Geschwindigkeit, die dem Stadtverkehr angemessen ist.

Experiment: Modellintegration Radfahrer

Das Fahrradfahren ist eine von Mulack (2020) implementierte Verkehrsmodalität, die zu einem Zeitpunkt entwickelt wurde, als die Agentenarchitektur bereits in MARS etabliert war. Es wird in diesem Experiment auf eine statische Analyse der Modellintegration verzichtet und direkt die Fahreigenschaften eines Fahrradfahrers in einer exemplarischen Route untersucht (siehe Abbildung 4.5).

Resultatserwartung Der Fahrradfahrer kann sein Ziel erreichen und zeigt dabei Geschwindigkeitsverhalten, welches dem Stadtverkehr und dem Transportmittel angemessen ist.

4.2.2 Experimente der Intermodalität

Die zweite Experimentreihe untersucht die korrekte Darstellung intermodaler Wege. Dafür werden die oben vorgestellten Modelle integriert und kombiniert. Automobile müssen nun auf Parkflächen abgestellt werden und können nur von dort aus verwendet werden. Die Nutzung des Autos erfordert sodann auch das Abschreiten des Fußweg zu und von der Parkfläche auf der das Fahrzeug abgestellt ist. Auch die Fahrräder werden nur an Radleihstationen zur Verfügung gestellt. Das Prinzip erfolgt analog zum Automobil.

Experiment: Multimodale Routensuche

Bevor intermodale Routen genutzt werden können, müssen diese zunächst gefunden werden. Die Wahl der Route hängt von internen und externen Faktoren ab. Zu den internen Faktoren gehören die Fähigkeiten, ein bestimmtes Fahrzeug nutzen zu können. Weiterhin können dort Präferenzen oder anderweitige Einflussmöglichkeiten berücksichtigt werden. Die externen Faktoren hängen von der Verfügbarkeit der zu nutzenden Transportmittel ab.

In diesem Experiment wird nun also untersucht, ob die verfügbare Routensuche für unterschiedlichen internen und externen Zustände eine passende multimodale Route zur

Verfügung stellt. Die Testumgebung ist der Teilgraph Bleikenallee (siehe Abbildung 4.4). Die Experimente werden in folgender Reihenfolge durchgeführt:

1. Es wird ein reiner Fußweg angefragt.
2. Es gibt den Nutzungswunsch des Autos, welches in der Nähe abgestellt ist.
3. Es gibt den Nutzungswunsch eines Fahrrad. Eine Leihstation ist verfügbar.
4. Es gibt den Nutzungswunsch eines beliebigen Transportmittels, diese stehen auch zur Verfügung.

Resultatserwartung Weisen die internen Zustände des Agenten auf ein Transportmittel hin und ist dies auch verfügbar, so wird eine entsprechende, intermodal Route bereitgestellt. Kann diese aufgrund der Verfügbarkeit nicht bereit gestellt werden bzw. ist der Aufwand des Umwegs gravierend größer, so werden reine Fußwege ermittelt.

Experiment: Autofahren mit Parken

Die gültige und sinnvolle Route ist gefunden, nun muss diese entsprechend genutzt werden können. Ein Agent hat also die Aufgabe zum Parkplatz des Autos zu laufen, dort einzusteigen, sich mit dem Auto in das Straßennetz einzugliedern und bis zum Zielparkplatz zu fahren. Dort muss das Automobil geparkt werden. Ist dies nicht möglich muss ein neuer Parkplatz gefunden werden. Ist das Fahrzeug geparkt, soll die verbleibende Strecke zu Fuß zurückgelegt werden. Liegen Start oder Ziel auf dem Knoten des Parkplatzes, so muss das Ziel ohne den jeweiligen Fußwege erreicht sein. Zur Überprüfung werden verschiedene Routen auf dem Teilgraphen Bleikenallee abgefahren.

Resultatserwartung Die Agenten können die Autos benutzen um ihre multimodale Route sauber abzufahren. Das Auto muss jeweils sauber abgestellt werden, der Agent anschließend das Straßennetz verlassen.

Experiment: Radfahren mittels Leihstationen

Die Leihstationen für Fahrräder sind an die Logik der Parkplätze für Autos angelehnt. Es gibt jedoch keine Limitierung der Kapazität, wodurch beliebig viele Räder an einer Station wieder abgegeben können. Aus Gründen der Modellvereinfachung gibt es ebenfalls unbegrenzt viele Räder zur Leihe. Es gibt jedoch deutlich weniger Leihstationen als Parkplätze und sie sind auch nicht über das gesamte Gebiet verteilt sondern konzentrieren sich auf die zentrumsnäheren Bereiche. Versuchsweise werden hier wie beim Automobil

die verschiedenen Start- und Endpunkte im Teilgebiet Bleikenallee mittels intermodaler Wege und dem Hauptverkehrsmittel Fahrrad durchfahren. Anschließend werden zufällige Wege in Altona-Altstadt generiert, welche mit dem Fahrrad zu erreichen sind.

Resultatserwartung Agenten sollen sich Fahrräder leihen können und diese wieder abgeben. Eine Zielerreichung mit intermodalen Wegen ist immer möglich.

4.2.3 Experimente zum Reisezeitvorteil

Die letzte Versuchsreihe der Hypothese 1 untersucht die verschiedenen Reisegeschwindigkeiten der Transportmittel und den damit einhergehenden Reisezeitvorteil. Darunter ist der Zeitgewinn für gleiche Wege aber unterschiedlichen Verkehrsmitteln gemeint. Zur besseren Verdeutlichung wird aber geprüft, wie groß die Entfernung ist, die ein Verkehrsteilnehmer mit dem jeweiligen Modaltyp in einem gleichen Zeitraum erreichen kann. Dazu wird die Reichweite von Fußgängern, da sie grundsätzlich mit gleichbleibender Geschwindigkeit unterwegs sind, mittels Isochronenanalyse ermittelt. Dieses statische Verfahren zeichnet eine kreisförmige Linie um den Startpunkt, welche alle zu erreichenden Zielpunkte in dem Zeitfenster anzeigt. Kreisförmig ist sie durch die Distanzermittlung in alle Himmelsrichtungen. Als Startpunkt wird ein Knoten am Altonaer Bahnhof gewählt. Von diesem Punkt aus starten auch Autofahrer und Radfahrer nun jedoch in Richtung eines entfernten, östlichen Punktes. Die Reichweite der Transportmittel soll nun je Zeitintervall miteinander verglichen werden.

Resultatserwartung Es wird erwartet, dass mit dem Automobil die längsten Strecken im vergleichbaren Zeitraum erzielt werden können. Das Fahrrad soll ebenfalls eine deutlich größere Reichweite ermöglichen als das Zufußgehen. Der Reisezeitvorteil wächst proportional zur Zeit.

4.3 Experimente für Hypothese 2

H2 Die Reisezeitvorteile des Pkw im Stadtverkehr werden häufig überschätzt. Bis zu einer Distanz von 1,5 km kann das Zufußgehen und bis 5 km das Fahrradfahren schneller sein als die Fahrt mit dem Pkw aufgrund der verhältnismäßig langen Parksuchdauer.

Die Experimente für Hypothese 2 haben zum Ziel, die Einschränkung des Reisezeitvorteils für kürzere Distanzen im urbanen Verkehrskontext abzubilden. Nachteilig für intermodale Verkehrswege sind lange Wege zu möglichen Umsteigepunkten im Vergleich zu direkteren Wegen als Fußgänger. Somit haben die Verfügbarkeit von zielnahen Parkflächen oder auch die Nähe von Fahrradleihstationen einen entscheidenden Einfluss auf den Reisezeitvorteil des jeweiligen Transportmittels. Um das Verkehrsaufkommen mit begrenzter Agentenanzahl dennoch anzunähern, werden neben dem Gesamtgebiet von Altona auch der Stadtteil Altona-Altstadt untersucht. Zudem wird abhängig von der Agentenanzahl auch die Anzahl freier Parkplätze verringert. Dazu werden 77,2 % der Parkflächen unabhängig von den Agenten grundausgelastet (Durchschnitt einer Erhebung von 2014 in Altona-Altstadt vgl. Bischoff and Strahl (2014)). Die zu untersuchenden Routen sollen jeweils mit allen drei Modalitäten durchlaufen werden. Dazu werden für jeden Agenten zu Wegbeginn Zwillingagenten erstellt, welche mit den jeweilig anderen Verkehrsmitteln das selbe Ziel erreichen sollen. So können pro Route exakte Vergleichswerte bestimmt werden. Die Zwillingagenten müssen somit die Eigenschaften des ursprünglichen Agenten erben, wie bspw. die spezifische Laufgeschwindigkeit. Es soll zudem untersucht werden, wie groß der Zeitunterschied von simulierten Fußwegen zu ihren statisch berechnetem Pendant sind. Falls eine ausreichend geringe Abweichung festgestellt werden kann, können statische Zeiten für Fußwege als Vergleichswert für Radfahrer und Autofahrer genommen werden und somit reine Autofahreragenten erstellt werden. Diese nutzen wann immer möglich das Automobil und haben sodann einen radfahrenden Zwilling. Die Ziele des Agenten werden über das Verkehrsnachfragemodell erzeugt (siehe Sektionen 4.4 und 5.3).

Resultatserwartung Laut Randelhoff (2018) liegt die Grenze des Reisezeitvorteils des Fahrrads gegenüber dem motorisiertem Individualverkehr (MIV) bei vier bis sieben Kilometern. Die Simulationsergebnisse sollen eine signifikante Anzahl an Fahrradrouten, für welche dieser Vorteil gegenüber vergleichbar langen Autostrecken festgestellt werden kann, aufweisen. Das Umweltbundesamt kommt auf Basis einer Expertenschätzung zu dem in Abbildung 4.6 dargestellten Reisezeitvergleich. Demzufolge ist der Fußverkehr bis etwa 1,4 km schneller als die Pkw-Nutzung, das Fahrradfahren bis zu einer Entfernung von 4,5 km. Auch diese Werte sollen in den Simulationsergebnissen wiedergefunden werden.

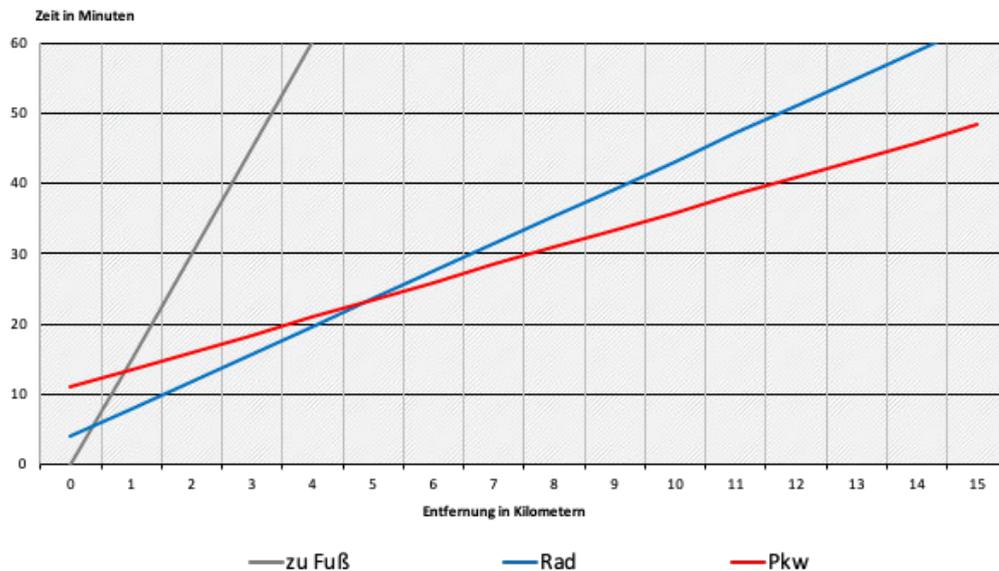


Abbildung 4.6: Wegevergleich: von Tür zu Tür im Stadtverkehr. Entfernungsabhängige Reisezeitaufwände in Minuten des Fußverkehrs, des Radverkehrs und des Pkw (reduziert nach Quelle Umweltbundesamt (2014))

4.4 Experimente für Hypothese 3

H3 Die Hinzunahme weiterer Modalitäten in der Reihenfolge (Fußgänger, Fahrrad, Automobil) senkt die global zusammengefasste Reisedauer aller Verkehrsteilnehmer und nähert sich in der Verkehrsmittelwahl dem Modal Split an.

Für die dritte Hypothese wird ein Verkehrsnachfragemodell in Form des Tagesplan-Modells genutzt. In diesem werden Agenten als Stadtbewohner dargestellt, die einen Tagesablauf haben der ihrem Erwerbsstatus entspricht. In diesem müssen Agenten, insofern sie erwerbstätig sind, zur Arbeit fahren und später wieder zurück. Es gibt Arbeitsorte über das ganze Testgebiet verteilt. Diese werden über LandUse-Vektordaten gefunden (Kategorien: *Commercial* und *Industrial*). Neben der Arbeit haben Agenten noch weitere Zielpunkt im Verlauf des Tages wie Essen gehen, Besorgungen machen und Freizeitaktivitäten erreichen. Für das Experiment werden die Agenten schrittweise mit weiteren Verkehrsmitteln ausgestattet. Zunächst können sie sich lediglich zu Fuß fortbewegen. In der nächsten Versuchsreihe steht ihnen auch noch das Fahrrad zur Verfügung. Schließlich können sie aus allen drei zur Verfügung stehenden Transportmitteln frei wählen. Die Expe-

perimente werden mit unterschiedlich vielen Agenten durchgeführt, um den Einfluss von Verkehr zu ermitteln. Zudem werden die Gebiete Altona-Altstadt mit dem Gesamtgebiet des Bezirks Altona verglichen.

Zusätzlich zur globalen Reisezeit soll auch der Modal Split der gewählten Verkehrsmittel dargestellt werden. Die freie Transportmittelwahl wird durch ihre situative Verfügbarkeit und den inneren Präferenzen des Verkehrsteilnehmers getroffen. Laut Mallig (2019) wählt eine Person, die am Montag mit dem Auto zur Arbeit fährt, mit hoher Wahrscheinlichkeit auch an den übrigen Tagen das Auto. Dieses Phänomen wird als Stabilität in der Verkehrsmittelwahl bezeichnet und hat Einfluss auf den Modal Split. Die Stabilität der Verkehrsmittelwahl wird hier durch die Begrenzung von Automobilverfügbarkeit für alle Agenten in Kombination mit hohen Präferenzwerten für das Automobil dargestellt. Ohnehin wählen Agenten grundsätzlich einen für sie vorteilhaften intermodalen Weg.

Resultatserwartung Das Gebiet Altona ist aus der Sicht eines Fußgängers relativ groß. Aus diesem Grund wird erwartet, dass die zur Verfügung stehenden Verkehrsmittel und dem damit einhergehenden spezifischen Reisezeitvorteil, die global zusammengefasste Reisedauer deutlich reduzieren. In der letzten Versuchsreihe dieses Experiments sind alle Transportmittel verfügbar und die Agenten genießen freie Wahlmöglichkeiten nach Präferenzen und situativer Verfügbarkeit. Es wird vermutet, dass die Verteilung der Nutzung sich dem Modal Split von Altona annähert. Trotz des kleineren Gebiets werden ähnliche jedoch weniger deutliche Ergebnisse für das Gebiet Altona-Altstadt erzielt.

5 Konzeption und Implementierung

Die Konzeption und Designentscheidungen basieren auf der zuvor vorgestellten Analyse (siehe Kapitel 3) und dem aus den Experimenten resultierenden Anforderungen. Insofern nötig werden die Ausführungen um Implementierungsdetails ergänzt. In Anlehnung an die Analyse wird das vorliegende Kapitel wiederum in drei Bereiche untergliedert: Komponenten der Umwelt, den Agenten als multimodalen Grundtypen und in seinen modalen Ausprägungen sowie schließlich die Umsetzung eines Verkehrsnachfragemodells durch ein Tagesplanmodell.

5.1 Design der Umgebungskomponenten

Im Folgenden werden die Komponenten der Umwelt vorgestellt, somit alle außerhalb von Agenten nutzbaren Funktionalitäten. Dies betrifft vor allem das Straßennetz, welches als Verwaltungsstruktur für jegliche Mobilität in diesem Modell verwandt wird. Diese sind durch weitere Strukturen der Verkehrssteuerung ergänzt. Schließlich werden geospatiale Raumstrukturen beschrieben, die für Tagesplanung und Routensuche Relevanz haben.

5.1.1 Straßennetzkomponente

Um das Straßennetz abzubilden, wurde in der MARS Gruppe eine Komponente entwickelt, welche das Netz als Graph enthält und die auf ihm befindlichen Entitäten überwacht. Diese Komponente nennt sich `SpatialGraphEnvironment` (SGE) und wird extensiv in der Arbeit von Weyl (2019) beschrieben.

Das SGE basiert auf einem generischeren Graphen, der auch für andere Ausprägungen nutzbar ist (siehe Abbildung 5.1). Dies soll zunächst verdeutlichen, dass eine grundsätzliche Graphenstruktur aus einer Menge von Knoten (`INode`) vorliegt, die über gerichtete

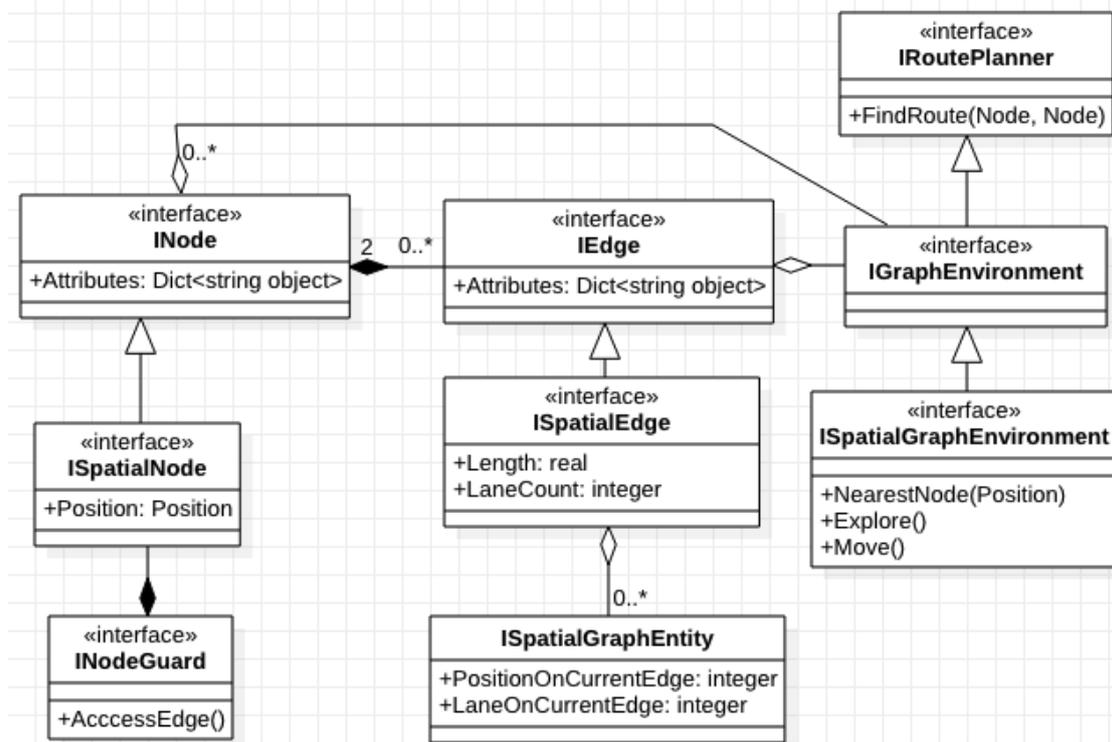


Abbildung 5.1: ISpatialGraphEnvironment und abhängige Komponenten

Kanten (IEdge) miteinander verbunden ist. Die spatialen Ausprägungen dieser Graphenobjekte bilden das Grundgerüst des SGE. Die ISpatialNode symbolisiert Kreuzungen im Straßennetz. Diese können jedoch auch abstrakterer Natur sein indem sie nur eine ein- und eine ausgehende Kante haben. Dies wäre aus verkehrsbeschreibender Sicht keine wirkliche Kreuzung, da hier kein Aufeinandertreffen verschiedener Kanten vorliegt. Die aus OSM integrierten Informationen beschreiben aber Straßenverläufe miteinander so, wenn bspw. sich im Verlaufe einer Straße der Straßename ändert oder eine weitere Spur hinzukommt. Detailliertere Informationen zu den Kreuzungen liegen bis dato nicht vor, weshalb im Modell vereinfachende Annahmen gemacht werden müssen, die bei Weyl (2019) im Detail erläutert werden. Das Händeln von Kreuzungen übernimmt der INodeGuard, welcher den Zugang zu jeder Kante überwacht. Dieser ist so zu konfigurieren, dass er bei oben genannten logischen Kreuzungen Zugang unmittelbar gewährt. Bei Kreuzungen mit sich kreuzenden Straßen bildet der INodeGuard die Vorfahrtsregelung ab. Dies kann bspw. über eine Ampelschaltung geschehen. Der Knoten bildet in dieser Arbeit den Ein- und Ausstiegspunkt jedes Verkehrsteilnehmers in den Graphen ab. Die ISpatialEdge symbolisieren Straßenabschnitte. Sie haben eine Länge, eine Anzahl von

Spuren und halten eine Menge von auf ihnen befindlichen Verkehrsteilnehmern (hier abstrakt als `SpatialEntities` bezeichnet). Das `ISpatialGraphEnvironment` bildet die Schnittstelle zu den Agenten. Über sie können Fahrzeuge oder Agenten zum Graph hinzugefügt werden oder auch ihre Umgebung explorieren. Schließlich bedarf es aber Routen, die das SGE über die Schnittstelle des `IRoutePlanners` zur Verfügung stellt. Diese sind monomodale Routen von einem Start- zu einem Zielknoten. Diese Funktionalität ist auch Teil der multimodalen Routensuche, die später vorgestellt wird (siehe Abschnitt 5.1.4). Abschließend wird das Kernstück des SGE betrachtet, die Kontrolle und Überwachung der Bewegung in seinem Netz. Über die `Move`-Funktionalität können Verkehrsteilnehmer versuchen sich innerhalb des Netzes fortzubewegen. Ob dies glückt hängt von verschiedenen Faktoren ab. So kann das SGE wahlweise eine Kollisionsprüfung durchführen. Auch prüft es die Spurwahl und ob die Anfrage im Allgemeinen gültig und in dem Graphen abbildbar ist. Bei geglückter Bewegung speichert das SGE Schlüsselinformation wie die aktuelle Kante und die Position auf der Kante in der Repräsentation des Verkehrsteilnehmers (genannt `RoadUser`). Es gibt also eine relativ enge Kopplung zwischen `RoadUser` und SGE, die bei der Entwicklung von neuen Modaltypen zu verstehen und berücksichtigen ist. Weiteren Einfluss auf die Mobilität können zusätzliche Komponenten der Straßenverkehrsregeln nehmen.

5.1.2 Straßenverkehrsregeln und Ampeln

Es gibt im deutschen Straßenverkehr eine Vielzahl von Straßenschildern, die den Verkehr regeln. Die verfügbaren Open-Data-Quellen (`GeoPortal Hamburg`¹ oder `OSM`) bieten derzeit aber keine Informationen darüber an mit Ausnahme der vorgegeben Höchstgeschwindigkeit. Alle anderen Verkehrsschildern werden also nicht Teil des Modells sein und haben somit auch keinen Einfluß auf das Verkehrsverhalten der Agenten. Die in `OSM` verfügbaren Daten, wie Position, Länge der Kante und Anzahl Spuren werden wie auch die Höchstgeschwindigkeit (wenn verfügbar) über das *Open Data Discovery and Integration* (`ODDI`)² Werkzeug extrahiert. Diese Informationen stehen sodann in der Attributtabelle jeder Kante zur Verfügung. Während des Initialisierungsprozesses des SGE

¹<http://www.geoportal-hamburg.de/geo-online/>

²`ODDI` ist ein in `MARS` entwickelte Werkzeug zur Extraktion und Transformationen öffentlicher, beliebiger Daten, die im Bereich der Verkehrssimulationen zum Import von Graphen auf Basis von `OSM` genutzt werden. Diese lassen sich sowohl als natives und GIS unabhängiges `GraphML` Format bzw. in Form eines `Vector Layers` als `GeoJson`, `Shapefile` oder `Geopackage` sichern. Statische Vorabanalysen und `Plots` betrachteter Gebiete sind ebenfalls Teil des Funktionsumfangs (Glake et al., 2019).

werden Kanten mit den verfügbaren Informationen befüllt und wo nötig durch sinnvolle Standardwerte ergänzt (bspw. $v_{max} = 50km/h$ als Höchstgeschwindigkeit).

Ampeln

Die bereits eingeführten `INodeGuards` können als Ampeln fungieren, da sie den Zutritt auf die Kanten steuern (siehe Abbildung 5.2). Aufgrund eingeschränkter Daten über die einzelnen Ampeln im Stadtgebiet und ihren tageszeitabhängigen Intervallphasen, gibt es derzeit eine vereinfachte Implementierung von Ampeln. Diese kann aber zukünftig durch kompliziertere Schaltungen ausgetauscht werden. Auch die aktuelle Implementierung von Weyl (2019) erlaubt an die Tageszeit angepasste Intervallphasen. Es gibt unterschiedliche Steuerungen von Normalverkehr bis Hauptverkehrszeit (*Rush Hour*).

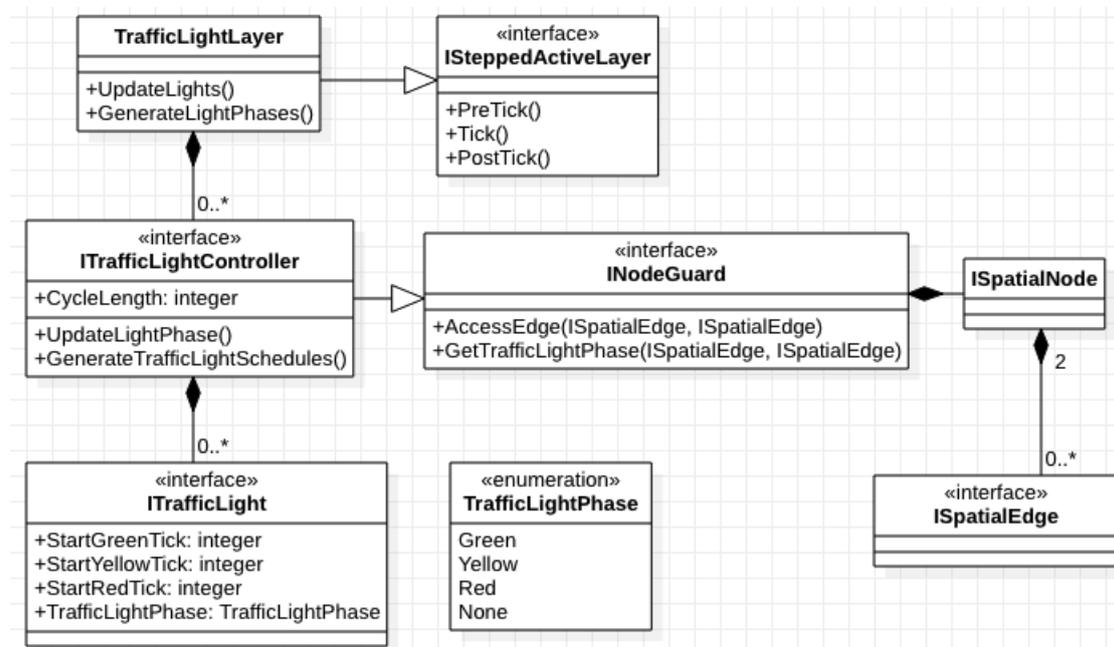


Abbildung 5.2: Implementierung von Ampeln mittels `INodeGuard`

Die Ampelkomponente ist als `SteppedActiveLayer` umgesetzt, welche vom Simulationssystem vor (*PreTick*), zeitgleich zu den Agenten (*Tick*) und nach ihnen (*PostTick*) je Zeitschritt angesteuert wird. So kann sichergestellt werden, dass die Ampelsteuerung während eines Zeitschrittes für alle Agenten konsistent ist. Über Zeitreihen können dynamisch während der Laufzeit die Steuerungspläne ausgetauscht werden. Über GIS-Layer können die Geositionen der Ampeln ermittelt werden. Nun müssen all diese Daten zusammengeführt werden. Dazu werden die Positionen der Ampeln den Kreuzungen

(ISpatialNodes) des SGE zugeordnet. Für jede Kreuzung gibt es einen TrafficLightController, der die einzelnen Ampeln der jeweiligen Kanten (hier INodeGuard) steuert. Somit wird sichergestellt, dass alle Ampeln der selben Kreuzung aufeinander abgestimmt sind. Es gibt die folgenden Ampelphasen Green, Yellow, Red, None. Verkehrsteilnehmer können nun auf die ihnen gerade angezeigte Ampelphase reagieren. None bedeutet, dass die Ampel ausgeschaltet ist. Dann und auch wenn für die Kreuzung keine Ampelschaltung initialisiert wurde, werden die gültigen Verkehrsregeln angewendet (hier: Rechts-vor-Links-Vorfahrt). Die Standardeinstellung der Ampeln ist eine sich ständig wiederholende Schaltphase von 90 Sekunden. Einschränkend ist noch zu erwähnen, dass die Ampelschaltung für alle Fahrzeuge der selben Kante gilt. Es gibt keine Unterscheidung zwischen Linksabbiegern, Rechtsabbiegern oder Fahrzeugen, die geradeaus fahren. Außerdem haben alle eingehenden Straßen der Kreuzung nacheinander ihre Grünphase. Eine Priorisierung findet nicht statt.

5.1.3 Geospatale Raumstrukturen für die Routenplanung

Neben den unmittelbaren für den Verkehrsfluss relevanten Datenstrukturen werden für die Tagesplanung des Agenten sowie für seine darauf aufsetzende Routensuche, weitere Informationen. Diese Daten werden in Form von Vectorlayern in das Modell eingebunden und über ihre jeweiligen Komponenten zur Verfügung gestellt.

Points of Interest, Gebäude und Raumnutzung

Um Verkehrsmuster darstellen zu können werden die Agenten mit Tagesplänen ausgestattet (siehe Kapitel 5.3), die dazu führen, dass das Verkehrsaufkommen über den Tag sinnvoll variiert. Es wird also erwartet, dass es zu bestimmten Zeiten eine hohe Verkehrslast (*Rush Hour*) gibt und zu anderen Zeiten diese entsprechend geringer ausfällt. Dies basiert auf dem jeweiligen Tageszyklus eines Agenten. Hat der Agent Pläne, wie bspw. Besorgungen erledigen, dann müssen ihm Einkaufsmöglichkeiten angezeigt werden, aus denen gewählt werden kann. Die Informationen darüber wo sich Geschäfte befinden, wo Arbeitsplätze sind aber auch Wohngebieten oder Orte der Freizeitgestaltung, sollen aus Echtdateien gewonnen werden. Diese können über GISVectorLayer in das Modell integriert werden. Um einen einheitlichen Zugriff auf diese heterogenen Daten zu ermöglichen, hat Löffler (2019) einen MediatorLayer implementiert, welcher alle Anfragen entgegennimmt und anhand der Anfragekriterien einen geeigneten Ort zu finden versucht.

Parkraum

Ein Wechsellpunkt zwischen modalen Bewegungsformen sind Parkräume. Dort sind derzeit nicht benutzte Fahrzeuge abgestellt. Der ruhende Verkehr, also parkende Fahrzeuge, hat sich im öffentlichen Raum auf vorgeschriebenen Abstellanlagen zu befinden. Diese können noch nach Fahrzeugtyp unterschieden werden und sind durch gesetzliche Regelungen in ihren Dimensionen und Eigenschaften definiert. Diese geometrisch-organisatorischen Anforderungen sind beispielsweise in der Garagenverordnung (Architektenkammer Baden-Württemberg, 2012) beschrieben und berücksichtigen notwendige, geometrische Gegebenheiten des Fahrzeugverkehrs wie Fahrspuraufweitung für Kurvenfahrten (Jocher and Loch, 2010). Die Größe der Parkflächen soll also nur einer begrenzten, angemessenen Anzahl von Fahrzeugen Platz bieten. Die Parkflächen werden aus den Quellen des *Geoportals Hamburg*³ und der *Geofabrik*⁴ bezogen und als Vektorlayer in das Modell integriert (siehe Abbildung 5.3). Die importierten Features enthalten Informationen über die Flächengröße. Daraus kann in Anlehnung an oben benannte Garagenverordnung eine nach Größen kategorisierte Anzahl von Stellflächen errechnet werden, die dann wiederum von Fahrzeugen zum Parken nutzbar sind. Bis zu $10m^2$ findet ein einzelnes Auto platz. Bis zu einer Größe von $500m^2$ ist der Platzbedarf höher aufgrund notwendiger Zufahrten und Fahrspuraufweitungen. In dieser Kategorie liegt der Quotient bei $15m^2$ pro Fahrzeug. Dieser Bedarf steigt bei der letzten Kategorie, die alle noch größeren Parkflächen umfasst, auf $20m^2$ pro Fahrzeug.

Jede Parkfläche hat nun aufgrund ihrer geometrischen Größe eine Kapazität an Fahrzeugen, die auf ihr Platz finden. Fahrzeuge müssen sich, wenn sie den Parkraum verlassen, aus diesem austragen. Wollen Automobile sich hingegen wieder auf eine Parkfläche begeben, so wird geprüft, ob es einen freien Stellplatz gibt. Ist dies nicht der Fall, so kann das Auto dort nicht abgestellt werden und der Agent muss den nächsten freien Parkplatz suchen.

5.1.4 Multimodale Routensuche

Als multimodale Routen werden in dieser Arbeit Gruppen von Routen mit jeweiligem Modaltyp bezeichnet (vgl. Abbildung 5.4). Sie sind somit strenggenommen monomodale oder intermodale Routen. Sie können dabei beliebig viele Routen enthalten, welche an Umsteigepunkten enden müssen, damit ein Transportmittelwechsel vollzogen werden

³<https://www.geoportal-hamburg.de/geo-online/>

⁴www.geofabrik.de



Abbildung 5.3: Parkraumlayer (Ausschnitt Ehrenbergstraße) mit Einzelparkplätzen (parallel zur Straße) und Parkfläche mit Kapazität für mehrere Fahrzeuge

kann. Multimodale Routen enthalten zwar die routenbezogenen Modaltypen, aber bleiben in ihrer Beschreibung abstrakt. Es wird somit keine Information darüber gespeichert in welches exaktes Fahrzeug umgestiegen wird, wann dieses womöglich eintrifft oder wie es überhaupt exploriert und akquiriert werden kann.

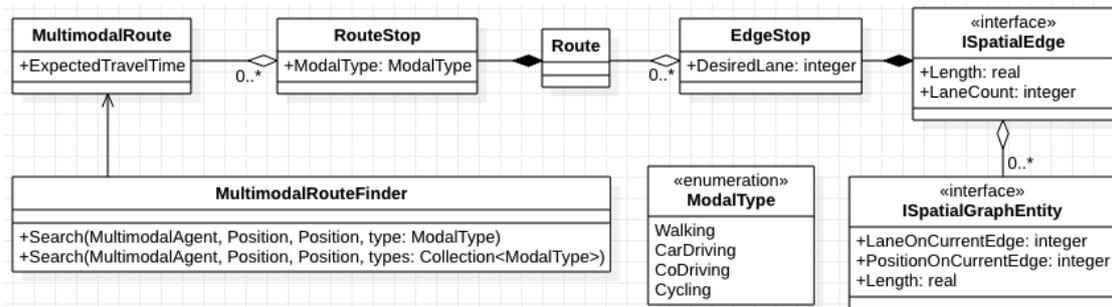


Abbildung 5.4: Multimodale Route und Finder

Das Erstellen von multimodalen Routen wird über eine Servicekomponente ermöglicht, dem `MultimodalRouteFinder`. Der Finder sucht für einen Agenten potentiell intermodale Routen in Abhängigkeit von den verfügbaren Fähigkeiten (*capabilities* hier `ModalTypes`). Wird eine Anfrage mit einer gezielten Fähigkeit gestellt, so wird explizit eine intermodale Route gesucht, welche die Umsteigepunkt zu dem zugehörigen Transport-

mittel in der Wegeplanung mit einbezieht. Für eine intermodale Autofahrt werden somit Fußwege zum Parkplatz auf dem Gehweg-Environment gesucht. Anschließend wird vom Parkplatz zu einem freien Parkplatz in Zielnähe eine Strecke auf dem Straßengraphen gesucht - die Autostrecke. Die intermodale Route wird durch einen weiteren Fußweg abgeschlossen. Als Übergangsknoten zwischen den Netzen dienen die Knoten an den jeweiligen Umsteigepunkten. Diese müssen in beiden Graphen vorhanden sein, so dass ein Transfer sauber gelingt. Kann das Auto nicht am vorgesehenen Knoten abgestellt werden, da bspw. keine freien Parkplätze zur Verfügung stehen, kann eine Ergänzung der Route (*Re-Routing*) angefragt werden. Die Multimodalroute wird dann um eine weitere Autofahrt zum nächsten freien Parkplatz ergänzt. Der abschließende Fußweg wird ersetzt durch eine Strecke, die den Umweg zum neuen Parkplatz mitberücksichtigt. Das geschieht analog auch für die Suche von intermodalen Fahrradrouten. Hat der Agent jedoch, statt nur einer, verschiedene Modalitäten zur Auswahl, so ermittelt der Finder für alle verfügbaren Transportmittel die jeweiligen Routen und vergleicht diese anschließend nach ihrer zu erwartenden Reisezeit (`ExpectedTravelTime`). Die Reisezeitermittlung basiert dabei auf den möglichen bzw. gewünschten Geschwindigkeit in dem jeweiligen Verkehrsmittel für die zu überbrückende Distanz. Schließlich wird die multimodale Route ausgewählt, welche die kürzeste Reisezeit verspricht.

5.2 Design des Agenten

Die Konzipierung des Agenten beruht auf der Annahme, dass es eine Vielzahl von unterschiedlichen Transportmittel gibt, welche zur Nutzung spezifischen Anforderungen (*capabilities*) an den Agenten stellen. Auch können die Verkehrsmittel unterschiedliche Handhabungen ermöglichen, sie müssen also eine Benutzungsschnittstelle (*handle*) bereit stellen. Es werden exemplarische Transportmittel in dieser Arbeit umgesetzt, die Architektur soll aber die Einbindung beliebiger, weiterer Verkehrsmittel ermöglichen. Aus diesem Grund wird eine generische Benutzungsschnittstelle definiert - der Kontrakt.

5.2.1 Kontrakt-Muster

Agenten können mit anderen Entitäten des Modell umgehen und diese für ihre Zwecke nutzen. Für bestimmte Entitäten ist es von Bedeutung, dass ein Benutzung zuvor autorisiert wird. Ein Auto kann beispielsweise nur von einer Person zugleich gefahren

werden. Es ist also von Nöten, dass das Auto prüft, ob es bereits einen Fahrer gibt. Auch kann das Auto prüfen, ob der Agent die Fähigkeiten ausgebildet hat, welche nötig sind um das Auto zu steuern. Falls die notwendigen Fähigkeiten vorhanden sind und weitere zu prüfende Voraussetzungen erfüllt sind, wird der Kontrakt erfolgreich geschlossen und dem anfragenden Agenten wird ein Kontrakt-Handle bereit gestellt (vgl. Dalski (2014)). Mittels diesem Steuerungsobjekt kann der Agent nun das Auto steuern bis er das Fahrzeug verlässt und damit das Handle invalidiert (ungültig macht, so dass es neu akquiriert werden muss).

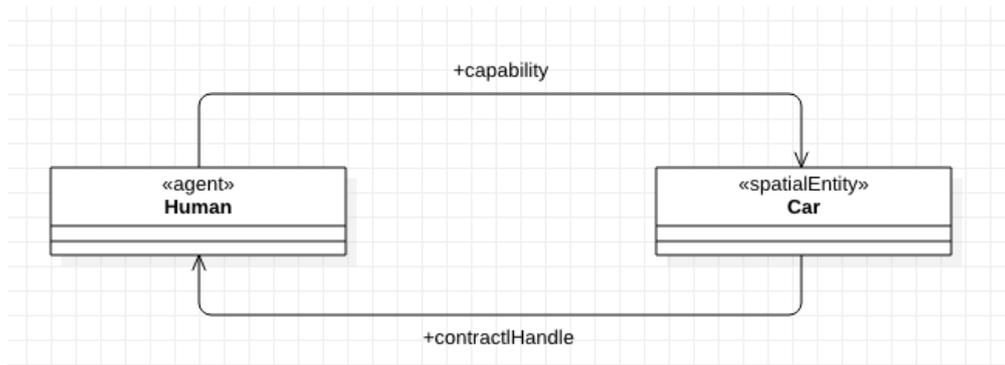


Abbildung 5.5: Kontrakt zwischen Agent und zu benutzender Entität, hier Mensch und Automobil

Das Kontrakt-Muster (siehe Abbildung 5.5) ist prinzipiell für die Interaktion mit beliebigen Objekten möglich, wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch lediglich für die Benutzung von Transportmitteln durch Agenten angewandt.

5.2.2 Multimodaler Agent

Der multimodale Agent kann sich mittels verschiedener Transportmittel fortbewegen. Um diese jeweiligen Transportmittel benutzen zu können, muss der Agent die dazu notwendigen Fähigkeiten (*Capabilities*) ausbilden (siehe Kontrakt-Muster). Am Beispiel einer Autoimplementierung wird das Konzept vorgestellt. Das Auto unterstützt das `IVehicleEntrance`-Interface womit es spezifizieren muss, welche *Capabilities* benötigt werden um als

Beifahrer passiv vom Auto mitgenommen zu werden. Dafür muss der Agent ein `IPassengerCapable` sein.

Fahrer das Automobil steuern zu können. In diesem Fall muss der Agent den Fähigkeiten von `ICarDriverCapable` genügen.

Die Fähigkeiten werden also in den Schnittstellen beschrieben, welche auch notwendige Funktionen oder relevante Eigenschaften spezifizieren, die für das Fahren notwendig sind. Das Auto prüft nun, ob der Agent das Steuerungshandle erhalten kann. Die Prüfung des Fahrzeugs kann verschiedenste Faktoren enthalten, wie beispielsweise:

Es gibt derzeit keinen Fahrer.

Das Fahrzeug steht und ist nicht in Bewegung.

Der Fahrer hat einen Führerschein.

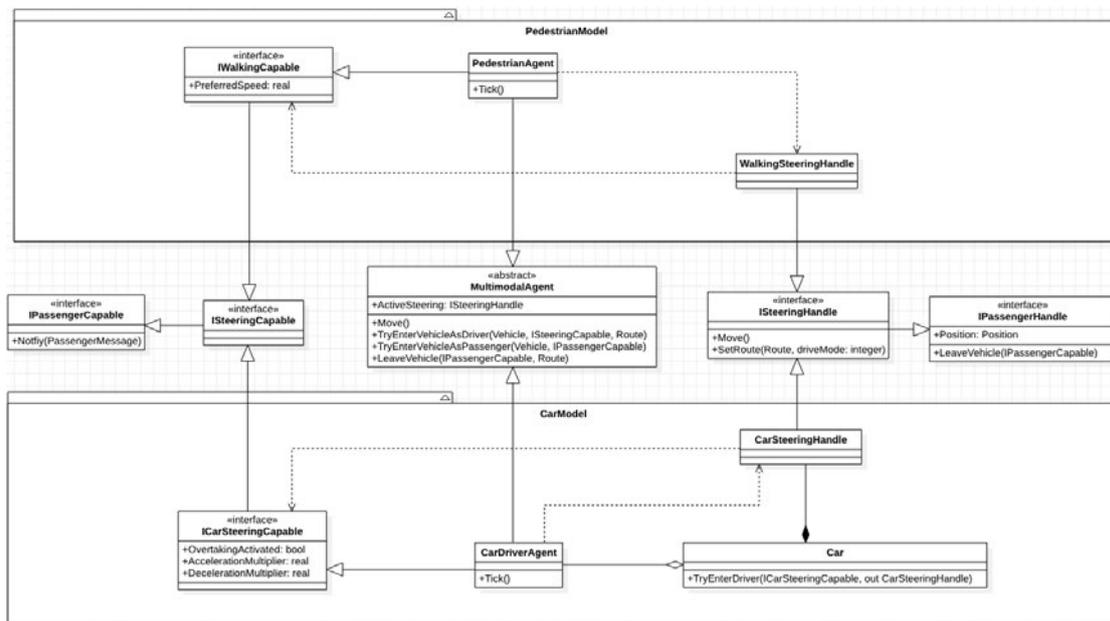


Abbildung 5.6: Multimodaler Agent mit Modellausprägungen: Fußgänger (oben) und Autofahrer (unten)

Umgebungswechsel

Hat der Agent nun das Handle erhalten, so wird er zum Fahrer. Der Multimodal-Agent stellt einen sauberen Wechsel zwischen den Environments her. Beim Ausstieg aus dem Fahrzeug wird der Fahrer wieder zum `Pedestrian`. Nun muss er wieder in das Fußgänger-Environment eingetragen und aus dem Fahrzeug entfernt werden.

Jedes Fortbewegungsmittel, welches als weitere Komponente in das multimodale Modell integriert werden soll, muss somit drei Anforderungen erfüllen. Es muss eine `ISteeringCapable`-Schnittstelle definieren, in der die Anforderungen an den Agenten aus der Perspektive des Verkehrsmittels beschrieben werden. Sodann muss eine räumliche Repräsentation des Fahrzeugs definiert werden, die sich womöglich auf dem SGE oder in einer anderen Struktur bewegt und dort dargestellt werden kann. Aus der Sicht des Agenten ist dabei vor allem wichtig, dass über die `TryEnter`-Schnittstelle ein Kontrakt mit diesem Fahrzeug ausgehandelt werden kann, welches dem Agenten zur Nutzung ein `ISteeringHandle` oder `IPassengerHandle` überlässt. Dieses *Handle* ist die dritte Anforderung, welche die Interaktionsmöglichkeit des Agenten mit dem Verkehrsmittel ermöglicht. Alle Fahrzeug-basierten Transportmittel sind somit in ihrer Grundstruktur hinsichtlich des Agentenentwurfs gleich. Einen Spezialfall bildet jedoch der Fußgänger.

5.2.3 Fußgängermodellierung

Ein `MultimodalAgent` braucht immer ein aktives *Handle*. In einem multimodalen Modell ist es naheliegend, Fußgänger als Standardbewegungsform mit weiteren Verkehrsmitteln zu kombinieren. Der Fußgänger braucht aber im Vergleich zu den Fahrzeugen keinen Kontrakt, er ist zu allererst Fußgänger und darf das auch immer wieder werden. Somit muss bei der Erzeugung des Agenten das `WalkingSteeringHandle` miterstellt werden um ein initiales Bewegungsverhalten zu ermöglichen. Auch das Fußgänger-Handle erwartet bestimmte Fähigkeiten vom Fußgänger, die durch die Implementierung des Gehens vorgegeben werden. Verbesserte Fußgängermodelle können durch simples Austauschen von *Handle* und *Capability* ein wirklichkeitsgetreueres Verhalten erzeugen. Die Implementierung der anderen Verkehrskomponenten bleibt davon unberührt, da die Plugin-Architektur dies von vornherein vorgesehen hat. Die für diese Arbeit implementierte Fußgänger-Komponente basiert grob auf der Arbeit von Löffler (2019). Der Fußgänger-Agent bewegt sich jedoch nur im SGE und hat eine einfache Geschwindigkeitsberechnung, die auf zwei Faktoren beruht. Zum einen auf der Wunschgeschwindigkeit des Agenten und zum anderen auf der Anzahl und Nähe der Passanten um den Fußgänger herum. Die grundsätzliche Wunschgeschwindigkeit bleibt für jeden Agenten über die Simulationsdauer konstant. Berechnet wird sie somit bei der Initialisierung auf Basis einer geschlechterspezifischen Normalverteilung nach Weidmann (1993). Somit gilt für männliche Fußgänger:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\text{gehen}} &= 1.41\text{m/s} * 0.193 = 0.27213\text{m/s} \\
 V_{\text{gehen}_{\text{min}}} &= 1.41\text{m/s} - 0.27213\text{m/s} = 1.13787\text{m/s} \\
 V_{\text{gehen}_{\text{max}}} &= 1.41\text{m/s} + 0.27213\text{m/s} = 1.68213\text{m/s}
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

und für weibliche Fußgänger:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{\text{gehen}} &= 1.27\text{m/s} * 0.193 = 0.24511\text{m/s} \\
 V_{\text{gehen}_{\text{min}}} &= 1.27\text{m/s} - 0.24511\text{m/s} = 1.02489\text{m/s} \\
 V_{\text{gehen}_{\text{max}}} &= 1.27\text{m/s} + 0.24511\text{m/s} = 1.51511\text{m/s}
 \end{aligned}
 \tag{5.2}$$

Dies entspricht bei weiblichen Fußgängern ein Spektrum zwischen gerundeter minimaler und maximaler Geschwindigkeit von $3,7\text{km/h}$ bis $5,5\text{km/h}$ und bei männlichen Fußgängern $4,1\text{km/h}$ bis $6,1\text{km/h}$. Eine Beschleunigung über die Wunschgeschwindigkeit hinaus ist in dem Modell nicht vorgesehen. Es kann jedoch zu Verlangsamung kommen insofern die Passantendichte zu groß wird. Über die Ausdehnung eines Körpers und die daraus resultierende Anzahl an Fußgängern pro Quadratmeter wird in Anlehnung an das *Level-of-Service* Konzept (*LOS*) von Weidmann (1993) die Personendichte bestimmt. Dieses kategorisiert Dichteintervalle für welche die Geschwindigkeit proportional reduziert wird. Im Modell wird also zunächst die Dichte des Fußgängers bestimmt, wobei die Anzahl der Fußgänger in einem vorgegebenen Abstand gezählt werden. Aus der Dichte an Fußgänger wird anschließend die prozentuale Geschwindigkeitsreduktion nach Einschränkungsklassen berechnet. Es gibt eine maximale Reduktion auf 12% der Ausgangsgeschwindigkeit, damit Agenten auch dem größten Gedränge irgendwann entkommen können. Die begrenzte Kapazität des Raumes spielt auch in Fahrzeugen eine Rolle.

5.2.4 Rolle als Beifahrer

Viele Verkehrsmittel sind für ein große Zahl an Beifahrern ausgelegt (Züge, Busse, Fähren). Um ein solches Gefährt benutzen zu können ist ein Kontrakt-Handle vonnöten. Dies ist vor allem dadurch notwendig, da beim Fahrzeug eine Kapazitätsprüfung durchgeführt werden muss. Weiterhin könnten beispielsweise gültige Fahrscheine notwendig sein, um das Transportmittel benutzen zu können. Agenten müssen auch hier eine Fähigkeit mitbringen, die des Informiert-werden-könnens. Die *IPassengerCapable*-Schnittstelle ermöglicht dem Agenten auf Ereignisse während der Fahrt zu reagieren. Bei jedem Halt

oder Ziel kann der Agent darüber informiert werden, damit dieser sodann gegebenenfalls reagieren kann.

5.2.5 Rolle als Fahrzeugführer

Die in den Grundlagen (Kapitel 2) vorgestellten Fahrzeugfolgemodelle bilden die Grundlage des Beschleunigungsverhaltens eines jeden Fahrzeugtypen. Dies wird sich in den Auswertungen der Geschwindigkeitsverläufe zeigen. Zunächst muss aber die architektonische Struktur einen Einsatz verschiedener Modelle für unterschiedliche Transportmittel erlauben. Die Steuerungskomponente des Fahrzeugs (`ISteeringHandle`), welche auch die Beschleunigung steuert, hat eine relativ abstrakte Schnittstelle (siehe Abbildung 5.7). Die Methode `Move()` kapselt alle fahrrelevanten Funktionalitäten. Wie können nun unterschiedliche Parametrisierungen der zugrundeliegenden Formeln oder Einflussmöglichkeiten des Agenten abgebildet werden? Dies geschieht über die Fähigkeiten des Agenten, welche für die Steuerung des Fahrzeugtyps notwendig sind. Jeder Fahrzeugführer eines bestimmten Typs (`ISteeringCapable`) kann die relevanten Funktionalitäten oder notwendigen Definitionen über diese Schnittstelle bereit stellen. So kann bspw. der Wunsch nach Überholmanöver in einem Automobil durch den Autofahrer signalisiert werden.

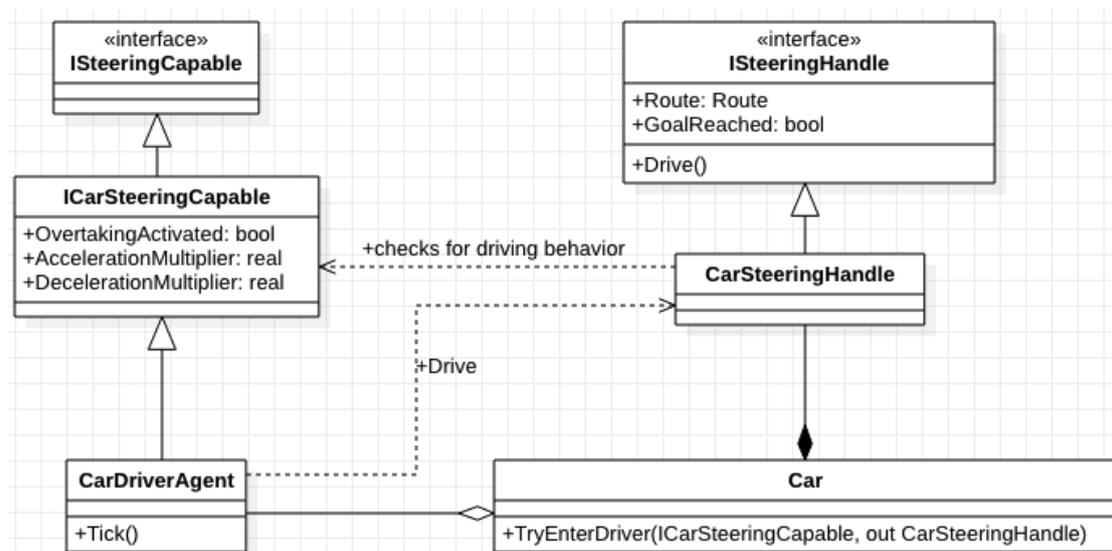


Abbildung 5.7: Steuerungsschnittstelle am Beispiel des Autofahrens

Radfahrender Agent

Die Verwendung des Fahrradmodells bedarf auch eine Parametrisierung des selbigen. Mulack (2020) definiert unterschiedliche Fahrradtypen (wie bspw. Trekking, Mountain oder City) sowie unterschiedliches Fahrverhalten (Aggressiv, Normal, Defensiv). Weitere Parameter, wie die Größe und das Gewicht von Rad und Fahrer können Einfluss auf Beschleunigung und Geschwindigkeit haben. In dieser Arbeit werden ausschließlich Leihräder des Typs City verwendet und den Fahrern ein normales Fahrverhalten zugeordnet. Weitere Einflussgrößen werden in Orientierung an den Standardeinstellung des Fahrradmodells gewählt und bleiben für alle Velofahrer konstant. Unterscheiden können sich die Radfahrer lediglich in dem Wert für die Leistung, welche im Durchschnitt 75 Watt beträgt aber im Rahmen einer Normalverteilung abweichen kann (Standardabweichung von 3 Watt).

5.2.6 Domänenmodell

Die in dieser Arbeit beschriebenen Fortbewegungsmittel sind Teil einer umfassenderen Hierarchie von Transportmitteln im Projekt SOH. Die Domäne wird in Abbildung 5.8 dargestellt und enthält auch andere, bereits angesprochene Verkehrsmittel. Diese sind jedoch allesamt Ausprägungen des `ISpatialGraphEntity` und somit auf einer Graphenstruktur angesiedelt. Von einem Graphen unabhängige Typen sind derzeit nicht vorgesehen. Das `Vehicle` bildet den Überbau für Automobil und Fahrrad. Über das `IVehicleEntrance` sind die Fahrzeugtypen nutzbar für den multimodalen Agenten. Dafür muss jedoch abhängig vom Modaltyp die entsprechende `ISteeringCapable`-Schnittstelle erfüllt werden. Der multimodale Agent erfüllt lediglich die Schnittstelle zum Mitfahren (`IPassengerCapable`). Die tatsächlichen Spezialisierungen des Agenten müssen also die jeweiligen Fahrereigenschaften ausbilden. Der `MultimodalAgent` hat aber noch eine eigenständige, räumliche Repräsentation, den `MultimodalRoadUser`, welcher den Agenten als Körper im Graphen repräsentiert. So sind Agent und Fahrzeuge Teile und Nutzer einer spatialen Organisationsstruktur, welche als Grundlage für die Ausgestaltung weiterer Transportmittel dienen soll.

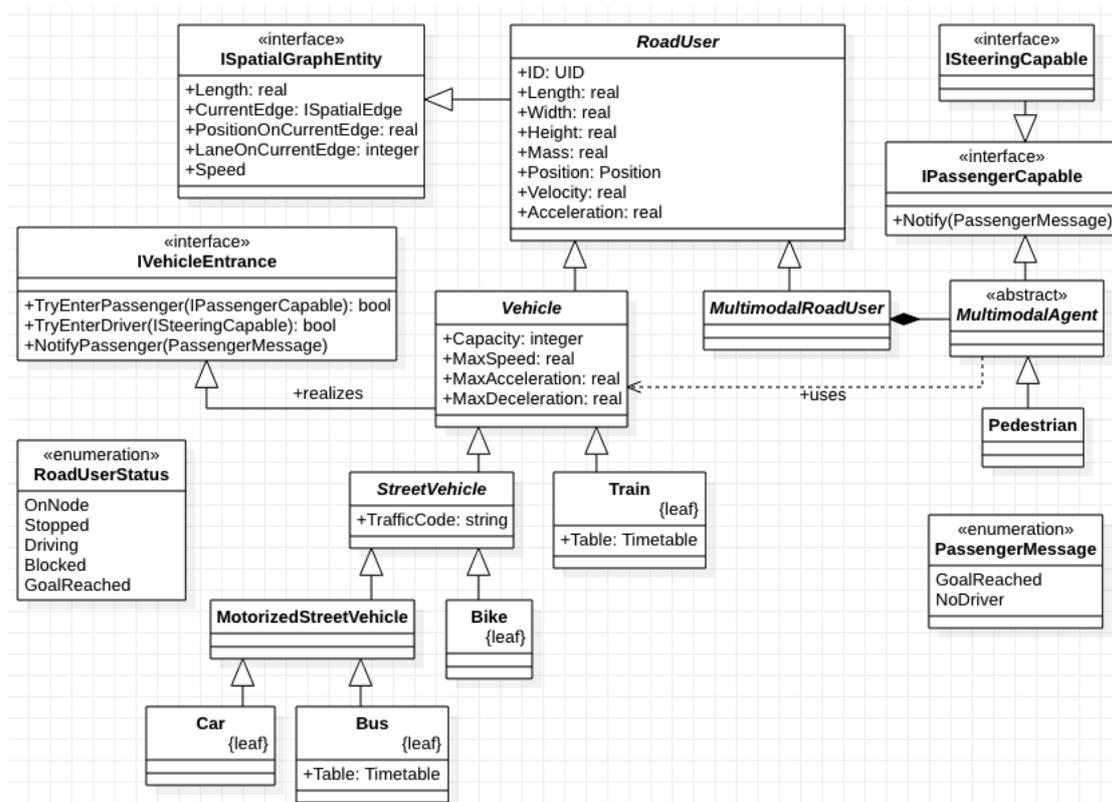


Abbildung 5.8: Domäne SOH im Zusammenhang mit dem MultimodalAgent

5.3 Verkehrsnachfragemodell durch Tagespläne

Agenten in Bewegungsmodellen bewegen sich auf Routen durch Zeit und Raum. Wie kommen sie zu diesen Plänen? Abhängig von dem jeweiligen Modell haben Agenten Ziele die sie erfüllen wollen. Diese können durch äußere und innere Einflüsse verändert werden. Sie nehmen wahr, planen und ändern auch ihr Verhalten. All dies können sie in jedem Tick tun. Zur Vereinfachung von Modellen schließt jeder Agent aber den Tick mit dem Bewegungsaufwurf des MultimodalAgent ab. Somit ist sichergestellt, dass ein Agent sich nicht mehrfach bewegt pro Tick, dies in dem jeweilig richtigen Rahmen seines aktuellen Transportmittels durchführt und die aktuelle Planung eine unmittelbare Berücksichtigung im äußeren Verhalten des Agenten, nämlich seiner Bewegung findet.

Bevor Agenten auf ihre unmittelbare Umgebung reagieren und bspw. ihre Transportmittelauswahl treffen, benötigen sie grundsätzliche Ziele. Löffler (2019) hat einen Tagesplan-Generator entwickelt, welcher basierend auf demographischen Daten und Statistiken dem

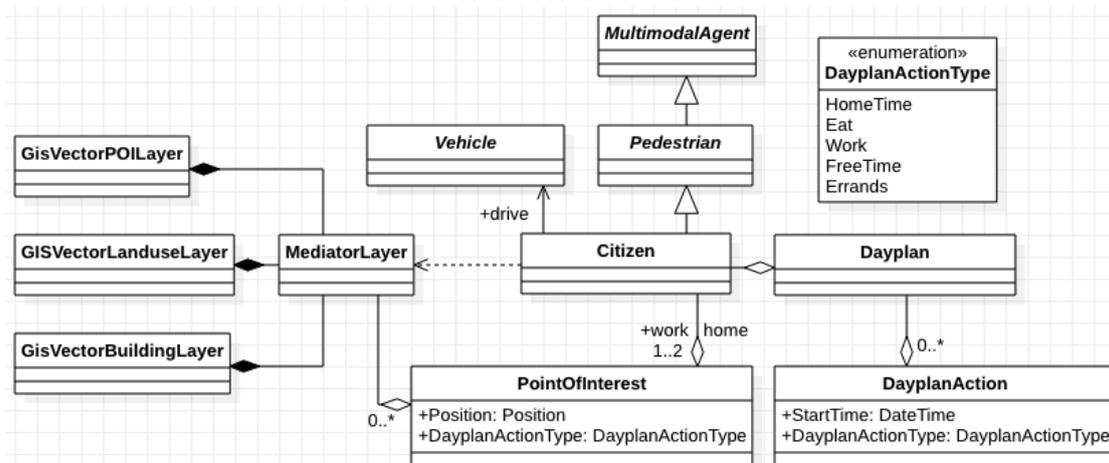


Abbildung 5.9: Tagesplan des Citizen-Agent angereichert um Positionen aus GISVectorLayern

Agenten in seiner spezifischen Ausprägung eine Liste von Plänen (Dayplan) für einen Kalendertag bereit stellt (siehe Abbildung 5.9). Werden die Ziele des Plans über Routen erreicht, so entstehen Verkehrsmuster, die einen typischen Tagesablauf eines Bürgers widerspiegeln. Werden die Verkehrsmuster von vielen Agenten kombiniert, dann entsteht so etwas wie Stadtverkehr. Um den Verkehr in Altona zu simulieren werden also die Verkehrsmuster aller integrierten Agenten dargestellt. Dabei können diese aber nur Ziele innerhalb des Szenarienbereichs finden. Die Agenten verlassen das Gebiet demnach nicht. Was gibt es nun für Aktivitäten (DayplanAction), die als Ziele für den Agenten dienen? Zunächst verbringt jeder Agent Zeit zu Hause. Darüber hinaus gehen Berufstätige zur Arbeit und pendeln anschließend wieder zurück. Alle Bevölkerungsgruppen haben dazu noch die Aktivitätsgruppen (DayplanActionType): Essen gehen, Besorgungen erledigen und Freizeitangebote wahrnehmen. Welche Aktivitäten den Agenten zugeordnet werden, wird auf Basis der Studie *Mobilität in Deutschland* (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2018) getroffen. Im Rahmen dieser Studie wird ein Online-Tool zur Verfügung gestellt, welches unter anderem auch die gesuchten Verkehrsmuster enthält (siehe Abbildung 5.10).

Die Spalten definieren Kategorien von Aktivitäten und die Zeilen verknüpfen diese mit Zeitfenstern in denen diese Aktivitäten stattfinden. Bei Betrachtung der Daten sieht man bspw., dass in den früheren Stunden zwischen 5 und 8 Uhr morgen 60% aller Wege

⁵Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018) stellt Daten zur Verfügung unter <https://www.mobilitaet-in-tabellen.de/>

5 Konzeption und Implementierung

Basis: Wege (Deutschland)

Spalten % (gewichtet)	Total	Wegzweck mit nach Hause und Rückweg										
		Erreichen des Arbeitsplatzes	dienstlich/geschäftlich	Erreichen der Ausbildungsstätte/Schule	Einkauf	private Erledigung	Singen/Hören/Begleiten von Personen	Freizeitaktivität	nach Hause	Rückweg vom vorherigen Weg	anderer Zweck	keine Angabe
Basis ungewichtet	900.162	78.002	21.279	27.862	101.482	90.844	43.433	160.821	331.262	14.171	23.392	2.594
Basis gewichtet	681.803	80.352	20.208	35.107	94.034	84.159	49.949	153.546	326.841	12.793	22.125	2.389
Erwerbssitzung gruppiert												
frühmorgens (5 bis vor 8 Uhr)	11 %	66 %	17 %	68 %	4 %	4 %	13 %	3 %	2 %	3 %	9 %	5 %
morgens (8 bis vor 10 Uhr)	12 %	19 %	22 %	20 %	21 %	19 %	15 %	5 %	9 %	18 %	15 %	15 %
vormittags (10 bis vor 13 Uhr)	20 %	7 %	27 %	5 %	31 %	28 %	17 %	20 %	19 %	31 %	23 %	19 %
mittags (13 bis vor 16 Uhr)	23 %	7 %	21 %	5 %	21 %	25 %	28 %	27 %	24 %	32 %	23 %	21 %
nachmittags (16 bis vor 19 Uhr)	22 %	2 %	10 %	2 %	28 %	19 %	21 %	27 %	32 %	19 %	20 %	20 %
abends (19 bis vor 22 Uhr)	8 %	1 %	2 %	0 %	3 %	4 %	5 %	11 %	13 %	4 %	6 %	7 %
nachts (22 bis vor 5 Uhr)	3 %	3 %	2 %	0 %	0 %	1 %	1 %	2 %	5 %	2 %	1 %	2 %
keine Angabe	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	10 %
Total	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Abbildung 5.10: Wegzwecke in Abhängigkeit zur Uhrzeit der befragten Personen aus der Studie *Mobilität in Deutschland*⁵

zur Arbeit angetreten werden, während im selben Zeitraum nur 3% der Freizeitaktivitäten stattfinden. Die Spalten sind voneinander unabhängig und untergliedern sich in ihrer jeweiligen Kategorie prozentual auf die Zeiträume. Mit Hilfe dieser Daten können die Startzeiten der Aktivitäten kalkuliert werden. Individuelle Faktoren wie Geschlecht, Berufstätigkeit, Wohnsitz und die Verfügbarkeit von Transportmitteln, hier der Besitz eines Automobils, werden im nächsten Schritt integriert. Erwerbstätigkeit ist einer der Hauptfaktoren für Verkehrsmuster, da diese für Vollzeitbeschäftigte und Teilzeitangestellte stark von denjenigen abweichen, die keiner Arbeit nachgehen oder von zu Hause arbeiten. Diese drei Kategorien (vollzeit, teilzeit, arbeitslos) werden mit demographischen Daten verknüpft um die virtuelle Population des Gebiets dazustellen. Diese Daten werden aus dem *Statistischem Jahrbuch Hamburg* entnommen, einem jährlich erscheinendem Bericht über demographische Entwicklungen und der sozio-ökonomischen Struktur in Hamburg (Statistikamt Nord, 2018). Aus dieser Quelle und von Statista (2018) werden die Verteilung der Beschäftigungsverhältnisse über die Agenten berechnet und diese werden einer der drei oben genannten Kategorien zugeordnet⁶. Abhängig vom Arbeitsstatus wird nun die Kette von weiteren Tagesaktivitäten erzeugt. Jede Aktion bekommt eine Startzeit, so dass der Agent für eine angemessene Zeit am Zielort verbleibt bevor der Weg zur nächsten Aktivität begonnen wird (Löffler, 2019).

Sind nun Ziele (`PointOfInterest`) und Startzeiten (in `DayplanAction`) für einen Agenten geklärt, so müssen die Wege dahin gefunden werden. Das Zu-Fuß-Gehen steht jedem Agenten immer zur Verfügung. Abhängig von der Szenariodefinition können Agenten auch Fahrräder entleihen und diese als Teil des Weges nutzen. Ein Entleihsystem ist für die Automobile nicht implementiert. Dort wird mit einer festen Zuordnung von Auto zu Agent gearbeitet. In Altona gibt es laut Statistisches Amt für Hamburg und

⁶Dafür wird folgende Verteilung angenommen: 6% Nicht-Erwerbstätige zu 94% Erwerbstätige, die sich in 73% Voll- und 27% Teilzeitbeschäftigte aufgliedern

Schleswig-Holstein 326 Autos pro 1000 Einwohner ⁷. Somit wird in diesem Modell davon ausgegangen, dass für eine Tagesplanausführung jedem dritten Agent ein Automobil zur Verfügung steht, insofern dies durch die Szenariobeschreibung aktiviert wird.

⁷<http://region.statistik-nord.de/compare/show/2/1590929011>

6 Ergebnisse

Dieses Kapitel sammelt und beschreibt die Ergebnisse der Experimente, die für die Untersuchung der Hypothesen vorgestellt wurden. Die Diskussion und eine damit einhergehende Bewertung der Ergebnisse folgt im nächsten Kapitel.

6.1 Ergebnisse für Hypothese 1

Die Experimente der ersten Hypothese zielen darauf ab, das vorgestellte Modell hinsichtlich seiner Gültigkeit und damit Einsetzbarkeit im Kontext der urbanen, mikroskopischen Verkehrssimulation zu überprüfen. Dafür werden die verschiedenen Modalitäten zunächst in ihrer eigenen Validität geprüft. Anschließend werden verkettete Wege und Interaktion untersucht.

6.1.1 Ergebnisse der Modellintegration

Die Experimente zur Modellintegration untersuchen die Verkehrsmittel in ihrer eigenständigen Ausführbarkeit. Zunächst wird das Fußgängermodell betrachtet, anschließend das Automodell und schließlich das Fahrradmodell.

Experiment: Modellintegration Fußgänger

Zuerst wird untersucht, ob eine Variation von bevorzugten Gehgeschwindigkeiten bei der Initialisierung der Fußgänger generiert wird und ob diese in einem sinnvollen Spektrum liegt sowie sich nach Geschlechtern unterscheidet. Abbildung 6.1 veranschaulicht die Varianz bei einer Testgröße von $n = 1000$ Agenten. Die Unterschiede zwischen männlichen (`male`) und weiblichen (`female`) Fußgängern sind zu erkennen, sowohl hinsichtlich der minimalen (3,8 zu 4,1), der maximalen (5,4 zu 6,1) und der durchschnittlichen Wunschgeschwindigkeit (4,6 zu 5,1) aller Agenten (je weiblich zu männlich; Werte in km/h).

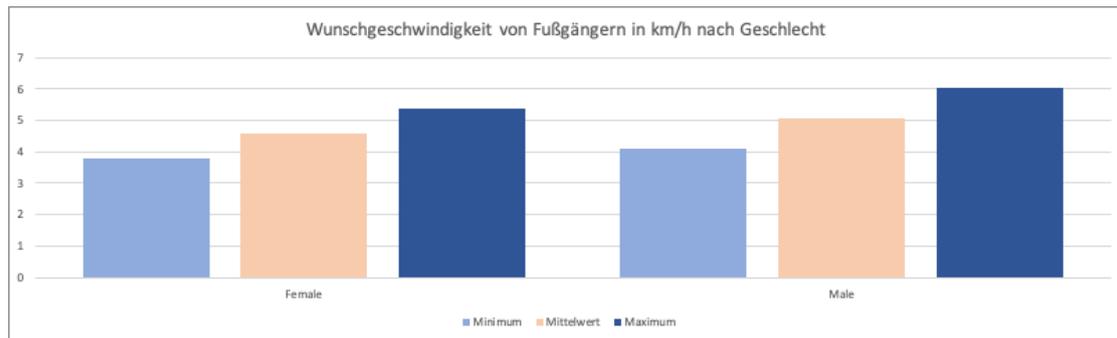


Abbildung 6.1: Wunschgeschwindigkeit (in km/h) von Fußgängern nach Geschlecht

Der zweite Teil des Experiments betrifft den Einfluss von Passanten auf die aktuelle Geschwindigkeit des Fußgängers. Dazu wurden zwei Testreihen in der selben Umgebung (siehe Abbildung 4.4) durchgeführt. Im ersten Durchgang hat ein einzelner Fußgänger eine zufällige Strecke beschritten, im zweiten Durchgang kamen dann weitere 500 Passanten dazu, die ebenfalls zufällige Wege in der Umgebung abschreiten. Abbildung 6.2 verdeutlicht, dass im ersten Durchgang nahezu durchgängig die Wunschgeschwindigkeit gehalten werden kann. Der zweite Graph zeigt eine erhebliche Reduzierung der Geschwindigkeit für über eine Minute bevor die Geschwindigkeit schrittweise steigt und gegen Ende fast die Wunschgeschwindigkeit erreicht. Dabei ist zu beachten, dass zu Beginn des Szenarios eine Vielzahl von Agenten am selben Knoten starten. Dies erklärt die niedrige Anfangsgeschwindigkeit, da die Passanten sich erst nach und nach auflösen und über das Straßennetz verteilen.

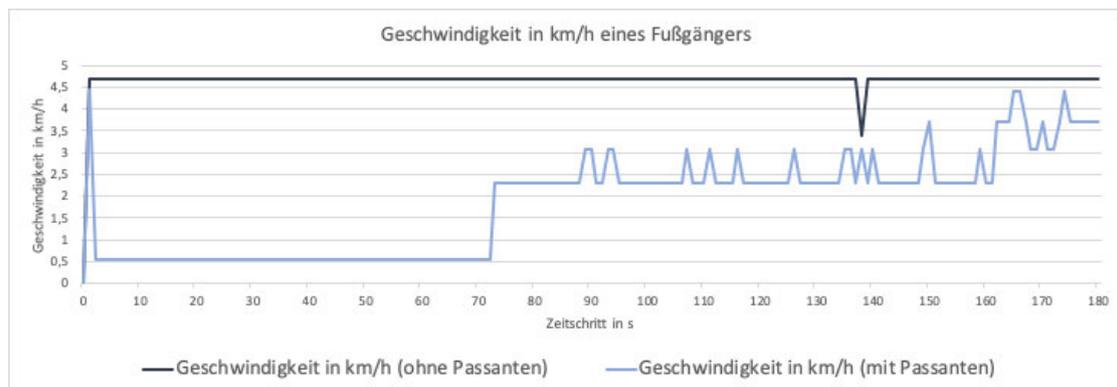


Abbildung 6.2: Geschwindigkeit (in km/h) eines Fußgängers mit und ohne weitere Passanten

Experiment: Modellintegration Autofahrer

Um den Auto-Agenten in die multimodale Agentenarchitektur zur überführen, musste der Agent in den Teil der räumlichen Repräsentation und der Fahrlogik unterteilt werden. Die Modularisierung ist in Abbildung 6.3 dargestellt und zeigt im `CarModel`-Modul drei Klassen. Die Klasse `Car` bildet die räumliche Repräsentation der Fahrzeugs im Raum ab. Sie beschreibt die räumlichen Dimensionen und weitere fahrphysikalische Eigenschaften des Gefährts. Der `CarDriverAgent` ist der spezielle Agent, welcher immer in einem ihm fest zugewiesenen Fahrzeug sitzt und dieses über die dritte Klasse, dem `CarSteeringHandle`, steuert. Das Steuerungsmodul hält die vollständige Steuerungslogik, welche aber durch den Agenten durch seine Fähigkeiten beeinflusst werden kann.

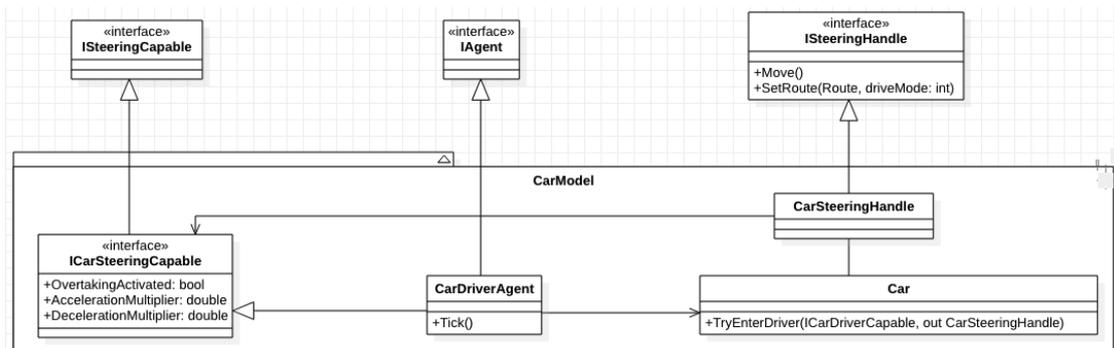


Abbildung 6.3: Klassenmodell des integrierten Auto-Agenten

Der Agent bleibt in seiner programmseitigen Definition (Konstruktorensignatur) bestehen und initialisiert dann sowohl `Car` als auch `CarSteeringHandle`. Lediglich die Benennung des Agenten hat sich verändert, so dass dies in den jeweiligen Modellbeschreibungen angepasst werden muss. Dieser spezielle Agent ist kein multimodaler Agent, das Wechseln zwischen verschiedenen Modaltypen kann der Agent also nicht vollführen sondern er ist einzig auf das Autofahren beschränkt.

Anhand von der zufällig gewähltem Strecke (siehe Abbildung 4.5) wird geprüft, ob ein `CarDriver` mittels Routensuche das Ziel erreicht und dabei erwartbares Verhalten zeigt. Diagramm 6.4 zeigt die während dieser Strecke auftretenden Geschwindigkeiten des Autos. Diese schwanken aufgrund vieler Kreuzungssituation stark. Es gibt Zeiträume in denen das Fahrzeug sich nicht bewegt. Die auftretenden Wartezeiten werden durch Ampelkreuzungen verursacht. Die Höchstgeschwindigkeit nähert sich mehrfach dem allgemeinen innerstädtischen Tempolimit von 50km/h an. Die Durchschnittsgeschwindigkeit liegt bei $18,4\text{km/h}$. Die Routenlänge beträgt $11,211\text{km}$ und wurde in einer Zeit von $36:30$ Minuten durchfahren. Der Vergleichswert einer statisch berechneten Fahrzeit auf

OSM liegt deutlich niedriger bei 23 Minuten¹. Die dort nicht vorhandenen Ampelzeiten sind jedoch bei der Bewertung mit einzubeziehen.



Abbildung 6.4: Geschwindigkeitsveränderung eines Automobils von Mörkenstraße 47 bis Sülldorfer Kirchenweg 225, mit Ampelstops

Schließlich werden die Experimente von Weyl als Unit-Tests durchgeführt. Diese bestätigen weiterhin das erwartete Verhalten, welches durch den Autor beschrieben wurde.

Experiment: Modellintegration Radfahrer

Für die Überprüfung des Radfahrermodell wird die selbe Strecke (s.o.) als Testzenario ausgewählt. Es wird untersucht ob ein Radfahrer mittels Routensuche, das Ziel erreicht und dabei erwartbares Verhalten zeigt. Diagramm 6.5 zeigt die während dieser Strecke auftretenden Geschwindigkeiten des Fahrrads. Diese haben wie beim Automobil aufgrund vieler Kreuzungssituation keine signifikante Schwankung. Es gibt Zeiträume in denen das Fahrzeug sich nicht bewegt. Dies ist wiederum durch Ampelkreuzungen mit den einhergehenden Wartezeiten zu begründen. Die Höchstgeschwindigkeit übersteigt phasenweise eine Geschwindigkeit von 25km/h . Die Durchschnittsgeschwindigkeit liegt bei $12,7\text{km/h}$. Die Routenlänge verbleibt bei $11,211\text{km}$ und wurde in einer Zeit von $52:02$ Minuten durchfahren. Der Vergleichswert einer statisch berechneten Fahrzeit auf OSM liegt leicht schneller bei 46 Minuten². Die dort nicht vorhandenen Ampelzeiten sind jedoch wieder bei der Bewertung mit einzubeziehen.

¹https://www.openstreetmap.org/directions?engine=graphhopper_car&route=53.5491%2C9.9437%3B53.5830%2C9.7943#map=13/53.5644/9.8693

²https://www.openstreetmap.org/directions?engine=graphhopper_bicycle&route=53.5491%2C9.9437%3B53.5830%2C9.7943#map=13/53.5653/9.8693

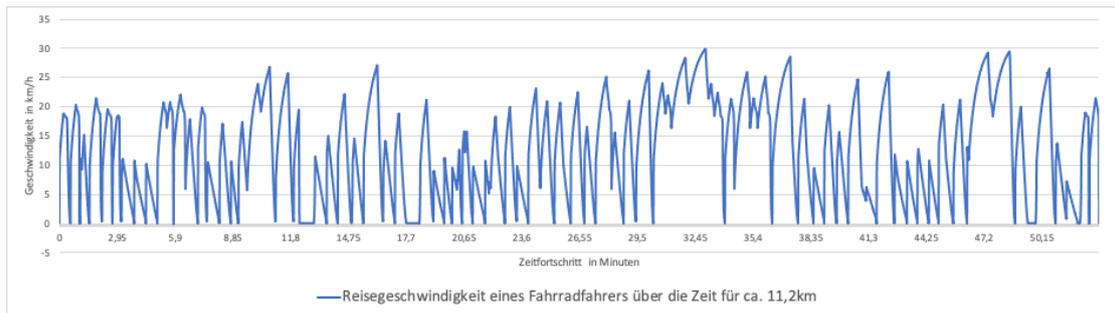


Abbildung 6.5: Geschwindigkeitsveränderung eines Radfahrers von Mörkenstraße 47 bis Sülldorfer Kirchenweg 225, mit Ampelstops

6.1.2 Ergebnisse der Intermodalität

Die Ergebnisse der Intermodalität dienen zur Überprüfung einer sinnvollen, multimodalen Routensuche sowie der sauberen Verwendung eben dieser mittels Transportmittelwechsel.

Experiment: Multimodale Routensuche

Zunächst wird geprüft, ob für die unterschiedlichen Fähigkeiten (*Capabilities*) auch die richtigen Routen bereit gestellt werden insofern diese verfügbar sind. Der genutzte Testgraph hält an den beiden Zwischenknoten Umsteigepunkte bereit. Dies ist für den reinen Fußgänger nicht bedeutsam, da er die volle Strecke zu Fuß geht (siehe Abbildung 6.6).

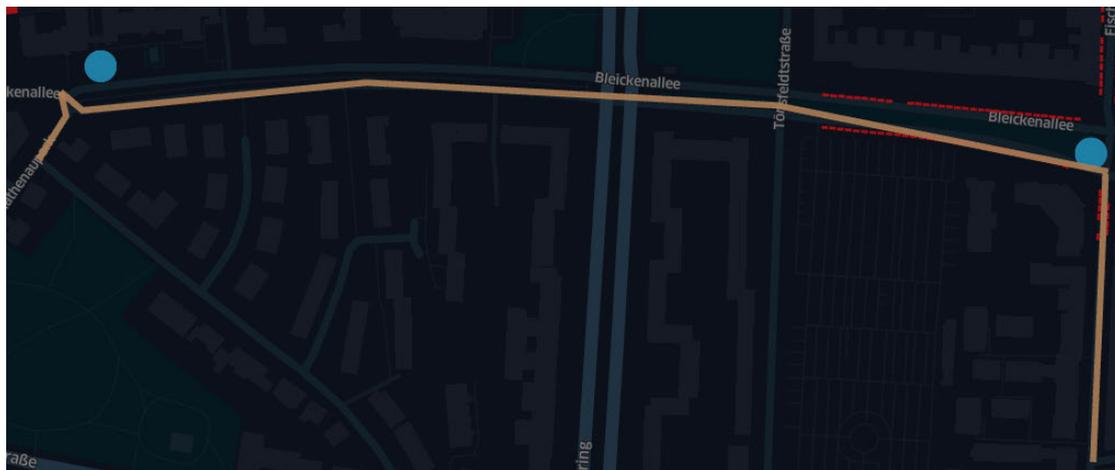


Abbildung 6.6: Route von Knoten 1 (süd-ost) zu 4 (west) als reiner Fußweg

Der Autofahrer kann sein in der Nähe von Knoten 2 abgestelltes Fahrzeug nutzen und auf einer Parkfläche nahe Knoten 3 parken. Da ein Modalwechsel in der jetzigen Version nur auf Knoten vollzogen werden kann, ist die Route für den Autofahrer intermodal gestaltet. Es gibt einen Fußweg von Knoten 1 zu Knoten 2. Dort kann in das Fahrzeug gewechselt werden. Von Knoten 2 zu Knoten 3 ist die Strecke mit der Automodalität zu befahren. An Knoten 3 kann das Fahrzeug abgestellt werden und anschließend zu Knoten 4 die Gesamtroute durch einen Fußweg beendet werden. Es gibt in dieser multimodalen Route also drei Teilrouten: Fußweg→Autoweg→Fußweg (siehe Abbildung 6.7).

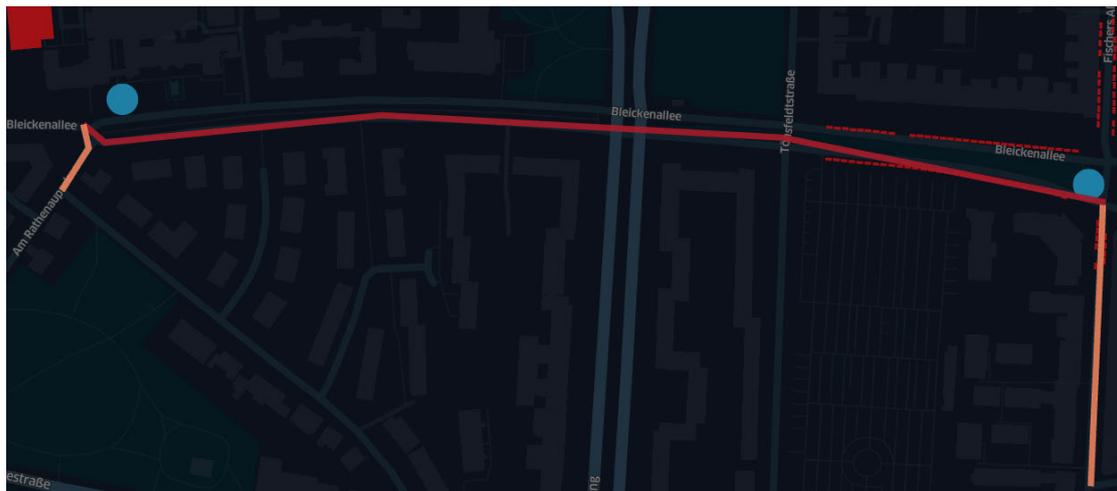


Abbildung 6.7: Route von Knoten 1 (süd-ost) zu 4 (west) als kombinierter Fuß- und Autoweg (beige und rot)

Der Fahrradfahrer hat an Knoten zwei und drei jeweils Leihstationen. Somit ähnelt sich die multimodale Route dem eben vorgestellten Autoszenario. Die intermodale Route ist in Abbildung 6.8 dargestellt.

Das beschriebene Verhalten muss selbstverständlich für beliebige Start und Zielpunkte auf beliebigen Straßennetzen möglich sein. Diese Überprüfung wurde im Gesamtgebiet Altona durchgeführt. Dazu wurden 1000 beliebige Start- und Zielpunkte gewählt um entsprechende Routen zu finden. Bei Verfügbarkeit verschiedener Transportmittel wurden die Routen hinsichtlich der kürzesten Reisezeit gewählt. Abbildung 6.9 zeigt, dass Fußwege bis zu einer durchschnittlichen Weglänge von 1100 Metern gefunden werden. Automobil und Fahrrad unterscheiden sich im Durchschnitt um ca. 1 km (6200m zu 5200m). Schaut man jedoch auf die Anzahl der Routen, so wurde hauptsächlich das Automobil gewählt (über 830 Routen), gefolgt vom Fahrrad (mit knapp 150 Routen) und dem Fußgänger (knapp 20 Routen). Die Anzahl der Wegeketten beschreibt den Umstand,

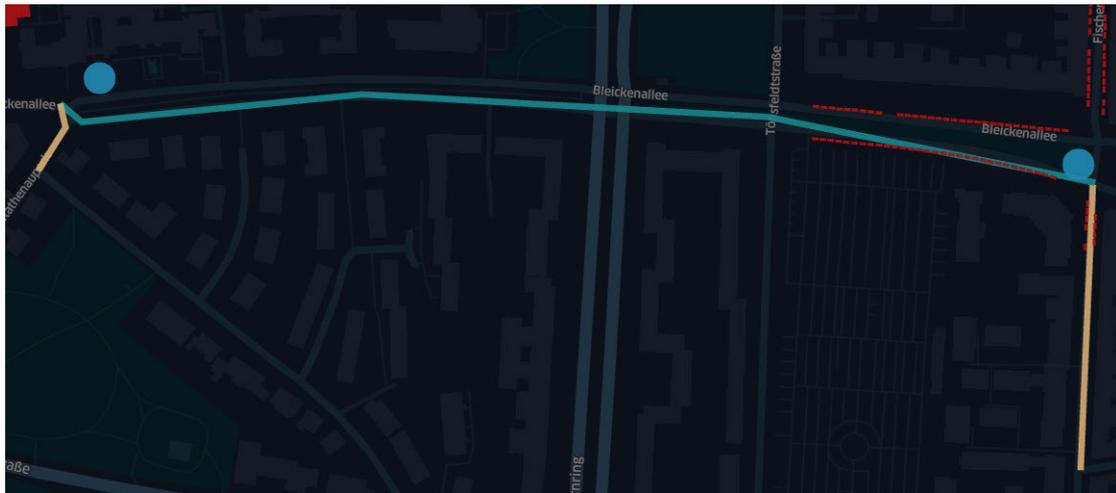


Abbildung 6.8: Route von Knoten 1 (süd-ost) zu 4 (west) als kombinierter Fuß- und Fahrradweg (beige und blau)

dass ein Umsteigepunkte zugleich das gewünschte Ziel ist. Dann wird nach dem Parken des Fahrzeugs kein weiterer Fußweg beschritten, da das Ziel erreicht ist. Somit kann die Wegekette kürzer als im oben beschriebenen intermodalen Standardfall sein (Fußweg → Auto/Fahrrad → Fußweg).

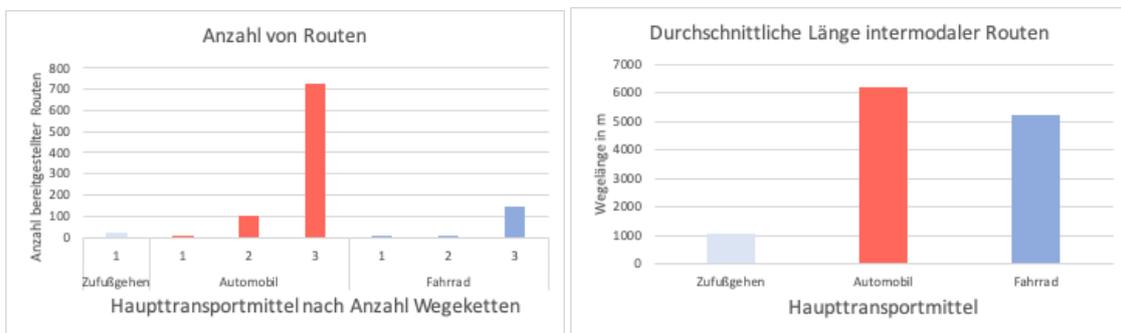


Abbildung 6.9: Anzahl bereitgestellter Routen nach Modaltyp und Anzahl Wegeketten, sowie durchschnittliche Länge intermodaler Routen nach Verkehrsmittel

Die Multimodalroute kann sich aber auch verlängern und zwar wenn kein freier Parkplatz am Umsteigeknoten gefunden werden kann. Dann wird von diesem Punkt aus der nächste freie Parkplatz gesucht und die Route wird um eine weitere Autoroute zum nächsten Parkplatzknoten ergänzt. Abbildung 6.10 stellt eine solche Situation dar, die Abbildungen veranschaulichen die Veränderung der Multimodalroute über die Zeit. Die linke Abbildung zeigt die anfängliche Route vom Start zum Ursprungsparkplatz (nord-

west) zum Zielparkplatz (einer der Einzelparkplätze, west) und dann zum Ziel. Wird die intermodale Route nun um eine Umleitung (*reroute*) ergänzt, so wird sie (im vorliegenden Beispiel) um eine Autofahrt zurück zum Ursprungsparkplatz erweitert (mittlere Abbildung). Der Fußweg, welcher vom ursprünglichen Zielparkplatz zum Zielpunkt geführt hätte, wird ersetzt um einen neuen Fußweg, welcher vom tatsächlich Abstellparkplatz zum Ziel führt (Abb. rechts).



Abbildung 6.10: Intermodale Route mit Umweg (Start im Westen, Ziel im Südosten), Links: ursprüngliche, intermodale Autoroute, Mitte: Rückweg zu ursprünglichem Parkplatz mit Auto, Rechts: Restweg zum Ziel zu Fuß

Experiment: Autofahren mit Parken

Abbildung 6.11 zeigt eine multimodale Route, die aus drei Teilrouten besteht. Diese wird als teiltransparente breite Linie dargestellt. Das Haupttransportmittel ist das Automobil (rote Linie), welches von zwei Fußwegen als Zu- und Abweg (beige Linien) flankiert wird. Zudem sind die Positionen des Agenten über die Zeit durch Punkte beschrieben. Sie folgen nicht ganz der Route, da die Geopositionen zwischen den Knoten durch das MARS Framework interpoliert werden. Die Abstände sowie die Größe der Punkte verweisen auf eine höhere Geschwindigkeit des Automobils im Vergleich zu den Fußwegen.

Dieser Versuch wird jeweils auch mit Start- und Endpunkten an den Umsteigepunkten durchgeführt, so dass eine Route direkt mit dem Autofahren beginnt oder endet, wenn der Agent schon am Knoten, der den Zustieg (respektive Ausstieg) darstellt, im Graphen startet (oder endet). Diagramm 6.12 zeigt dabei die typischen Beschleunigungs- und Abbremsphasen des Automobils mit einer zwischenzeitlichen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Die Zu- und Abbringerwege werden in Gehgeschwindigkeit absolviert.

Die Parkplatzsuche hängt nur bedingt mit der Routensuche zusammen. Es werden zwar Routen zu freien Parkplätzen gesucht, wenn diese aber in der Zwischenzeit belegt wurden, so kann am Zielknoten auch ein beliebiger anderer Parkplatz gewählt werden. Problematisch wird es wenn in der Nähe des Knoten keine freien Parkplätze mehr zur Verfügung stehen. In einem solchen Fall muss die multimodale Route erweitert werden um einen Umweg zu einem neuen Knoten, der einen freien Parkplatz bereit stellt. Dies kann sich

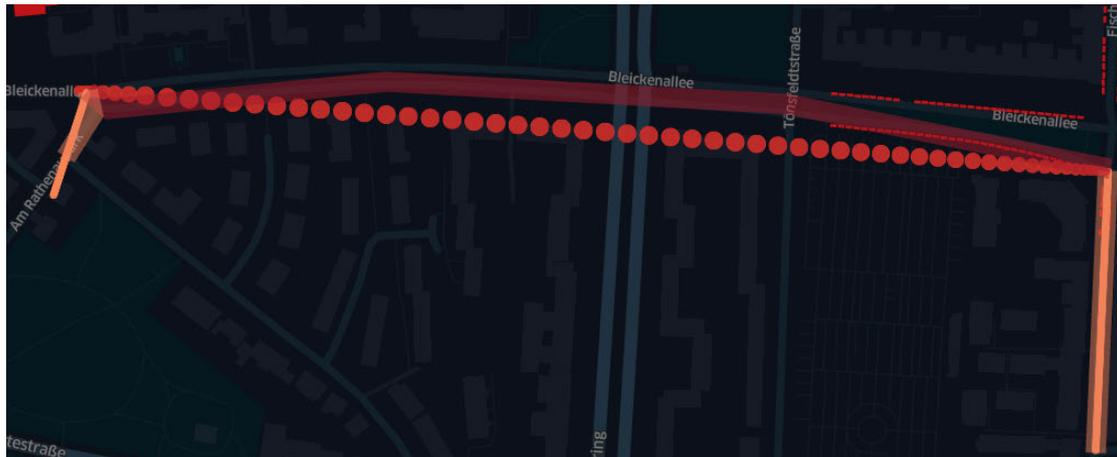


Abbildung 6.11: Intermodale Route (Gehen, Fahren, Gehen; Linien) und Fahrt d. Agenten (Punkte; Größe u. Abstände der Punkte korrelieren mit Geschw.)

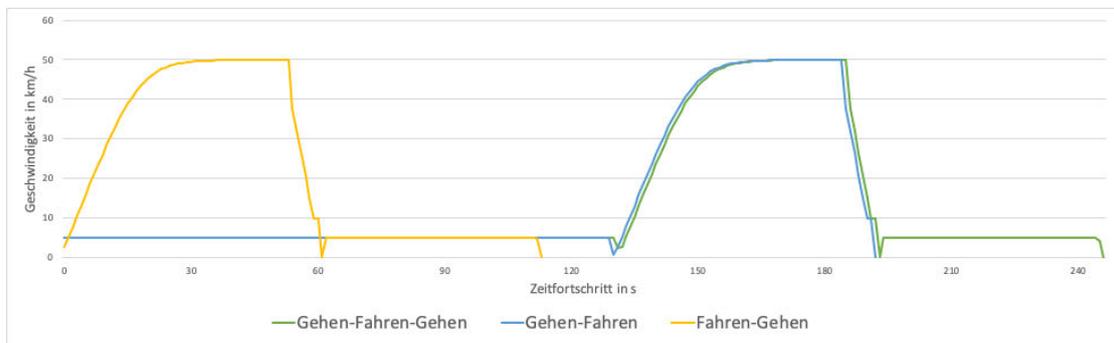


Abbildung 6.12: Abfahren von drei intermodalen Routen mit Hauptverkehrsmittel Automobil im Geschwindigkeitsverlauf über die Zeit

ggfs. beliebig wiederholen. Exemplarisch wurde diese Situation in Abbildung 6.13 in chronologischer Reihenfolge (von links oben nach rechts unten) veranschaulicht. Es wird hier die in Abb. 6.10 vorgestellte umgeleitete Multimodalroute abgefahren und zu vier verschiedenen Zeitpunkten visualisiert.

Der Agent geht zum Parkplatz auf dem sein Auto steht (nordwest), steigt dort ein und fährt zum Zielparkplatz, der sich im Westen befindet. In der Zwischenzeit ist dieser so wie alle umliegenden Parkplätze belegt worden, so dass eine Umplanung stattfinden muss. Der nächste freie Parkplatz ist unglücklicherweise der Ursprungsparkplatz. Im zweiten Bild (oben rechts) fährt der Agent also wieder dahin zurück. Dort kann geparkt werden und die Reststrecke zu Fuß absolviert werden (beide Bilder unten).



Abbildung 6.13: Intermodale Route Fußgänger-Auto mit Umweg durch Parkplatzzuche. Links oben: Start zu Fuß, Umstieg ins Auto. Oben rechts: Rückweg mit Auto zu ursprünglichem Parkplatz mit freier Parkfläche. Unten: Zielerreichung zu Fuß von abgestelltem Parkplatz ausgehend

Experiment: Radfahren mittels Leihstationen

Abbildung 6.14 zeigt, analog zur gleichen Versuchsreihe der Automobile, den Geschwindigkeitsverlauf von Fahrrädern und den intermodalen Anteil des Fußwegs als Zu- bzw. Abbringer auf der Teststrecke Bleikenallee. Die Fahrradfahrer halten beim zu Fuß gehen ihre konstante Wunschgeschwindigkeit bevor sie auf das Rad wechseln und dort eine Höchstgeschwindigkeit von über 45 km/h erzielen. An der nächsten Leihstation angekommen bremsen sie relativ stark ab und laufen ggf. die Reststrecke wieder in Fußgängergeschwindigkeit ab.

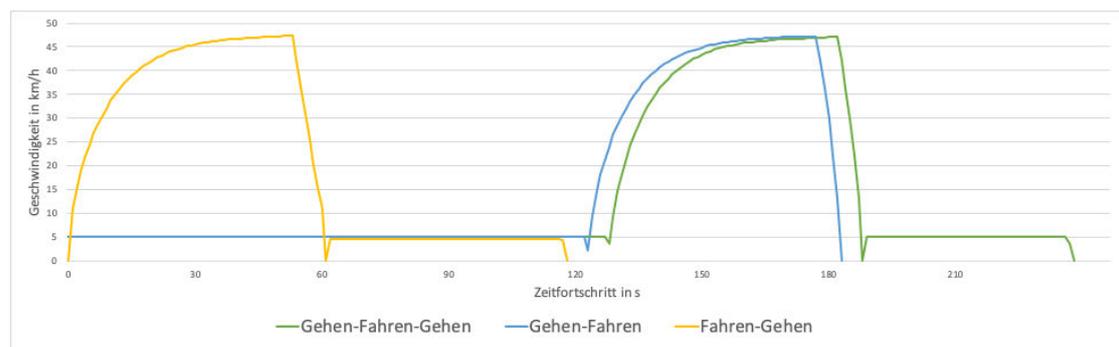


Abbildung 6.14: Abfahren von drei intermodalen Routen mit Hauptverkehrsmittel Fahrrad im Geschwindigkeitsverlauf über die Zeit

Ein gleichartiger Versuch ist in Abbildung 6.15 dargestellt, mit dem Unterschied, dass eine zufällige Route im Stadtteil Altona-Altstadt gewählt wurde. Zu sehen sind zum Einen



Abbildung 6.15: Zufällige Route in Altona-Altstadt mit Hauptverkehrsmittel Fahrrad im Geschwindigkeitsverlauf über die Zeit

die Geschwindigkeit über die Zeit (obere Teilabbildung). Auch in diesem Fall gibt es Zu- und Abwege als Fußgänger, welche in gleichbleibender Geschwindigkeit durchschritten werden. Die Geschwindigkeit während des Fahrradfahrens variiert hingegen deutlich, was durch die unterschiedliche Topologie des Graphen verursacht wird, im wesentlichen durch Kreuzungen. Der Geschwindigkeitsverlauf lässt sich zum Anderen auch in der geographischen Darstellung (untere Teilabbildung) durch die Dicke und Abstände der eingezeichneten Geopunkte erkennen. Die unterschiedlichen Modaltypen sind farblich gekennzeichnet (hellblau für Fahrrad, beige für zu Fuß). Es ist darüber hinaus zu erkennen, dass der Agent zunächst am Ziel (südöstliche Ecke) vorbei fährt um das Fahrrad an der Leihstation zurück zu geben, bevor ein Teil der Strecke wieder zu Fuß zurück gelaufen wird.

Ein dritter Versuch mit 200 Agenten im Teilgebiet Altona-Altstadt lässt diese von zufälligen Startpunkten zu zufälligen Zielen unter Benutzung von Rädern fahren. Der Versuch lässt sich wiederholt erfolgreich durchführen und prüft dabei, dass alle Agenten ihr Ziel

erreichen, auf dem Weg ein Fahrrad benutzen und bei Zielerreichung sich sauber aus allen Graphen entfernt haben.

6.1.3 Ergebnisse zum Reisezeitvorteil

Der Reisezeitvorteil wird untersucht durch den Vergleich einer statischen Isochronenanalyse für Fußgänger mit der gerichteten Reichweite von Automobil und Fahrrad durch Simulation. Abbildung 6.16 zeigt die Resultate aufgeteilt nach Auto (oben) und Fahrrad (unten). Es wurde der selbe Kartenausschnitt gewählt um eine Vergleichbarkeit zwischen Auto und Fahrrad herstellen zu können. Die Karten zeigen für verschiedene Zeitintervalle die Reichweite der Verkehrsmittel in unterschiedlichen Farbtönen. Die Kreise beginnen wie zu erwarten mit kurzem Zeitintervall innen und breiten sich mit steigendem Zeitintervall nach außen aus. Dies gilt analog für Auto und Fahrrad, die Strecke für kürzere Intervalle ist in einem helleren Farbton und eine breitere Linie dargestellt.

Bereits für das kürzeste Zeitintervall von 300 Sekunden hat das Auto die doppelte Strecke der 900 Sekunden-Reichweite von Fußgängern erreicht. Das Fahrrad erreicht im kürzesten Intervall lediglich die Distanz, die ein Fußgänger in 700 Sekunden erreichen würde. Somit jedoch weit mehr als ein Fußgänger im gleichen Zeitraum. Mit zunehmender Zeitdauer wachsen die Distanzen proportional zur Zeit. Das Fahrrad erreicht vom Bahnhof in 900 Sekunden die Autobahnbrücke, wohingegen das Automobil diese bereits nach weniger als 500 Sekunden passiert. Schließlich ist noch zu erkennen, dass beide Verkehrsmittel trotz eines östlich gelegenen Zielpunktes einen nördlich verlaufenden Bogen wählen, da die Zielerreichung über breitere Hauptstraßen eine kürzere Reisezeit verspricht als die kürzere aber direktere Strecke mittels Nebenstraßen.

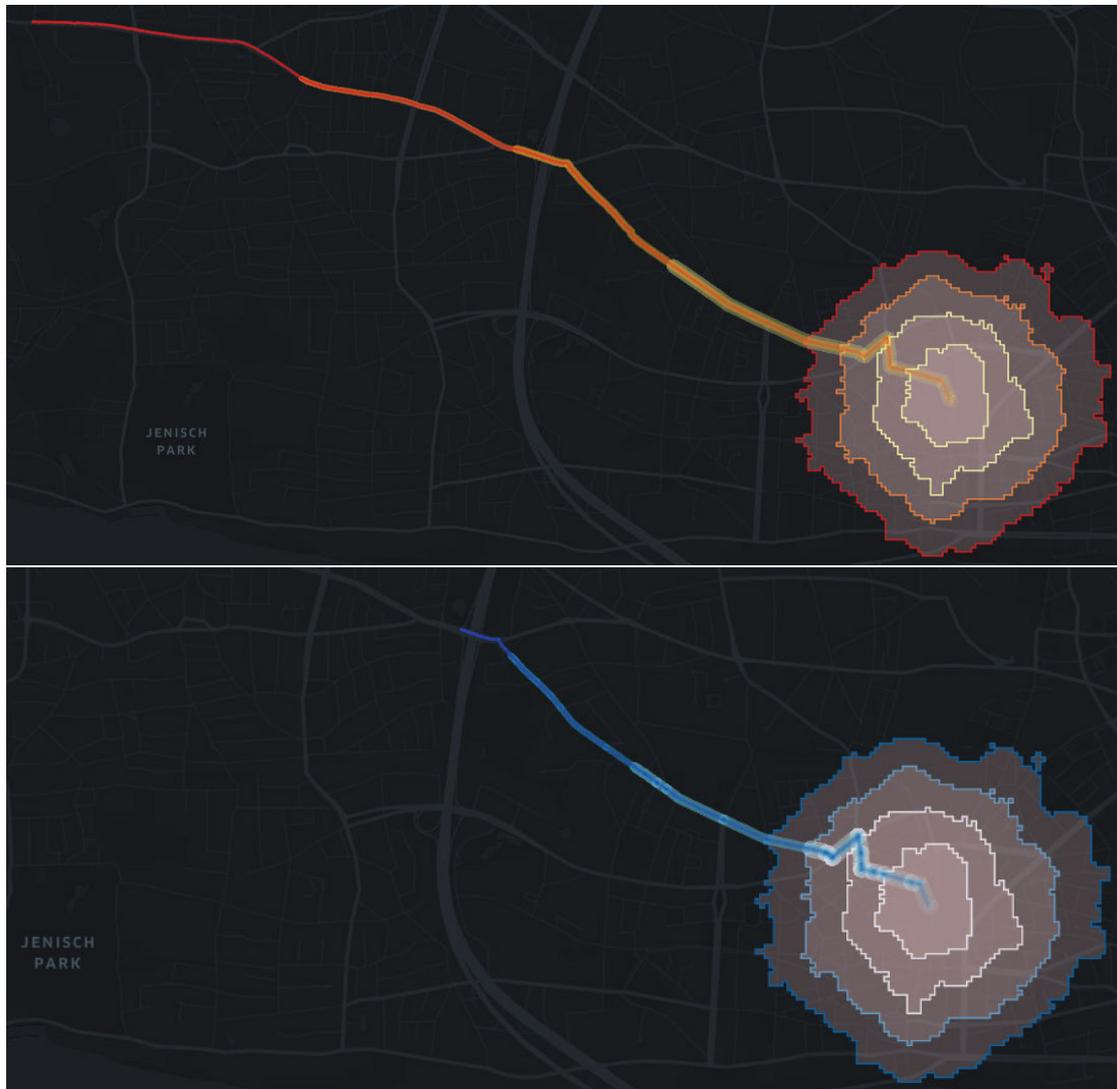


Abbildung 6.16: Vergleich Isochronen von Fußgängern und simulierte Reichweite Auto (oben) und Fahrrad (unten) für 300, 500, 700, 900 Sekunden (von hellen zu dunkleren Farbtönen)

6.2 Ergebnisse für Hypothese 2

Hypothese 2 vergleicht die Reisezeiten der drei vorhandenen Verkehrsmittel miteinander für sinnvolle Wege im Rahmen eines Tagesplans und intermodale Reiseketten. Um alle drei Verkehrsmittel miteinander vergleichen zu können werden zunächst die Fußgänger eingehender betrachtet, da sie den Referenzwert für die beiden anderen Transportmittel bilden. Es wird nicht nur die Reisezeit von Radfahrt und Autofahrt mit dem Fußweg verglichen, sondern die Wegelänge des Fußgängers wird auch als Kenngröße für den Vergleich des Reisezeitvorteils genutzt.

Es wird nun also die Abweichung der simulierten Reisezeit eines Fußgängers von dessen Erwartung (*ExpectedTravelTime*) gemessen. Dazu wurden drei gleichartige Simulationen des Tagesplanmodells mit reinen Fußgängern im Gebiet Altona (Bezirk) durchgeführt. Da die Geschwindigkeit sich nur bei zunehmender Dichte von Passanten verringert, wurden die Szenarien mit relativ vielen Agenten durchgeführt, die Anzahl betrug $n = 10000$.

Die Ergebnisse der drei Durchläufe werden in gemittelter Form betrachtet. Die Gesamtanzahl der Routen liegt durchschnittlich bei knapp 45 000 Wegen pro Simulationslauf. Die durchschnittliche Strecke jeder Route liegt bei rund 4 km. Haben sich Agenten im Vergleich zur statisch ermittelten Zielzeit verlangsamt, so wird die Verlangsamung auf 1 km hoch- bzw. runtergerechnet. Es gab somit ca. 46 Routen pro Durchlauf, die sich auf den Kilometer bezogen um mehr als 1 Sekunde verzögert haben. Das sind etwa 1 Promille aller Wege. Die durchschnittliche Verlangsamung dieser verzögerten Routen liegt bei 2,37 Sekunden, die höchsten Abweichungen waren je Simulationslauf: 15,3s, 9,4s und 3,6s. Bei den hier eingesetzten Agentenzahlen kommt es somit zu einer ausreichend kleinen Verzögerung, dass für die weiteren Versuche der Hypothese 2 die statisch berechnete Zeit des Fußwegs als Vergleich zu den simulierten Zeiten von Radfahrer und Autofahrer genutzt werden kann. Somit besteht der Vorteil, dass für jede Route mit einem Fahrzeug eine äquivalente Route als Fußgänger zur Auswertung berechnet werden kann.

Für den Vergleich von Autofahrer mit Radfahrer soll ebenfalls ein routengenauer Vergleich stattfinden und nicht lediglich ein statistischer Durchschnittswert. Aus diesem Grund wird jede abgefahrene Route durch einen zweiten Agenten zeitgleich mit dem jeweils anderen Transportmittel durchfahren. Mit Route sind in diesem Fall nur die Start- und Zielpunkte gemeint. Durch unterschiedliche Umstiegsunkte können die Wege deutlich voneinander abweichen, da ein Autofahrer zum Parkplatz läuft, während der Radfahrer zur Leihstation geht.

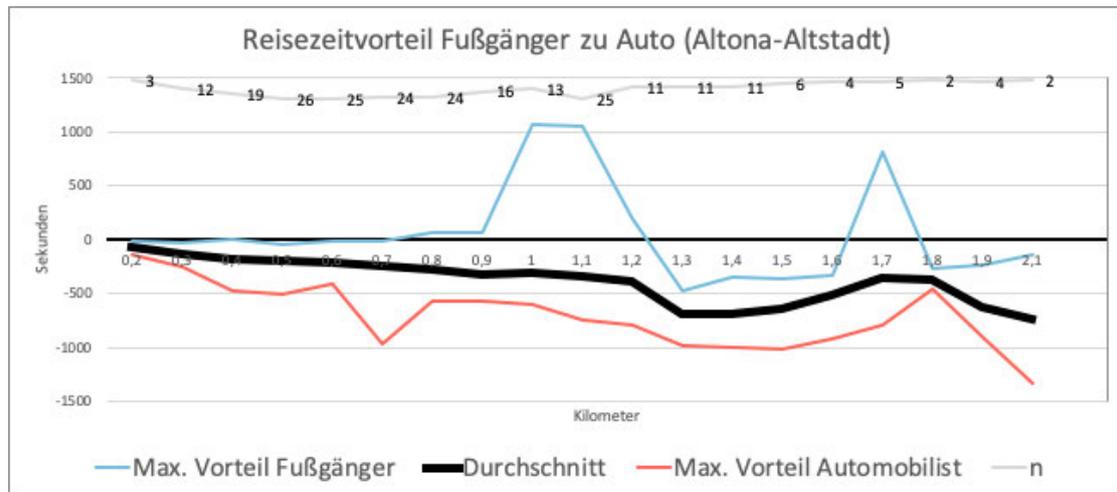


Abbildung 6.17: Reisezeitvorteil Fußgänger gegenüber Autofahrer in Altona-Altstadt

Zunächst werden jedoch die Autofahrer mit Fußgängern verglichen, welche den selben Zielpunkt zu Fuß erreichen würden. Abbildung 6.17 zeigt den Vergleich für Altona-Altstadt. Es werden nur diejenigen Routen betrachtet, bei dem der Agent ein Fahrzeug fährt. Für kurze Strecken, die zu Fuß einen erheblichen Vorteil bringen, nutzt der Agent das Auto nicht, da er sonst mitunter am selben Parkplatz parken müsste. Es gibt also keine Distanzen, die kleiner als $200m$ sind, für die eine Autofahrt überhaupt in Frage kommen und die immer zu Fuß erledigt werden. Das Diagramm ist in Streckenabschnitte von $0,1km$ gegliedert (horizontale Achse) und gibt durch die obere, graue Linie die Stichprobengröße für den jeweiligen Abschnitt an. Es zeigt für die zu vergleichenden Modalitäten den jeweils höchsten Reisezeitvorteil in einem solchen Streckenabschnitt. Diese werden mit den farbigen Linien gekennzeichnet und sind nur dann als wirklicher Vorteil zu betrachten, wenn die Datenpunkte auf der ihr zugehörigen Seite des Ursprungsachse liegen (Vorteil Fußgänger: positiver Sekundenbereich; Vorteil Autofahrer: negativer Sekundenbereich). Liegt die Fußgänger-Kurve im negativen Bereich, so ist auch die für den Fußgänger vorteilhafteste Route durch das Auto schneller zu bewältigen gewesen. Die mittlere Kurve zeigt den durchschnittlichen Zeitvorteil an, welcher in diesem Fall von Beginn an zu Gunsten des Autofahrers verläuft. Dabei sind die Abweichungen für kurze Strecken noch relativ gering. Sie nehmen für größere Distanzen aber kontinuierlich zu. Es gibt jedoch im Bereich bis $1,2km$ auch Strecken mit deutlichen Vorteilen für den Fußgänger und auch für Routen um $1,7km$ kann es noch vorteilhaft sein den Wagen stehen zu lassen.

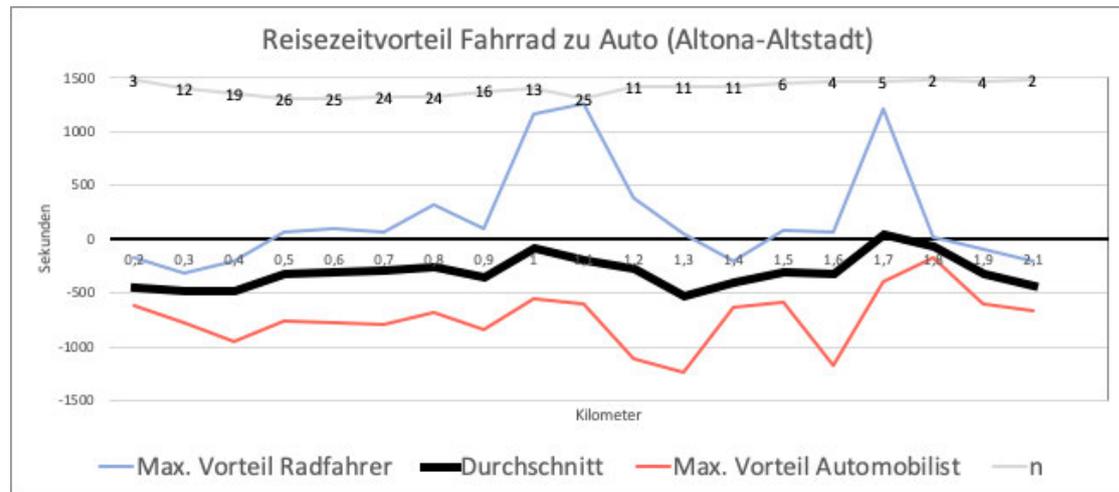


Abbildung 6.18: Reisezeitvorteil Radfahrer gegenüber Autofahrer in Altona-Altstadt

Das nächste Diagramm (Abb. 6.18) vergleicht den Reisezeitvorteil des Fahrrads zum Auto. Aufgrund des kleinen Simulationsgebiets sind die Distanzen nur bis gut 2km aufgeführt. Für fast den gesamten Streckenverlauf liegt der Vorteil beim Automobil. Lediglich bei Strecken um $1,7\text{km}$ ist die durchschnittliche Reisezeit für Fahrradfahrer kürzer. Es gibt jedoch über fast alle Distanzen positive Gegenbeispiele bei denen die Fahrradrouten schneller war. Dies hängt mit dem Umwegen zusammen, welche die Fahrradfahrer in diesem Versuchsaufbau über die Leihstationen machen müssen. Autofahrer können trotz einer Parkplatzauslastung von knapp 80% relativ zielnah parken, da es nur wenige andere Agenten ($n = 500$) in dem Simulationsdurchlauf gab, welche ebenfalls Parkplätze belegen und es eine Vielzahl an Parkflächen in dem Simulationsgebiet gibt.

Schließlich wird der Vergleich von Fußgängern mit Radfahrern betrachtet (Abbildung 6.19). Dieser zeigt, dass bis zu einer Strecke von 900m die Fußgänger durchschnittlich im Vorteil sind. Danach erhöht sich der Vorteil für die Fahrradfahrer auf ca. 5min (300s) für $2,1\text{km}$ lange Strecken. Abhängig von der Lage der jeweiligen Stadtradstationen kann aber auch hier der Fußweg die günstigere Alternative sein. Abweichungen treten auf, korrelieren aber auch mit einer geringen Stichprobenanzahl.

Die Hypothese macht eine Aussage zum Reisevorteil von Radfahrern gegenüber Autofahrern bis 5km . Um solche Streckenlängen zu erreichen wird die gleiche Versuchsreihe noch einmal im Testgebiet Altona (Bezirk) durchgeführt indem Weglängen bis 8km erreicht wurden (siehe Abbildung 6.20 und Folgende). Aus diesem Grund wurde der Maßstab von

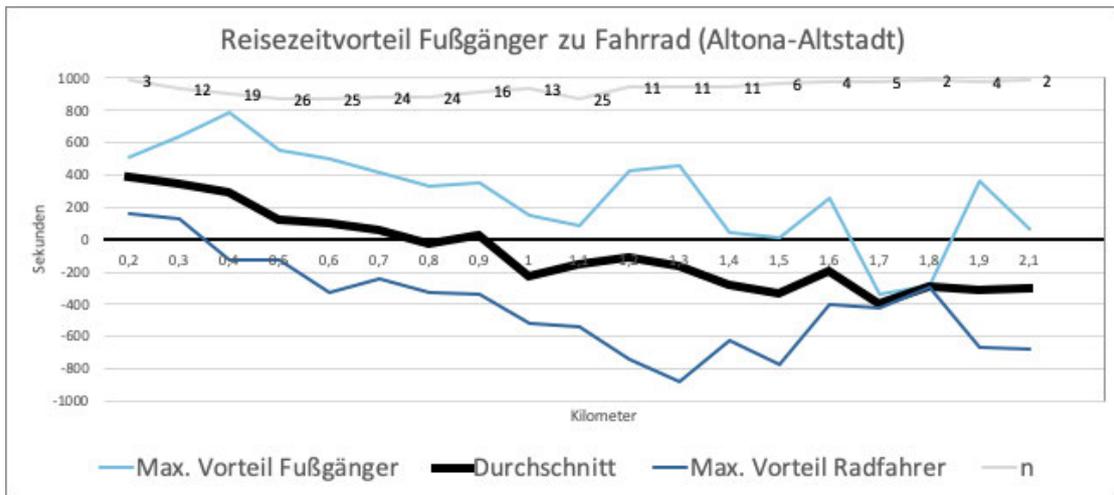


Abbildung 6.19: Reisezeitvorteil Fußgänger gegenüber Radfahrer in Altona-Altstadt

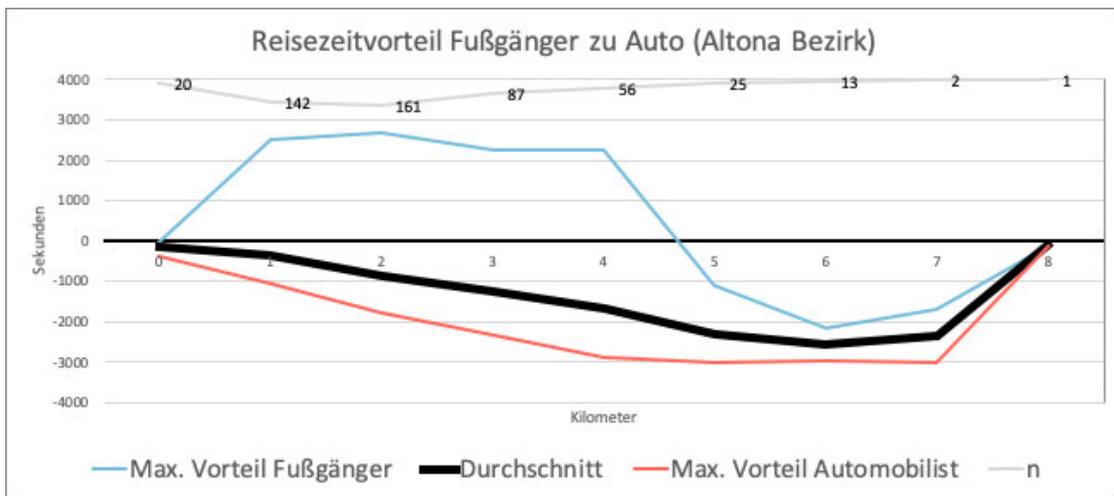


Abbildung 6.20: Reisezeitvorteil Fußgänger gegenüber Autofahrer in Altona (Bezirk)

100m auf 1km vergrößert, auch gut zu erkennen an der Stichprobengröße pro Länge, die am höchsten bei Strecken zwischen 1 und 3km ist.

Die Kurven für den Reisezeitvorteil Fußgänger zu Auto (Abb. 6.21) zeigen einen stetig zunehmenden Vorteil des Automobils für steigende Distanzen. Bis ca. 4,5km gibt es jedoch Fußwege mit einem signifikanten Vorteil. Erst ab noch größeren Längen liegen auch die vorteilhaftesten Fußwege im negativen Bereich, was bedeutet, dass dort immer der Autofahrer schneller war als ein vergleichbarer Fußgänger. Aufgrund der kleinen

Stichprobengröße nähert sich der Wert für $8km$ wieder einer ausgeglichenen Reisezeit an.

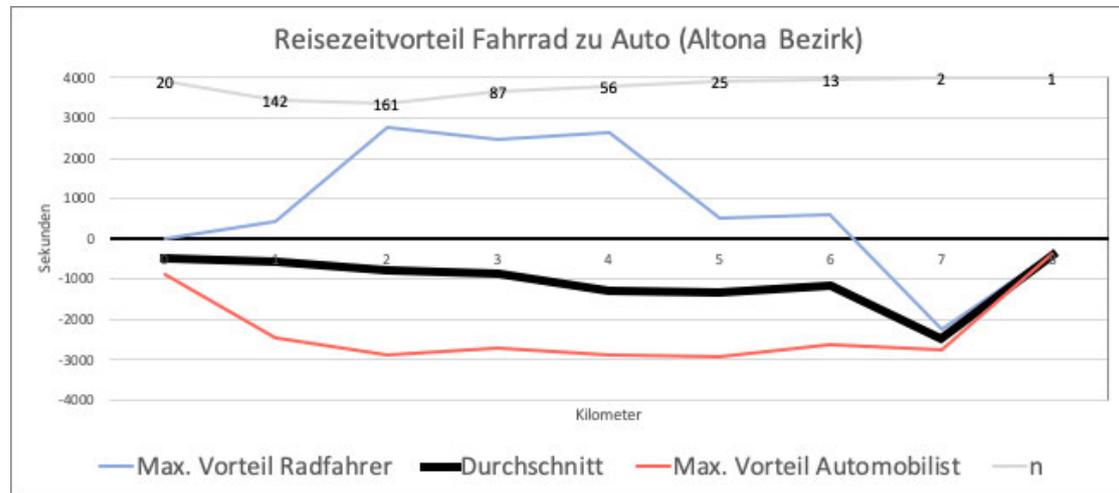


Abbildung 6.21: Reisezeitvorteil Radfahrer gegenüber Autofahrer in Altona (Bezirk)

Der Reisezeitvorteil des Autos gegenüber dem Fahrrad zeigt ähnliche Ergebnisse (Abbildung 6.21). Hier gibt es jedoch bis zu einer Länge von $6km$ noch vorteilhafte Wege, die mittels Fahrrad schneller zu bewältigen sind als mit dem Auto. Im Gegensatz dazu ist jedoch auch zu erkennen, dass für kurze Distanzen bis $3km$ der Reisezeitvorteil des Autos signifikant größer ist als dieser im Vergleich mit den Fußgängern war. Das liegt an der hohen Verfügbarkeit naher Parkplätze im Vergleich zur ungünstiger gelegenen Stadtradstationen für spezifische Wege.

Schließlich werden für das Gesamtgebiet Altona noch in Abbildung 6.22 die Fußgänger mit den Radfahrern verglichen. Ab $2km$ wechselt der durchschnittliche Vorteil vom Fußgänger zum Radfahrer. Der Vorteil zu Gunsten des Radfahrens nimmt bis $6km$ auf ca. 20 Minuten ($1200s$) zu. Es gibt aber auch hier für größere Distanzen so unvorteilhaft gelegene Umsteigepunkte, dass der Radfahrer seinen Zeitvorteil für gewisse Strecken wieder einbüßen kann. Über alle Distanzen gibt es Wege im Simulationsgebiet, die durch den Fußgänger schneller bewältigt werden können. Dennoch liegt der Reisezeitvorteil grundsätzlich beim Fahrrad.

Zur besseren Einordnung der oben beschriebenen Graphen wird in Abbildung 6.23 für beide Gebiete die Umwege der Transportmittel dargestellt. Autofahrer müssen für ihre intermodalen Routen zunächst zum Parkplatz laufen und später vom neuen Parkplatz zum Ziel gehen. Analog dazu müssen Radfahrer die Leihstationen besuchen. Diese zusätzliche

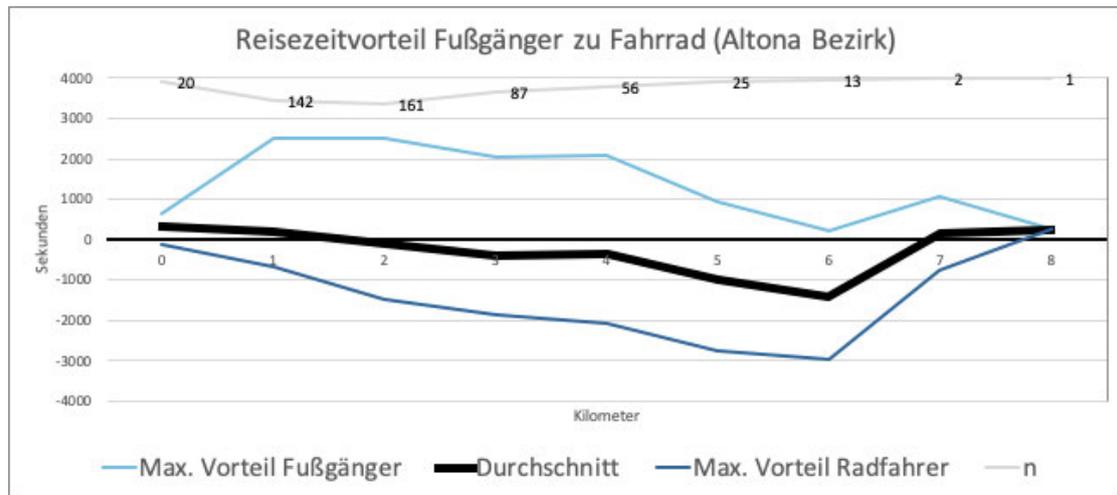


Abbildung 6.22: Reisezeitvorteil Fußgänger gegenüber Radfahrer in Altona (Bezirk)

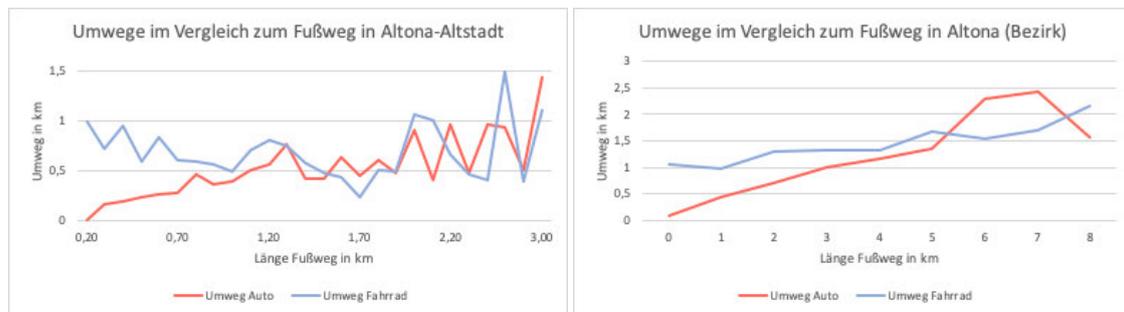


Abbildung 6.23: Umwege von Radfahrer und Autofahrer zu Umsteigepunkten im Vergleich zum direkten Fußweg in Altona-Altstadt und Altona (Bezirk)

Wegstrecke im Vergleich zum direkten Fußweg ist der Grund für einen möglichen Reisezeitvorteil der jeweilig langsameren Verkehrsmittel, vor allem des Zufußgehens. Da Autos aber häufig relativ nah am Startpunkt geparkt werden können, sieht man dass vor allem für geringe Wegstrecken der Umweg für Automobile (rote Kurve) relativ gering ist. Fahrradfahrer haben schon von Beginn an einen Umweg von ca. 1km in Altona (Bezirk). Für die Altstadt kann dieser Umweg auch aufgrund der vergleichsweise hohen Dichte von Leihstationen geringer sein und auf bis zu 400m schrumpfen. Für beide Transportmittel nähern sich die Umwege mit wachsender Distanz an. Die Umwege für größere Distanzen liegen vor allem im größeren Straßengraphen, welcher durch Einbahnstraßen und einer geringeren Anzahl Straßen im Vergleich zum Fußgängergraphen längere Routen erfordert. Fußgänger haben hingegen auch die Möglichkeit bspw. Wege durch Parkanlagen zu benutzen und können somit auf direkteren Wegen zum Ziel finden.

6.3 Ergebnisse für Hypothese 3

Die bisher gefundenen Ergebnisse führen zur dritten Hypothese, welche ein Verkehrsnachfragemodell mittels Tagesplanmodellierung umsetzt. Kann dieses Modell in Kombination mit multimodalen Agenten als Grundlage für eine Verkehrsanalyse nach Reisezeit und Modal Split dienen? Dazu werden verschiedene Szenarien durchgespielt, die dem Agenten zunehmend mehr Transportmittel zur Verfügung stellt. Zunächst können Agenten lediglich zu Fuß gehen, im zweiten Szenario haben sie die Möglichkeit Leihräder zu nutzen und schließlich haben sie auch Automobile im Portfolio insofern sie zu den 32,6% der Altonaer Bevölkerung gehören, die ein eigenes Auto nutzen können. Im Gegensatz zur Hypothese 2 wählen die Agenten ihr Verkehrsmittel nun frei nach Situation und Erwartungsschätzung der Reisezeit. Gegenübergestellt werden die Gebiete Altona-Altstadt und das Gesamtgebiet Altona um den Einfluss von langen Wegstrecken mit geringerer Verfügbarkeit von Modalitäten untersuchen zu können. Schließlich wird aufgrund der geringen Verfügbarkeit von Transportmitteln im westlichen Teil des Bezirks, ein Vergleichslauf durchgeführt, welcher jedem Agenten ein Auto zur Verfügung stellt.

Es wurden für jedes Szenario je 3 Simulationsläufe mit 1000 Agenten durchgeführt und die Ergebnisse jeweils gemittelt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit von Routen gilt: Es werden nur abgeschlossene Routen betrachtet. Hat der Agent auf dem Weg ein Ziel noch nicht erreicht, beginnt jedoch schon eine weitere Route, so wird die unvollendete Route nicht im Ergebnis gewertet.

Abbildung 6.24 zeigt die durchschnittliche Reisedauer eines Agenten über den Tag. Für jedes Gebiet gibt es drei Szenarien mit unterschiedlichen Verfügbarkeiten an Modalitäten. Erwartet wurde eine Abnahme der Reisedauer mit Hinzunahme jedes Transportmittels. Für Altona-Altstadt kann diese These nicht bestätigt werden. Das Fahrrad bringt zwar eine geringe Verkürzung der Reisezeit, sobald Agenten jedoch auch noch Autos nutzen können, steigt diese im Vergleich zu den beiden anderen Szenarien wieder an. Dies hängt damit zusammen, dass die Agenten Abschätzungen treffen, welche in der tatsächlichen Ausführung ungünstiger sein können als der vergleichbare Fußweg. Eine genauere Analyse ermöglicht die Betrachtung des Modal Split für diese Szenarien.

Der Modal Split für Altona-Altstadt ist in Abbildung 6.25 dargestellt. Das Diagramm links zeigt die Nutzung der Verkehrsmittel im Szenario der Fahrradverfügbarkeit. Unterschieden werden das Verkehrsaufkommen, welches beschreibt wie viele Wege mit dem

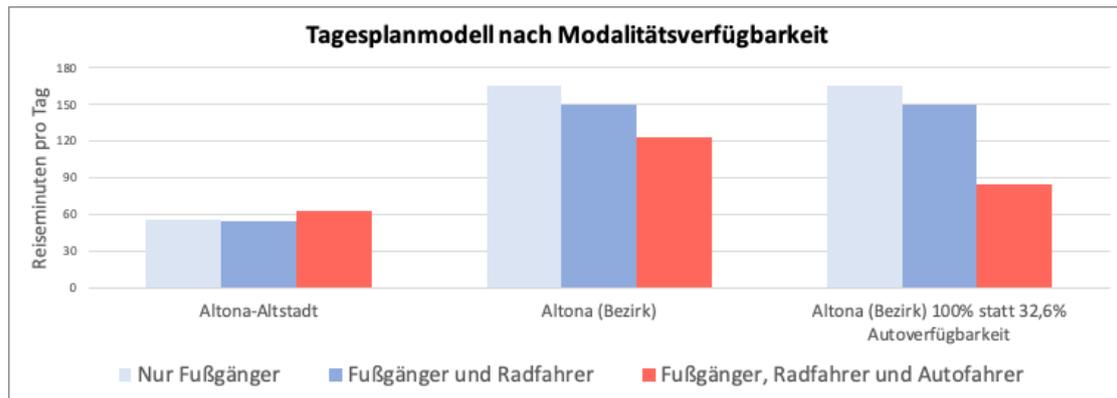


Abbildung 6.24: Globale Tagesreisezeit mit unterschiedlicher Verfügbarkeit von Modalitäten im Vergleich Altona-Altstadt, Altona (Bezirk) und Altona (Bezirk) mit Autozugang für jeden Agenten statt nur für 32,6%

jeweiligen Verkehrsmittel absolviert wurden und die Verkehrsleistung, welche die zurückgelegte Strecke je Verkehrsmittel angibt. Für dieses Szenario legt der Agent zwar fast $\frac{2}{3}$ der Wege zu Fuß zurück, dabei aber nur $\frac{1}{3}$ der Weglängen. Im Szenario, welches die Automobile für 32,6% der Agenten verfügbar macht, wird das Auto nur für knapp 10% der Wege genutzt. Dies geschieht meist zulasten des Fahrrads. Die Anzahl der Fußwege bleibt ungefähr gleich groß. Es kann also zusammengefasst werden, dass für Altona-Altstadt nur in ca. $\frac{1}{3}$ der Wege andere Verkehrsmittel als das Zufußgehen genutzt werden trotz ihrer Verfügbarkeit. Das erklärt auch die sehr ähnlichen Reisezeiten in allen drei Szenarien des Gebiets.

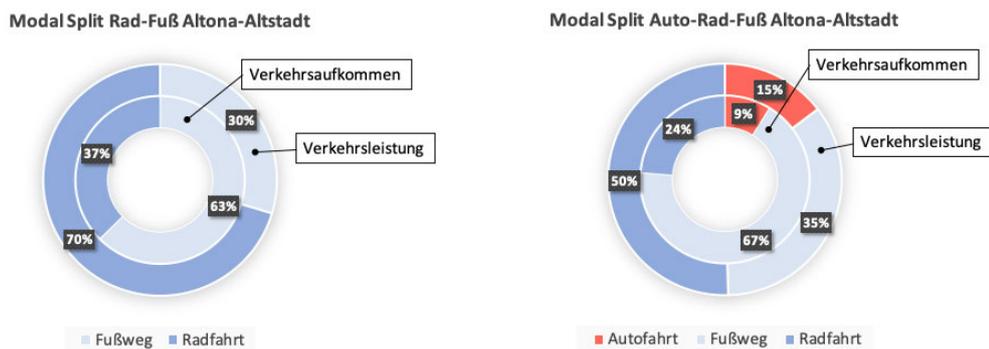


Abbildung 6.25: Modal Split für Altona-Altstadt nach Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung. Links: Verfügbarkeit von Rad und Fuß. Rechts: Verfügbarkeit von Auto (für 32,6%), Rad und Fuß.

Die nächste Betrachtung untersucht den Bezirk Altona in den selben Verfügbarkeitsabstufungen. Betrachtet man wiederum Abbildung 6.24 so sieht man die zu erwartende, deutlich längere Reisezeit aufgrund der größeren Distanzen in dem Gebiet. Die Verfügbarkeit von Fahrrad und Automobil wirkt sich nun merkbar aus. Stehen Radstationen zur Verfügung sinkt die Reisezeit um 10%, Automobile bringen eine Verkürzung von gut 25% gegenüber dem reinen Fußgängermodell. Bei Betrachtung von Abbildung 6.26 wird deutlich, dass der Modal Split für das Szenario mit Radfahren dem Versuch aus der Altstadt stark ähnelt. Trotz des größeren Vorteils auf langen Strecken hängt die Nutzung ebenso stark von der Verfügbarkeit der Leihstationen ab. Der Mangel an Stadtradstationen im westlichen Teil des Gebiets gleicht somit den Vorteil wieder aus. Die Nutzung des Automobils nimmt im Vergleich zum Altstadt-Szenario um knapp das Doppelte zu. Dies betrifft das Verkehrsaufkommen gleichermaßen wie die Verkehrsleistung. Die höhere Nutzung des Autos geht zu Lasten von Fahrrad (11% weniger Nutzung) und Fußgänger (7%) im Vergleich zum Szenario ohne Kraftfahrzeuge. Vergleicht man die Wegstrecke mit der Häufigkeit der Wege je Modaltyp, so hat das Fahrrad eine fast doppelt so hohen Anteil. Das Automobil erbringt auch relativ mehr Verkehrsleistung aber hat einen nicht ganz so hohen Faktor wie das Radfahren. Der Einfluss steigt um 11 Prozentpunkte auf 29%. Die beiden Fahrzeuge machen somit gemeinsam knapp $\frac{3}{4}$ der Verkehrsleistung aus. Die eingeschränkte Verfügbarkeit der Transportmittel führt jedoch dazu, dass die globale Reisezeiten lediglich von 166 Minuten (nur Fußgänger) auf 124 Minuten (Autos sind verfügbar) sinkt, da viele Agenten weiterhin zu Fuß gehen müssen oder ungünstige Umsteigepunkte mit größeren Weglängen zu wählen haben.

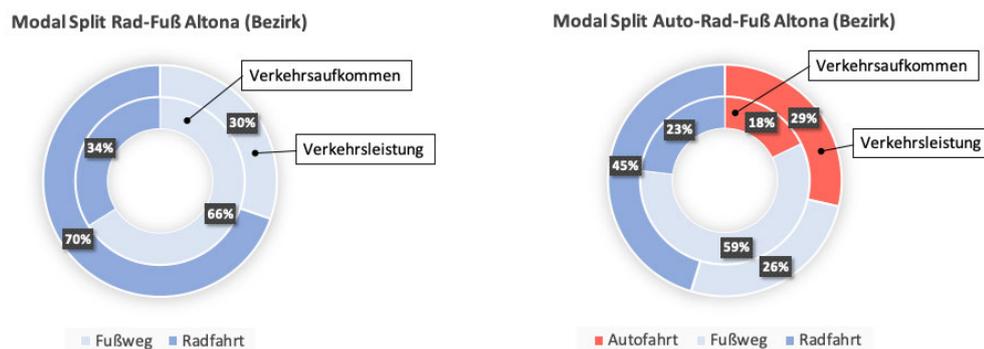


Abbildung 6.26: Modal Split für Altona (Bezirk) nach Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung. Links: Verfügbarkeit von Rad und Fuß. Rechts: Verfügbarkeit von Auto (für 32,6%), Rad und Fuß.

Aus diesem Grund wird zum Vergleich ein weiteres Szenario konzipiert, welches allen Agenten ein Automobil zur Verfügung stellt. Diese dritte Versuchsreihe ist als hypothetischer Vergleich gedacht, da eine solche Autoverfügbarkeit nicht der Realität entspricht und eher dem ländlichen Raum entspricht. Das Gebiet Altona hat aber in der Wirklichkeit noch weitere Verkehrsmittel wie den öffentlichen Nahverkehr, der keinen Einzug in diese Arbeit gefunden hat. Wie stark ist also der Einfluss einer hohen Verfügbarkeit des MIV in einem relativ großen Gebiet? Dieser ist wie zu erwarten sehr groß. Abbildung 6.27 zeigt, dass der Anteil von Autofahrten auf über 50% anwächst und der Anteil der Verkehrsleistung sogar bei 80% liegt. Es werden zwar noch gut 40% der Wege zu Fuß gegangen, dies geschieht jedoch nur noch für relativ kurze Strecken (Verkehrsleistung: 11%). Das Fahrrad wird nur noch in 6% der Fällen genutzt und hat einen fast ebenso geringen Anteil an der erbrachten Wegstrecke. Die globale Reisezeit aller Agenten sinkt deshalb nun deutlich um gut 80 Minuten was ungefähr eine Halbierung der Zeitdauer entspricht.

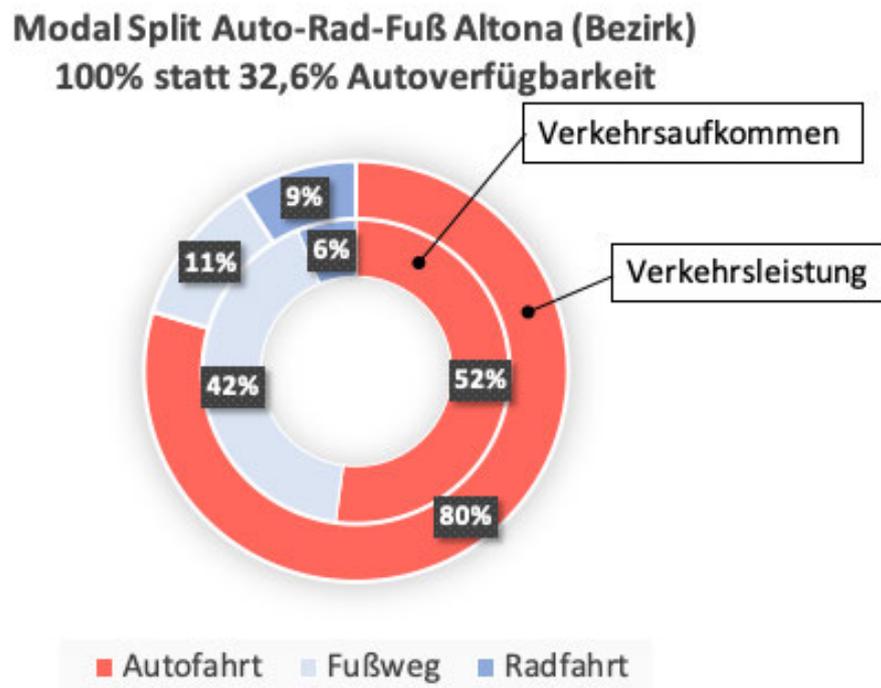


Abbildung 6.27: Modal Split für Altona (Bezirk) nach Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung mit Verfügbarkeit von Auto (für alle Agenten), Rad und Fuß

7 Diskussion

Die Diskussion des Agentenentwurfs sowie der daraus resultierenden Ergebnisse der Experimente soll im folgenden Kapitel stattfinden. Als Erwartungsmaßstab gelten die im Analysekapitel aufgestellten Anforderungen hinsichtlich der zu überprüfenden Hypothesen. Abgeschlossen wird mit einer zusammenfassenden Schlussbetrachtung der vorliegenden Arbeit.

7.1 Diskussion der Hypothese 1

Die erste Hypothese erwartet eine Eignung des Agentenentwurfs bezüglich eines multimodalen Verkehrsmodells. Die dafür notwendige Vielzahl an Versuchen wurde durchgeführt. Eine Betrachtung findet je Abschnitt statt.

7.1.1 Diskussion zur Modellintegration

Die drei bestehenden Modelle des Autofahrens, Radfahrens und des Zufußgehens wurden erfolgreich integriert. Die Komponente des Fußgängers musste jedoch aufgrund enger Verknüpfungen zu Funktionalitäten eines anderen Modells weitgehend neu implementiert werden. Eine Integration bestehender Konzepte, wie die Berechnung einer bevorzugten Gehgeschwindigkeit sowie der Einfluss von Passantendichte auf die aktuelle Geschwindigkeit, konnten vollständig übernommen werden. Die Intialisierung der Geschwindigkeit nach Geschlecht liegt im von Löffler (2019) postulierten Rahmen. Der Mittelwert liegt bei Frauen in diesem Modell bei 4,6 km/h zu 4,57 km/h (1,27 m/s) im Ausgangsmodell. Bei Männern sind die Ergebnisse ähnlich: 5,1 km/h zu 5,08 km/h (1,41 m/s). Das Experiment bezüglich der Verlangsamung zeigt, dass es eine Minimalgeschwindigkeit von 0,5 km/h bei sehr hoher Dichte gibt, die zur Auflösung von Engesituationen explizit so vorgesehen war. Mit weniger Einschränkungen durch Personendichte nimmt die Geschwindigkeit

stufenweise zu. Dies ist das aufgrund des LOS-Konzept zu erwartende Verhalten. Die Integration der fußgängerspezifischen Eigenschaften konnten somit nachgewiesen werden.

Im nächsten Schritt wurde die Integration des Automobils durchgeführt. Die Funktionalität des Automobils konnte in die verschiedenen Teile der architektonischen Entwurfs unterteilt werden. Der `CarDriverAgent` als eigenständiger Agent spezialisiert die `ICarSteeringCapable`-Fähigkeiten. Das Car als räumliche Repräsentation und Schnittstelle zum Einstieg liefert das `CarSteeringHandle`, welches nun alle Steuerungsfunktionalität enthält über die der Agent das Fahrzeug führen kann. Es wurde gezeigt, dass der Autofahreragent weiterhin beliebige Ziele mittels Autofahrt erreichen kann und dabei den Weg in unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchfährt. Das Halten an Ampeln sowie die Erreichung aber nicht Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h wirken plausibel. Ein Vergleich der Reisezeit mit Onlinevergleichsdaten zeigt eine deutlich langsamere Zielerreichung. Ein begründeter Verdacht weist auf die Implementierung von Ampeln und Kreuzungen hin. Es kann davon ausgegangen werden, dass auf großen Ausfallsstraßen die Ampelschaltungen optimiert und Vorfahrtsregelungen vorteilhaft gestaltet sind. Dies ist im vorliegenden Modell nicht so, da alle Straßen gleich behandelt werden und Ampelschaltungen einen festen Takt fahren und nicht miteinander verschaltet sind. Unabhängig von diesen Erkenntnissen ist das Automodell in seiner von Weyl (2019) vorgestellten Form für Multimodalität nutzbar.

Als dritten Modaltypen wurde das Fahrrad integriert. Die Entwicklung des Fahrradfahrens fand bereits im Rahmen des Architekturentwurfs statt. Der Integrationsaufwand beschränkte sich somit auf die Bereitstellung von Fahrrädern über Leihstationen. Dennoch wurde eine eigenständige Überprüfung des Fahrradfahres durchgeführt, welche in einer Geschwindigkeitskurve für eine exemplarische Route dargestellt wurde. Dort sind ein starker Wechsel der Geschwindigkeiten wiederzufinden, die auch Wartezeiten an Ampeln enthalten. Ein zum Automobil variierender Kurvenverlauf ist zudem maßgeblich auf das implementierte Fahrzeugfolgemodell (vgl. Abschnitte 2.5.1 mit 2.5.2) zurückzuführen. Die Höchstgeschwindigkeit liegt in Ausnahmen bei knapp 30 km/h. Der Reisezeitvergleich für eine Strecke von gut 11 km liegt bei einer Abweichung von ca. 11%. Auch hier muss auf die im Automodell beschriebenen Modellannahmen zu Kreuzungen und Ampeln verwiesen werden. Die Reisezeit liegt somit in einem realistischem Bereich.

Es konnte gezeigt werden, dass die drei Modaltypen dem architektonischen Entwurf entsprechend integriert werden konnten. Die Fortbewegungsmittel zeigen für sie typisches Bewegungsverhalten in einem erwartbaren Rahmen.

7.1.2 Diskussion zur Intermodalität

Aufbauend auf die vorhandenen Modaltypen wurde untersucht, ob sich diese zu intermodalen Reiseketten verknüpfen lassen. Diese müssen zunächst über eine Komponente zur Routensuche gefunden werden. Es konnte gezeigt werden, dass abhängig von Start, Ziel und gewünschtem Haupttransportmittel immer gültige Routen gefunden werden konnten. Diese können in ihrer Anzahl an monomodalen Teilrouten variieren abhängig von den situativen Umsteigepunkten. Werden bedarfsgerechte Routen für alle verfügbaren Modaltypen gesucht, so werden Routen bereitgestellt, welche die kürzeste zu erwartende Reisezeit haben. Bei dieser Anfrage dominiert das Automobil mit über 80% der kostengünstigsten Route im Vergleich zur 15% Fahrrad und 2% Zu-Fuß. Bemerkenswert ist dies vor dem Hintergrund, dass die durchschnittliche Länge der kombinierten Auto-Route mit 6,2 km nur unwesentlich länger ist als die von Fahrrädern 5,2 km. Die Länge von reinen Fußgänger Routen liegt bei gut 1 km. Die unterschiedliche Verteilung der multimodalen Routen liegt vor allem an der geringen Verfügbarkeit von Radleihstationen im westlichen Teil von Altona. Auch der größere Reisezeitvorteil spricht für das Auto. Für kurze Strecken werden Gehrouten bevorzugt. Die intermodale Routensuche ermöglicht somit situations- und bedarfsgerecht Reiseketten.

Die Nutzung der Reiseketten wurden dann für Automobil und Fahrrad getestet. Dies wurde zunächst in einem Teilgraphen, welcher ähnliche Routen für unterschiedliche Modaltypen ermöglicht, durchgeführt. Für unterschiedliche Start- und Zielpunkte (z.B. Einstieg direkt im Auto oder erst Fußstrecke zum Umsteigsort) wurde geprüft, ob Agenten die Wege sauber zurücklegen und ihre Transportmittel sauber wechseln. Anhand der Geschwindigkeitsgraphen konnte dies verifiziert werden. Sobald ein Fahrzeug genutzt wurde stieg die Geschwindigkeit deutlich an bis zu dem Zeitpunkt des Abbremsens, Ausstiegs und der Fortsetzung als Fußgänger. Für eine weitere zufällige Fahrrad-Wegekette wurde dies auch in dem Gebiet Altona-Altstadt überprüft. Dabei traten die durch Kreuzungen verursachten Geschwindigkeitsschwankungen beim Fahrradfahren auf. Es konnte auch gezeigt werden, dass der Agent zunächst am Ziel vorbei fährt um das Fahrrad an der nächsten Leihstation abzugeben, bevor ein Teil des Weges als Fußgänger zurückgelaufen wird. Es wurde noch ein weiterer Versuch durchgeführt mit 200 Agenten, die mittels Fahrrad ihr Ziel erreichen wollen. Die wurde über die Visualisierung als Bewegungsvideo überprüft. Der Multimodalagent ist demzufolge fähig wiederholt und zielerreichend intermodale Reiserouten zu nutzen.

7.1.3 Diskussion zum Reisezeitvorteil

Im Ausblick auf Hypothese 2 wurde der Reisezeitvorteil verschiedener Transportmittel miteinander verglichen. Im Kontrast zur Isochronendarstellung für Fußgänger, die bei zu erwartender Passantendichte, eine gleichbleibende Geschwindigkeit haben, wurde ein simulierter Reiseweg von Radfahrer und Autofahrer skizziert. Für beide Transportmittel wurde das selbe Ziel gewählt und sie haben die selbe Route gewählt. Das Automobil hat im ersten Zeitabschnitt von 300 Sekunden bereits die doppelte Strecke zur maximalen Reiseweite des Fußgängers im dreifachen Zeitraum erreicht. Der Reisezeitvorteil steigt im weiteren Zeitverlauf proportional an. Das Fahrrad kommt im ersten Zeitabschnitt ungefähr so weit wie ein Fußgänger in 700 Sekunden. Insgesamt liegt der Reisezeitvorteil des Automobils gegenüber dem Fahrrad in diesem Szenario bei gut 40%. Haben Agenten also ihr Transportmittel erreicht, so liegt der Geschwindigkeitsvorteil, wie erwartet, deutlich bei den Fahrzeugmodalitäten. Ob dieser Geschwindigkeitsvorteil trotz notwendiger Umwege von und zum Transportmittel und die größere Routenlänge aufgrund des größeren Straßengraphens gegenüber dem Fußgänger beibehalten werden kann wird in Hypothese 2 untersucht.

Es kann jedoch abschließend festgestellt werden, dass eine intermodale Nutzung verschiedener Transportmittel in dem Modell möglich ist. Weiterhin konnte ein grundsätzlicher Reisezeitvorteil von Radfahrern gegenüber Fußgängern und von Autofahrern gegenüber beiden anderen Verkehrsmitteln dargestellt werden. Abhängig von Fähigkeiten und situativer Verfügbarkeit von Transportmitteln können Agenten zeitabhängige Abschätzungen über ihre Reisezeit treffen und darauf basierend flexibel ihre intermodale Reisekette wählen. Das Modell eignet sich demnach zur Untersuchung von Multimodalität im Stadtverkehr.

7.2 Diskussion der Hypothese 2

Die Ergebnisse zum Reisezeitvorteil zeigen, dass die Fahrt mit dem Automobil in der vorgestellten Ausgestaltung des Modells im Schnitt immer vorteilhaft gegenüber dem Fahrrad und dem Fußweg ist. Dazu muss einschränkend festgestellt werden, dass sehr kurze Strecken überhaupt nicht durch eine Autofahrt absolviert wurden und somit nicht in den Ergebnissen auftauchen. In solchen Fällen übersteigt der Aufwand den erwarteten Nutzen und das Automobil hat womöglich den selben Start- und Zielparkplatz. Die

Agenten gehen in solchen Situationen immer zu Fuß, da keine intermodale Reisekette gewählt werden kann. Für den Simulationslauf in der Altstadt sind fast 50% aller Routen solche reinen Fußwege und sie können eine Länge bis 2,5km haben. Für das Gebiet Altona (Bezirk) sind es noch immerhin 9,7% bei Weglängen bis 3km (ab 2 Routen mit dieser Länge). Verglichen wurden also lediglich intermodale Reiseketten.

Der erste Teil der Hypothese besagt, dass Fußgänger bis Weglängen von 1,5km schneller sein können als Autofahrer mit dem gleichen Ziel. Zunächst kann festgestellt werden, dass das Modell und die durch die Simulationen gefundenen Ergebnisse eine solche Untersuchung ermöglichen. Durch das Konzept der Zwillingsagenten und der statischen Analyse des Fußwegs gibt es zu jeder einzelnen Route Vergleichswerte der beiden anderen Modalitäten. Die Ergebnisse sind jedoch hinsichtlich der Modellgestaltung zu interpretieren (siehe vorherigen Abschnitt). Für das Gebiet Altstadt sind mit 50% Fußwegen und einer Wegstrecke bis 2,5km die Erwartungen der Hypothese erfüllt. Der Schwerpunkt der Ergebnisse bezieht sich jedoch auf den Vergleich intermodaler Reiseketten. Auch hierfür kann gezeigt werden, dass es bis zu einer Weite von 1,2km sinnvoll sein kann, das Auto stehen zu lassen, selbst wenn eine kürzere Reisezeit vom Autofahrer vermutet wird. Im Schnitt hat der automobile Agent aber den Wegezeitvorteil auf seiner Seite. Die Hypothese kann für diesen Teil somit als bestätigt angesehen werden. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass auch der intermodale Reisezeitvorteil wiederholt geringer sein kann.

Der zweite Teil der Hypothese vergleicht das Fahrrad mit dem Automobil auf Strecken bis zu 5km. Die Simulation des hierzu untersuchten Gesamtgebiets Altona findet Wege, welche bis zu 8km Länge haben. Somit können Radfahrer auf diesen Strecken mit Autofahrern hinsichtlich der Hypothese verglichen werden. Einschränkend ist aber festzustellen, dass die Hypothese so interpretiert werden kann, dass Radfahrer unmittelbar ein Fahrrad zu ihrer Verfügung haben. In diesem Fall wäre aber keine intermodale Reisekette zu erwarten, da die Radfahrer alle Wege von Start bis Ziel mit dem Fahrrad bewältigen würden. Aus diesem Grund müssen Radfahrer in der vorliegenden Untersuchung immer Leihstationen besuchen um an ein Fahrrad zu gelangen und dieses auch wieder abgeben. Das schmälert den Reisezeitvorteil der Radfahrer beträchtlich, zeigt doch der Vergleich der Umwege (Abb. 6.23) vor allem für Strecken bis 5km die kürzeren Gesamtwege der Autofahrer. Das hängt mit der Positionierung der Stadtradstationen im Simulationsgebiet zusammen. Obwohl der Reisezeitvorteil im Bezirk Altona durchgängig zugunsten des Autofahrers ausfällt, gibt es bis 6km Gegenbeispiele für Routen, die durch einen Radfahrer schneller erradelt werden können. Für die kürzeren Strecken in der Altstadt fällt das Ergebnis noch etwas differenzierter aus. Hier liegt der Reisezeitvorteil zwar auch

meist auf der Seite des Automobils, gleicht sich aber bei 1 km aus und liegt zeitweilig sogar zugunsten des Radfahrers. Auch hier gibt es abgesehen von sehr geringen Distanzen immer Beispiele für Routen, die mit dem Fahrrad schneller zu bewältigen sind, als mit dem Kraftfahrzeug. Auf eine genauere Betrachtung von Umwegen, welche durch Parkplatzsuche entstehen, wurde verzichtet. Die Funktionalität der Parkplatzsuche ist jedoch vorhanden und trat in Simulationsläufen auch auf, spielte jedoch aufgrund der geringen Agentenanzahl eine untergeordnete Rolle. Es kann schließlich zusammenfassend festgestellt werden, dass obwohl die Nutzung des Automobils in der simulierten Verkehrs- und Parkraumauslastung eine durchschnittlich, geringere Reisezeit verspricht, diese bis *6km*, trotz Leihrad, auch auf der Seite des Radfahrers liegen kann.

Die Hypothese ist somit in beiden Teilen untersucht und bestätigt.

7.3 Diskussion der Hypothese 3

Die Untersuchungen zu Hypothese 3 zeigen Ergebnisse, die erklärungs- und interpretationsbedürftig sind. Um sie zu diskutieren, muss eine eingehende Betrachtung des Modells vorangestellt werden. Dies beginnt beim Verkehrsnachfragemodell, welches für die Tagespläne und den daraus resultierenden Zielen die Verkehrswege für die Agenten vorgibt. Die Ergebnisse hängen hier also maßgeblich von Distanzen und der Nähe zu günstigen Umsteigepunkten ab. Ein weiterer Einflussfaktor könnte Verkehr sein, aufgrund der durch die COVID-19-Pandemie eingeschränkten Simulationsmöglichkeiten an der Hochschule, ist dieser Faktor in den Ergebnissen zu vernachlässigen, da mit lediglich 1000 Agenten pro Simulationslauf gerechnet wurde. Angesprochen wurden schon die günstigen Umsteigepunkte. Dafür wurden die von der Bahn bereit gestellten Stadtradstationen in das Modell integriert. Diese sind so in Hamburg platziert, dass sie eine Abdeckung aller zentralen Stadtteile ermöglichen. Für den Bezirk von Altona liegen diese Bereiche in der östlichen Hälfte des Gebiets. Gegen eine Platzierung weiterer Leihstationen an ausgedachten oder zufälligen Position wurde sich entschieden. Sodann sind die Verfügbarkeit von Parkplätzen und ihrer Auslastung zu betrachten. Durch die geringe Agentenanzahl wurde eine statische Belegung festgelegt, die zufällig gesetzt einen Schwellwert aus Parkraumerhebungen in der Altonaer Altstadt annähern soll. Der Einfluss der Belegung wurde nicht untersucht. Er kann aber durch die hohe Auslastung (77,9%) zu bemerkbaren Verlängerungen der intermodalen Autostrecken geführt haben. Die Lagen und Größen der Parkflächen wurden aus verschiedene Quellen ermittelt und sie sind über das gesamte Gebiet in

ausreichender Zahl anzufinden. Eine größere Dichte gibt es auch hier im östlichen Teil des Gebiets. Der letzte signifikante Einflussfaktor liegt in der multimodalen Verkehrsmittelwahl des Agenten. Abhängig von seinen Fähigkeiten und der situativen Verfügbarkeit von Verkehrsmitteln ermittelt jeder Agent für jede Route eine geeignete Wahl. Geeignet bedeutet hier eine Auswahl nach Reisezeiterwartung. Die kalkulierte Reisezeit ist für Fußwege relativ genau, weicht aber für Radfahrten und Autowege deutlich ab. Die Kalkulation berücksichtigt nur bedingt den Einfluss von Kreuzungen. Ampeln und Verkehr werden bei der Abschätzung nicht einkalkuliert. Agenten schätzen damit tendenziell die Wege mit einem Fahrzeug günstiger ein als sie am Ende sind. Durch den hohen Reisezeitvorteil wird dies aber ausgeglichen, so dass die Wahl meist einem tatsächlichen Zeitgewinn entspricht. Ausnahmen können auftreten, womit wir bei der Betrachtung des Szenarios von Altona-Altstadt angelangt sind.

Die Hypothese 3 erwartet eine Senkung der global zusammengefassten Reisedauer aller Verkehrsteilnehmer durch die Hinzunahme von weiteren Transportmitteln. Diese Erwartung konnte für die Simulationen der Altonaer Altstadt nicht bestätigt werden. Hier sinkt die Reisedauer zwar durch die Hinzunahme von Fahrrädern leicht, sie steigt aber durch das Hinzufügen von Autos. Die Ursache liegt grundsätzlich im relativ kleinen Simulationsgebiet. Dort treten viele kurze Wege bis zu einer Länge von 2km auf, die meist am günstigsten zu Fuß zu erledigen sind. Durch die hohe Auslastung der Parkplätze in Kombination mit den Umwegen zu eben solchen, kann eine Autofahrt langsamer sein als der Fußweg. Durch die bereits beschriebene, optimistische Zeitschätzung der Agenten wählen diese dennoch in fast jedem zehnten Fall das Automobil. Es gibt aber eine ausreichend häufig auftretenden Zeitnachteil, so dass die globale Reisedauer sinkt.

Betrachtet man das Szenario Altona (Bezirk), so führen die längeren Strecken nun erwartungsgemäß zu einer Reduktion der Reisedauer der Agenten. Diese sinkt aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit nicht so stark wie es für das große Gebiet und den damit auftretenden langen Wegen zu erwarten gewesen wäre. Werden die Wege stichprobenartig untersucht, so wird deutlich, dass es lange Wege (bis 14km) gibt, die nur zu Fuß bewältigt werden müssen, da weder ein Auto noch eine geeignete Radstation zur Verfügung steht. Die global zusammengefasste Reisedauer wird also durch solche Wege stärker beeinflusst als durch den Reisezeitvorteil einer vergleichweisen kurzen Autostrecke zu ihrer andernfalls möglichen Fußstrecke. Die Ergebnisse sind mit diesem Wissen sinnvoll einzuordnen. Es verbleibt aber eine Unzufriedenheit bezüglich der Realitätsnähe, da es wenig sinnvoll erscheint, dass Menschen regelmäßig über 10km zu Fuß zur Arbeit gehen. Dies liegt an den mangelhaften Alternativen an weiteren Verkehrsmitteln in dem Modell.

Vor allem Busse und Bahnen fehlen und würden für lange Strecken genutzt werden, wenn es keine Möglichkeit gäbe diese mit Fahrrad oder Auto zu bestreiten.

Aus diesem Grund gibt es die dritte Versuchsreihe, welche allen Agenten ein Auto zur Verfügung stellt. Es zeigt sich eine sprunghaft steigende Nutzung des MIV. Nun sinkt wie erwartet auch die globale Reisezeit deutlich. Der Teil der Hypothese der global sinkenden Reisedauer ist also für ausreichend große Gebiete zu bestätigen. Sie hängt jedoch deutlich von der Verfügbarkeit der Transportmittel ab und kann für kleine Gebiete nicht nachgewiesen werden. Weiterhin wird angenommen, dass sich der Modal Split dem Vergleichswert der Realdaten annähert. Damit ist der Vergleich des Verkehrsaufkommens gemeint. Dieser berücksichtigt jedoch auch MIV-Mitfahrer sowie den öffentlichen Nahverkehr (vgl. Abb. 2.3). Somit ist es notwendig die drei Modalitäten im Verhältnis zueinander zu betrachten. Zufußgehen macht 28% aus, Fahrradfahren 22% und Autofahren 21%. Radfahren und Autonutzung sind also ca. gleich groß, das Zufußgehen im Vergleich dazu ca. 30% größer. Der Modal Split für die Altona (Bezirk) Versuchsreihen zeigt einen hohen Anteil von 59% für die Fußgänger und zwei ähnlich große Anteile für Radfahren 23% und Autofahren 18%. Es kann also bestätigt werden, dass die beiden Fahrzeuge ähnlich häufig genutzt werden und ihre Nutzung mit jeweils ca. 20% signifikant ist. Sie treten jedoch im Vergleich zum Fußweg geringer auf als in den Daten der Realwelt. Es ist trotzdem vertretbar den simulierten Modal Split als grundsätzliche Annäherung zu beschreiben. Die Hypothese ist also mit oben genannten Vorbehalten zu bestätigen.

7.4 Schlussbetrachtung

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer multimodalen Verkehrssimulation mit der multi-agenten basierten Simulationsplattform MARS. Das Modell sollte dabei als sogenannter *Digitaler Zwilling* auf Daten der Wirklichkeit beruhen. Alle importierten Dateien basieren auf öffentlichen zugänglichen Quellen. Dies betrifft sowohl die geospatialen Daten aus Geoinformationssystemen wie auch Zensusdaten aus Quellen der öffentlichen Hand. Wurden Schwellwerte oder Parametrisierungen gewählt, so wurden diese durch Quellen belegt. Es ist somit grundsätzlich möglich die Simulation für andere Gebiete auch in anderen Städten oder Ländern durchzuführen. Dies hängt natürlich von der verfügbaren Datenlage ab und den dort herrschenden Verkehrssystemen.

Die integrierten Modelle treffen mitunter spezifische Annahmen, die nicht ohne vorheriger Untersuchung für andere Regionen zu übertragen sind. Dafür müssen ggf. die referenzie-

ren Arbeiten studiert werden um Anpassungen vorzunehmen. Das Automodell bspw. bietet als Konfiguration eine Ausführung im Linksverkehr an. Das Verkehrsnachfragemodell hingegen basiert auf statistischen Daten aus Deutschland und ist nicht ohne weiteres auf Länder mit anderen Strukturen und Tagesabläufen zu übertragen. Durch die modulare Gestaltung des Modells können Teile aber mit übersichtlichem Aufwand durch Neuimplementierungen ausgetauscht werden.

Die Integration und Reimplementierung vorhandener Verkehrsmodelle bedarf einer guten und umfangreichen Testung. Verdeckte Annahmen oder fehlerhaftes Verhalten bei seltenen Verkehrssituationen müssen ausgiebig getestet und bereinigt werden um eine komplexe, von Wechselwirkungen beeinflusste Verkehrssimulation stabil laufen lassen zu können. Dies ist durch die in Hypothese 1 durchgeführten Experimente im Allgemeinen und durch viele weitere Tests und Untersuchungen im Speziellen durchgeführt worden. Eine erfolgreiche Bestätigung der ersten Hypothese ist die Grundlage für alle folgenden Experimente dieser Arbeit.

Die zweite Hypothese stellt eine unmittelbare einleuchtende doch sicher umstrittene Behauptung auf. Sie erlangt vor allem deshalb ihre Relevanz, da sie in Zeiten diskutiert wird, wo der Wunsch nach autofreien Innenstädten im Fokus steht, zugleich aber Mobilität und Flexibilität eine weiterhin zunehmende Relevanz für Gesellschaft und Wirtschaft einnehmen. Das hier vorgestellte Verkehrsmodell erlaubt zunächst einmal eine Untersuchung der Frage. Diese kann auch beantwortet werden und durch Ergebnisse hinreichend unterlegt werden. Ob das Modell aber einen ausreichend hohen Grad an Wirklichkeitstreue hat um in einer Debatte überzeugend eingesetzt zu werden, ist unklar. Das Grundkonzept des Zwillingssagenten ist jedenfalls einleuchtend, da die Frage nach Alternativrouten so ähnlich auch in der Wirklichkeit geschieht. Jeder Pendler registriert die Abweichung seiner Reisezeit von der zu Erwartenden und passt diese ggf. an folgenden Tagen an. Eine startgleiche, parallele Zielerreichung ist demzufolge nur noch exakter, da die aktuellen und somit gleichen Verkehrsbedingungen vorliegen.

Die dritte Hypothese ist das Kernstück dieser Arbeit, da sie echte Multimodalität untersucht. Darunter wird eine freie Wahl von verschiedenen, mitunter intermodalen Reiseketten verstanden. Dieses Verhalten konnte durch die Experimente nachgewiesen werden auch wenn sie nicht unbedingt den ursprünglichen Erwartungen entsprechen. Die Ergebnisse zeigen jedoch, wie wichtig die Beschreibung des Kontextes, der Modellgestaltung und -ausprägung schlussendlich sind. Zum Verständnis der Ergebnisse und ihrer Interpretation ist die Auseinandersetzung mit den Modellentscheidungen sogar eine Grundvor-

aussetzung. Der Abstraktionsgrad ist durch das Zusammenspiel verschiedener Modelle und räumlicher Gebiete mitsamt ihrer Geodaten relativ groß. Eine einzelne Analyse von mehreren tausend bis zehntausend Routen ist nicht ohne Weiteres möglich. Es muss also ausreichend Vertrauen in die unterliegenden Systeme und Modelle erbracht werden um daraus ein Gesamtsystem formen zu können. Das Vertrauen hängt auch mit der Größe der Simulationsläufe und ihrer damit einhergehenden Abweichung zu weiteren Durchläufen der selben Konfiguration ab. Es wurde im Verlauf der Versuchsdurchführung mit verschiedenen großen Simulationen hinsichtlich der Agentenzahl experimentiert. Eine systematische Auswertung wurde für die Experimentreihen mit 1000 Agenten durchgeführt. Diese weichen für Simulationen der gleichen Konfiguration im Schnitt nur bis zu 7,8 Prozentpunkte voneinander ab. In der derzeitigen Ausgestaltung an Verkehrsmitteln und ihrer Verfügbarkeit kann das Modell vor allem für die Verkehrsanalyse im ländlichen Raum genutzt werden. Die Verfügbarkeit des öffentlichen Nahverkehrs ist dort gering. Könnten diese integriert werden, so ist das Modell nicht nur für die Betrachtung von Stadtteilen geeignet sondern auch für größere Gebiete des städtischen Raums.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Modell ermöglicht die Darstellung von Multimodalität. Die Unterschiede der genutzten Transportmittel konnten durch ihren spezifischen Reisezeitvorteil beschrieben werden. Das Modell erlaubt die Untersuchung von verschiedenen großen Stadtgebieten hinsichtlich multimodalem Verkehrsverhalten. Die Erzeugung des Modal Split ermöglicht die Interpretation komplexerer Szenarien. Mit der Zuversicht, dass dieses Modell als Werkzeug in der Verkehrsforschung dienen kann, wird die Betrachtung abgeschlossen.

8 Ausblick

Multimodalität beschreibt die Möglichkeit zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln frei zu wählen und sie ggfs. zu kombinieren. Welche Modalitäten zur Verfügung stehen, hängt von Stadt, Region und Zeitalter ab. Durch die Mobilitätswende werden weitere Fahrzeugtypen hinzukommen. Um bspw. die *letzte Meile* abzubilden wurden in 2019 deutschlandweit Elektro-Leihroller in den Verkehrsmix integriert. Aber auch klassische Verkehrsmittel wie der Schienenverkehr nehmen im Vergleich zum MIV wieder eine stärkere Rolle ein. Das Modell ist dafür konzipiert worden in der Zukunft durch weitere Modaltypen ergänzt zu werden. Der Agentenentwurf, das Verkehrsnachfragemodell und die in den Hypothesen vorgestellte Szenarien könnten dafür in gleichbleibender Form genutzt werden.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Verkehrsmittel basieren alle auf einem Straßengraphen, welcher Raum für zukünftige Entwicklungen bietet. Die vereinfachenden Annahmen, welche getroffen wurden, sind zunächst dem Mangel an detaillierteren Datenquellen geschuldet. Bezüglich des Graphen wären das vor allem Straßenmarkierungen, Ampelschaltungen und Verkehrszeichen. Basierend auf diesen Daten könnte eine eigenständige Kreuzungskomponente entwickelt werden, welche die räumliche Ausdehnung berücksichtigt und diese mit Abbiegespuren darstellt. Die nun spurgetreue und über mehrere Kreuzungsknoten hinweg koordinierte Modellierung von Ampeln wird vermutlich erheblichen Einfluss auf die Wartezeiten von Fahrzeugen an den Kreuzungen haben. Unabhängig von äußeren Daten könnte die Graphenkomponente in dem Sinne weiterentwickelt werden, dass sie parallele Strukturen für Fuß-, Radweg und Straße enthält zwischen denen dynamisch gewechselt werden kann. Dies ist vor allem für die Weiterentwicklung des Radfahrens bedeutsam, da ein Wechsel des Wegetyps im Verlauf einer Route hier durchaus mehrfach auftritt. Schließlich könnte auch der Zu- und Ausstieg aus dem Graphen nicht nur an Knoten sondern ebenfalls an Kanten, somit an beliebigen Punkten im Graph, stattfinden. Bei allen Weiterentwicklungen der Routensuche muss die Berechnungszeit berücksichtigt werden, da diese im bereits vorliegenden Modell einen Großteil der Rechenzeit in Anspruch nimmt, kann sie durch einen höheren Grad an Komplexität noch größere Auswirkungen im Bezug auf die Modellgröße haben. Techniken um die Algorithmen

zu beschleunigen sind daher ein weiterer wichtiger Entwicklungsschwerpunkt dieses Modells (Kirchler, 2013). Im vorliegenden Modell wurden die Modalrouten einzeln gesucht und anschließend verknüpft. Aufgrund von Dynamiken zwischen den Verkehrsmitteln, z.B. hinsichtlich zeitabhängiger Angebote des ÖPNV, ist eine Routensuche sinnvoll, welche die multimodale Natur der verfügbaren Transportsysteme widerspiegelt. Dib et al. (2017) stellen einen solchen Algorithmus vor, welcher bezüglich verschiedener Kriterien (bspw. Anzahl Stops oder möglichst kurze Fußwege) das Optimierungsproblem zu lösen versucht. Eine solche Weiterentwicklung der Routensuche kann insbesondere bei Hinzunahme weiterer Modaltypen an Relevanz gewinnen.

Die Integration externer Daten spielt auch bei den weiteren Komponenten der Umwelt eine Rolle, vor allem hinsichtlich des Zieles einer hohen Modellähnlichkeit zur Wirklichkeit (Stichwort: *digitaler Zwilling*). So könnte die Robustheit gegenüber mangelhaften Daten vergrößert werden, diese womöglich automatisiert berichtet oder interpretiert werden. Als Beispiel kann der Parkraumlayer dienen, welcher z.Z. nur Auskunft über die Größe der Parkfläche gibt. Möglicherweise könnten anhand exemplarischer Daten zu der Strukturen größerer Parkraumflächen, diese als Grundlage für einen Algorithmus dienen, welcher eine exaktere Kapazitätsberechnung erlaubt. Auch Parkhäuser wurden bisher nicht von reinen Parkflächen unterschieden. Daten zur Auslastung in Abhängigkeit von Tageszeiten wären hier eine sinnvolle Ergänzung. Zur Organisation der Auslastung von Parkflächen könnte eine Parkraumbewirtschaftung eingeführt werden (Ellis et al., 1974). Diese könnte als Push-Faktor Anreize setzen, die Autowahl unattraktiver zu gestalten und somit den Modal Split hin zu ökologischen Transportmitteln zu beeinflussen (Randelhoff, 2020).

Nicht nur die Umweltkomponenten bieten Raum zur Entwicklung, auch die Agenten können um weitere Aspekte ergänzt werden. Die Entscheidungen des Agenten sollten ihn bezüglich seines zukünftigen Verhaltens beeinflussen. Um Lernverhalten zu implementieren bedarf es aber längere Zeiträume der Betrachtung. In diesem Zuge wären z.B. Wochenaktivitätspläne für Verkehrsnachfragemodelle hilfreich.

Mikroskopische Verkehrsnachfragemodelle bilden das Verkehrsverhalten von Personen in einer simulierten Umgebung ab und helfen, das Verhalten zu verstehen und Planungsmaßnahmen zu bewerten. Der Betrachtungszeitraum beträgt in der Regel einen Tag. Durch diese zeitliche Beschränkung werden jedoch einige Verhaltensaspekte vernachlässigt: Personen handeln von Tag zu Tag nicht komplett unabhängig voneinander. Der durch empirische Studien

belegte Informationsgewinn der Betrachtung längerer Zeiträume bleibt in der Verkehrsnachfragemodellierung bisher oft unberücksichtigt.

—Hilgert (2019)

Lernverhalten muss dabei nicht nur individuell als Antwort auf eigene Entscheidung verstanden werden, sondern kann auch als Anpassung des Verhaltens in Hinsicht auf andere gesehen werden (Shoham and Leyton-Brown, 2008). Dies führt zum Themenfeld der Kooperation. Alle Modaltypen des Mitgenommen-werdens basieren auf einer Form der Abstimmung. Zur Umsetzung könnten spieletheoretische Ansätze zur Kooperation ausprobiert werden (Wenjian, 2011). Soziale Kooperation und spatiale Koordination sind eng miteinander verknüpft (Helbing and Molnár, 1995). Diese Erfahrungen sind vor allem in Zeiten einer Pandemie zu beobachten. Mit der Größe des Verkehrsaufkommens steigt auch die Notwendigkeit nach Kooperation und nach Wahlmöglichkeiten angemessener Verkehrsmittel.

Im Zuge aller Ideen bleibt die Detailtiefe hinsichtlich der Performanz ein zu berücksichtigendes Maß. Wenn untersucht wird, wie groß der Einfluss einer feingranulareren Modellbeschreibung im Vergleich zum Ausgangsmodell ist, kann eben dieses für zukünftige Erweiterungen als Referenz genutzt werden.

Literaturverzeichnis

- Ahrens, G.-A., Aurich, T., Böhmer, T., Klotzsch, J., and Pitrone, A. (2010). Interdependenzen zwischen Fahrrad- und ÖPNV-Nutzung. 49(0):265.
- Ahrens, G.-A., Wittwer, R., Hubrich, S., Wittig, S., and Liefke, F. (2016). Sonderauswertung zum Forschungsprojekt „Mobilität in Städten – SrV 2013“ Städtevergleich. Technical report.
- Andor, M. A., Frondel, M., Horvath, M., Larysch, T., and Ruhrort, L. (2020). Präferenzen und Einstellungen zu viel diskutierten verkehrspolitischen Maßnahmen: Ergebnisse einer Erhebung aus dem Jahr 2018. *List Forum für Wirtschafts- und Finanzpolitik*, 45(3):255–280.
- Architektenkammer Baden-Württemberg (2012). Verordnung des Ministeriums für Verkehr und Infrastruktur über Garagen und Stellplätze (Garagenverordnung - GaVO). 1997(15):1–12.
- Banos, A., Chardonnel, S., Lang, C., Marilleau, N., and Thevenin, T. (2005). MIRO : une approche multi-agents de la ville en mouvement. (March).
- Behrisch, M., Erdmann, J., and Krajzewicz, D. (2010). Adding intermodality to the microscopic traffic simulation SUMO. *11th Middle Eastern Simulation Multiconference, MESM 2010 - 1st GAMEON-ARABIA Conference, GAMEON-ARABIA 2010*, pages 59–63.
- Bischoff, P. and Strahl, R. (2014). Bewohnerparken in Altona-Altstadt und Ottensen. Technical report, SHP Ingenieure.
- Briem, L., Heilig, M., Klinkhardt, C., and Vortisch, P. (2019). Analyzing OpenStreetMap as data source for travel demand models A case study in Karlsruhe. *Transportation Research Procedia*, 41:104–112.
- Bundesministerium für Verkehr, I. u. T. (2016). OPERMO Handbuch - Operationalisierung der Multimodalität im Personenverkehr in Österreich.

- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2017). *Mobilität in Deutschland - Wissenschaftlicher Hintergrund*.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2018). *Mobilität in Deutschland 2017 - Kurzreport Hamburg und Metropolregion*. (November).
- Cheng, L., Yarlagadda, R., Fookes, C., and Yarlagadda, P. K. D. V. (2014). A review of methodologies behaviours in modelling pedestrian group. *World Journal of Mechanical Engineering*, 1(1):2–13.
- Dallmeyer, J. (2014). *Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt*. Springer, Frankfurt am Main, Deutschland.
- Dalski, J. (2014). Entwurf einer generischen Agentenarchitektur. pages 1–11.
- de Souza, F., Verbas, O., and Auld, J. (2019). Mesoscopic traffic flow model for agent-based simulation. *Procedia Computer Science*, 151(2018):858–863.
- Dib, O., Manier, M. A., Moalic, L., and Caminada, A. (2017). A multimodal transport network model and efficient algorithms for building advanced traveler information systems. *Transportation Research Procedia*, 22(2016):134–143.
- Ellis, R. H., Bennett, J. C., and Rassam, P. R. (1974). Parking Systems Analysis: An Overview. *SIGSIM Simul. Dig.*, 6:42–50.
- Ernst, T., Scheuerle, S., and Seidenstricker, S. (2013). *Strategien von Städten zur Elektromobilität*, pages 351–364. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Foytik, P., Jordan, C., and Robinson, R. M. (2017). Exploring Simulation Based Dynamic Traffic Assignment with a Large-Scale Microscopic Traffic Simulation Model. *Proceedings of the 50th Annual Simulation Symposium*.
- Glake, D., Weyl, J., Lenfers, U. A., and Clemen, T. (2019). SmartOpenHamburg Verkehrssimulation: Automatisierte OpenData Integration für Multi-Agenten Simulation mit MARS. In Wittmann, J., editor, *Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften*. Shaker Verlag. ISBN: 978-3-8440-6981-5.
- Greenberg, H. (1959). An analysis of traffic flow. *Operations Research*, 7(1):79–85.
- Greenshields, B. D. (1935). A study of traffic capacity. In *Proceedings of the highway research board*, volume 14, pages 448–477.

- Gronalt, M., Hoffer, L., Humpl, D., Käfer, A., Peherstorfer, H., Posset, M., Pripfl, H., and Starkl, F. (2010). *Handbuch Intermodaler Verkehr. Kombiniertes Verkehr: Schiene - Straße - Binnenwasserstraße*. Berichte aus der Logistik. Bohmann.
- Groth, S. (2019). *Von der automobilen zur multimodalen Gesellschaft?* Transcript Verlag. ISBN: 978-3-8376-4793-8.
- Hamburg Bezirksamt Altona (2010). Atlas Altona. Technical report, Bezirksamt Altona, Hamburg, Altona.
- Hamburg Bezirksamt Altona (2011). Zukunftsplan Altona - Bürger entwickeln ein Leitbild für die Zukunft. Technical report, Bezirksamt Altona, Hamburg, Altona.
- Helbing, D. and Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51(5):4282–4286.
- Hilgert, T. (2019). *Erstellung von Wochenaktivitätenplänen für Verkehrsnachfragemodelle*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
- Jocher, T. and Loch, S. (2010). *RAUMPILOT Grundlagen*. Wüstenrot Stiftung, Stuttgart, Zürich.
- Kagerbauer, M. (2010). *Mikroskopische Modellierung des Außenverkehrs eines Planungsraums*. PhD thesis, Karlsruher Institut für Technologie.
- Kesting, A., Treiber, M., and Helbing, D. (2009). Agents for Traffic Simulation. pages 325–356.
- Kirchler, D. (2013). *Efficient routing on multi-modal transportation networks. Data Structures and Algorithms*. Phd thesis, Ecole Polytechnique, Palaiseau.
- Lighthill, M. J. and Graham, W. (1955). On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 229(1178):317–345.
- Löffler, A. (2019). *Smart Rescue im urbanen Raum : Ein agentenbasiertes Modell mit MARS zur Bestimmung der Helferanzahl innerhalb Hamburgs*. Masterarbeit, HAW Hamburg.
- Lopez, P. A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flotterod, Y. P., Hilbrich, R., Lucken, L., Rummel, J., Wagner, P., and Wiebner, E. (2018). Microscopic Traffic Simulation using SUMO. *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 2018-Novem:2575–2582*.

- Lunenfeld, H. and Alexander, G. (1990). *A Users' Guide to Positive Guidance. 3rd Edition. Final Report.*
- Mallig, N. (2019). *Modellierung der Stabilität bei der Verkehrsmittelwahl in einem mikroskopischen Verkehrsnachfragemodell.* PhD thesis, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Manson, S. M., Sun, S., and Bonsal, D. (2012). Agent-Based Modeling and Complexity. *Agent-based Models of Geographical Systems*, pages 125–139.
- Mulack, K. (2020). *Multiagenten Simulation von Fahrradfahrern im Kontext urbaner Verkehrsdynamik.* Masterarbeit, Universität Hamburg.
- Nagel, K. and Schreckenberg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 2(12):2221–2229.
- Newell, G. F. (1961). Nonlinear effects in the dynamics of car following. *Operations Research*, 9(2):209–229.
- Nguyen, Q. T., Bouju, A., and Estraillier, P. (2012). Multi-agent Architecture with Space-time Components for the Simulation of Urban Transportation Systems. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 54:365–374.
- Olstam, J. J. and Tapani, A. (2004). Comparison of Car-following models. *VTI meddelande 960A*.
- Parunak, H. V. D. (2000). Agents in Overalls: Experiences and Issues in the Development and Deployment of Industrial Agent-Based Systems. *International Journal of Cooperative Information Systems*, 09(03):209–227.
- Randelhoff, M. (2018). Was ist der Modal Split und was sagt er aus? <https://www.zukunft-mobilitaet.net/167600/analyse/was-ist-der-modal-split-grenzen-verkehrsmittelwahl-einschraenkungen-wege-verkehrsleistung#fn-167600-1>. Last checked on 20.03.2020.
- Randelhoff, M. (2020). Zum Verhältnis von Push- und Pull-Maßnahmen im Kontext der Flächenfrage. <https://www.zukunft-mobilitaet.net/171460/urbane-mobilitaet/angebotsverbesserungen-ohne-einschraenkungen-push-and-pull-verkehr/>. Last checked on 20.05.2020.
- Reimann, M. (2007). Simulationsmodelle im Verkehr. Technical report, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe.

- Schadschneider, A. (2004). Physik des Straßenverkehrs.
- Shoham, Y. and Leyton-Brown, K. (2008). Multiagent systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and logical foundations. *Multiagent Systems: Algorithmic, Game-Theoretic, and Logical Foundations*, 9780521899:1–483.
- Smith, L., Beckman, R., Baggerly, K., Anson, D., and Williams, M. (1995). TRANSIMS: Transportation analysis and simulation system. Technical report, Los Alamos National Lab., NM (United States).
- Sokolowski, J. A. and Banks, C. M. (2009). *Principles of Modeling and Simulation: A Multidisciplinary Approach*. J. Wiley and Sons Canada.
- Statista (2018). Arbeitslosenquote in Hamburg 2018/2019 | Statistik. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/762326/umfrage/arbeitslosenquote-in-hamburg/>. Last checked on 20.03.2020.
- Statistikamt Nord (2018). *Statistisches Jahrbuch Hamburg 2017/2018*.
- Tchappi Haman, I., Kamla, V. C., Galland, S., and Kamgang, J. C. (2017). Towards an Multilevel Agent-based Model for Traffic Simulation. *Procedia Computer Science*, 109(2016):887–892.
- Teege, G. (2001). Geodaten im Internet. *Informatik-Spektrum*, 24(4):193–206.
- Thomson, R. W., Hoschopf, H., Fagerlind, H., Martinez, A. V., Amengual, A., Naing, C. L., Hill, J., Hoschopf, H., Dupre, G., Bisson, O., Kelkka, M., van der Horst, R., and Garcia, J. (2006). Roadside infrastructure for safer European roads: D06 European best practice for roadside design: guidelines for roadside infrastructure on new and existing roads.
- Treiber, M., Hennecke, A., and Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E - Statistical Physics, Plasmas, Fluids, and Related Interdisciplinary Topics*, 62(2):1805–1824.
- Treiber, M. and Kesting, A. (2010a). An open-source microscopic traffic simulator. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2(3):6–13.
- Treiber, M. and Kesting, A. (2010b). *Verkehrsdynamik und -simulation*. Springer, Dresden, Germany.
- Treiber, M. and Kesting, A. (2013). *Traffic flow dynamics: Data, models and simulation*. Number January 2013. Springer, Dresden, Germany.

- Umweltbundesamt (2014). Wegevergleich: von Tür zu Tür im Stadtverkehr. <https://www.umweltbundesamt.de/bild/wegevergleich-von-tuer-zu-tuer-im-stadtverkehr>. Last checked on 20.03.2020.
- von der Ruhren, S., Rindsfüser, G., and Beckmann, K. J. (2005). Bestimmung multimodaler Personengruppen. Schlussbericht. Technical report, TH Aachen, Institut für Stadtbauwesen und Stadtverkehr; TH Karlsruhe, Institut für Verkehrswesen, Aachen.
- Weichert, T. (2007). Der Personenbezug von Geodaten. *Datenschutz und Datensicherheit - DuD*, 31(2):113–119.
- Weidmann, U. (1993). Transporttechnik der Fussgänger, Transporttechnische Eigenschaften des Fussgängerverkehrs (Literturauswertung). *IVT, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau*, (90):110.
- Wenjian, Y. (2011). *Agent-based modeling of human cooperation and coordination in social systems*. Ph.d. thesis.
- Weyl, J. (2019). *Developing a generic multi-agent car model to simulate road traffic with MARS*. Master thesis, HAW Hamburg.
- Weyl, J., Glake, D., and Clemen, T. (2018). Agent-based Traffic Simulation at City Scale with MARS. *Proceedings of the 2018 Spring Simulation Multiconference*, page 9.
- Wiedemann, R. (1974). Simulation des Straßenverkehrsflusses.
- Wiedemann, R. (1996). *Traffic Flow Model*.
- Winter, S. (1998). Bridging vector and raster representation in GIS. *GIS: Proceedings of the ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems*, Part F1292:57–62.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „— bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] — ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: _____

Vorname: _____

dass ich die vorliegende Masterarbeit – bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Entwicklung eines agentenbasierten multimodalen Verkehrsmodells mit MARS

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort

Datum

Unterschrift im Original