



# **Simulation von Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten**

Von der Fakultät für Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften  
der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
zur Erlangung des Grades und Titels eines

**Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**

angenommene Dissertation

**von Herrn Klaas Arne Dähmann**

geboren am 22. Juni 1989 in Oldenburg

**Gutachter**

apl. Prof. Dr.-Ing. Jürgen Sauer

Prof. Dr. Oliver Kramer

**Tag der Disputation**

18. Februar 2022

# Danksagung

Ich verrate kein Geheimnis, wenn ich feststelle, dass das Anfertigen dieser Arbeit ohne die Unterstützung und den Rückenwind vieler Personen nicht in dieser Form möglich gewesen wäre.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Jürgen Sauer, der mir in all diesen Jahren stets mit wertvoller, konstruktiver Kritik und sinnvollen Verbesserungsvorschlägen zur Seite stand. Auch über die Arbeit an dieser Dissertation hinaus möchte ich mich für die sehr vertrauensvolle Zusammenarbeit sowohl in der Gestaltung universitärer Lehre als auch in der Projektarbeit, die mir immer in positiver Erinnerung bleiben werden, ganz herzlich bei Dir bedanken.

Ebenso möchte ich mich bei den weiteren Mitgliedern meiner Prüfungskommission, Oliver Kramer, Jorge Marx Gómez und Tobias Brandt, für ihre hilfreichen Anregungen bereits während der Entstehung dieser Arbeit sowie ihre Gutachten beziehungsweise Beiträge zur Disputation bedanken.

Weiterhin danke ich den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern im Projekt NEMo, dabei insbesondere Martina Jahns und Ute Samland für ihre uneigennütige Bereitstellung der sozialwissenschaftlichen Daten und Modelle, welche die systematische Evaluation dieser Arbeit in dieser Form ermöglicht haben, und Alexander Sandau für die technische Unterstützung hinsichtlich der Schnittstelle zum während des Projekts entwickelten Fahrkreis-System.

Bei meinen Kolleginnen und Kollegen aus der Abteilung Systemanalyse und -optimierung der Universität Oldenburg und der ehemaligen, nun beim DLR angesiedelten Gruppe Kooperierende Mobile Systeme des OFFIS e.V. möchte ich mich für eine Kollegialität und Hilfsbereitschaft bedanken, die ihresgleichen sucht und die mit der Selbstverständlichkeit, mit der Zeit für sowohl fachliche Diskussionen als auch für Freizeitaktivitäten hergegeben wird, weit über das Erwartbare hinausgeht.

Zuletzt möchte ich meiner Familie, die das Thema dieser Arbeit mittlerweile vermutlich so gut kennt wie ich selbst, danken, auch wenn Dank alleine ihrem Beitrag zu meinem Werdegang und dem Entstehen dieser Arbeit mit Sicherheit nicht annähernd gerecht wird. Ohne meine Eltern Michaela und Arno und meine Frau Merle wäre fraglich, ob es für mich überhaupt zum Abitur gereicht hätte, geschweige denn zur Promotion. Euer Rückhalt und Zuspruch, eure Geduld und Fürsorge und euer bedingungsloses Vertrauen in mich sind der Grund dafür, dass ich mich heute an diesem Punkt befinden darf.

Klaas Dählmann  
Oldenburg, im Februar 2022



*Für meine Familie*



# Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der Verkehrswende und ermöglicht durch die ubiquitäre Verfügbarkeit von mobilem Internet entstand in den letzten Jahren eine Vielzahl neuer Mobilitätsangebote, wie beispielsweise Ride- oder Carsharing, die sich als Alternativen zum Individualverkehr und den etablierten Angeboten des öffentlichen Verkehrs präsentieren. Um die Akzeptanz und Nutzung solcher Mobilitätsangebote bereits frühzeitig während ihrer Entwicklung einschätzen zu können, wird auf Methoden und Ergebnisse sozialwissenschaftlicher Primärforschung zurückgegriffen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher die Forschungsfrage untersucht, wie sozialwissenschaftliche Primärforschung zu Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten mit einem entsprechend zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem unterstützt werden kann.

Dazu werden nach der Analyse des bisherigen Stands der Technik Anforderungen an das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem erhoben und ein entsprechendes Konzept erstellt. Aus struktureller Sicht wird dazu, auf Grundlage verkehrsplanerischer, technisch-informatischer sowie sozialwissenschaftlicher Ansätze, eine agentenbasierte Architektur als Simulationsmodell formuliert. Aus funktionaler Sicht wird ein auf Fuzzyinferenz basierendes, generisches Inferenzmodell entwickelt, das für das nutzenbasierte Entscheidungsverhalten der Agenten herangezogen wird. Die systematische Erstellung eines solchen Fuzzyinferenzsystems auf Grundlage verschiedener sozialwissenschaftlicher Modelle wird dazu durch die Entwicklung einer geeigneten Methode unterstützt. Weiterhin werden Umfang und Inhalt einer zur Durchführung eines Simulationsexperiments erforderlichen Szenariobeschreibung definiert.

Im Rahmen eines softwaretechnischen Entwurfs und einer prototypischen Implementierung wird das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem als Multiagentensystem in Java umgesetzt. Der umgesetzte Prototyp implementiert dazu zwei unterschiedliche Schnittstellen, die zur Erzeugung der durch die Simulationsagenten zu bewertenden und nutzenden Mobilitätsangebote eingesetzt werden.

Die Evaluation der entwickelten Konzepte erfolgt anhand des Prototyps, indem dessen Eignung hinsichtlich der aufgeworfenen Forschungsfrage, dessen Performance und dessen Anforderungserfüllung systematisch und reproduzierbar überprüft werden. Die Evaluation der Eignung erfolgt dazu auf Grundlage zweier Fallstudien mit sowohl einem quantitativen als auch einem qualitativen sozialwissenschaftlichen Modell. Insgesamt kann gezeigt werden, dass der Prototyp und die ihm zugrunde liegenden Konzepte zur Simulation von Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten geeignet sind und eingesetzt werden können.



# Abstract

In light of the transition towards more sustainable mobility and made possible by the ubiquitous availability of mobile internet, a significant number of new mobility services, such as ride or car sharing, have emerged in recent years and present themselves as alternatives to both private transport and the established public transport services. In order to be able to assess the acceptance and use of such mobility options at an early stage during their development, methods and results of socio-scientific field research are used.

This thesis therefore investigates the research question of how socio-scientific field research on acceptance and use of mobility services can be supported with an accordingly developed mobility simulation system.

For this purpose and after the analysis of the current state of the art, requirements for the mobility simulation system to be developed are determined and a corresponding concept is developed. From a structural point of view and based on approaches from traffic planning, computer science and the social sciences, an agent-based architecture is formulated to be used as the simulation model. From a functional point of view, a generic inference model based on fuzzy inference is developed, which is used for the utility-based decision making of the agents. The systematic creation of such a fuzzy inference system based on various socio-scientific models is supported by the development of a suitable, auxiliary method. Furthermore, the scope and content of a scenario description required to perform a simulation experiment are defined.

Through a technical design and a prototypical implementation, the mobility simulation system is realized as a multi-agent system in Java. The prototype implements two different interfaces used to generate the mobility options to be evaluated and subsequently used by the simulation agents.

The evaluation of the developed concepts is carried out using the realized prototype by systematically and reproducibly testing its suitability regarding the research question, its performance and its fulfillment of the requirements. The evaluation of the suitability is based on two case studies, one using a quantitative and one using a qualitative socio-scientific model. Overall, it can be shown that the prototype and its underlying concepts are suitable and can be used to simulate the acceptance and use of mobility services.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xvii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	2
1.2 Forschungsfragen . . . . .	4
1.3 Ziele der Arbeit . . . . .	6
1.4 Vorgehen und Aufbau der Arbeit . . . . .	7
<b>2 Grundlagen</b>	<b>11</b>
2.1 Verkehrsplanung und Mobilitätsforschung . . . . .	11
2.1.1 Personenverkehr . . . . .	12
2.1.2 Mobilität . . . . .	14
2.1.2.1 Mobilitätsbedürfnisse und -bedarfe . . . . .	15
2.1.2.2 Mobilitätskultur . . . . .	16
2.1.3 Verkehrsmodelle . . . . .	18
2.2 Simulation . . . . .	21
2.2.1 Unterscheidungsmerkmale für Simulationsmodelle . . . . .	23
2.2.2 Entwicklung und Durchführung einer Computersimulation . . . . .	24
2.3 Künstliche Intelligenz . . . . .	26
2.3.1 Der intelligente Agent . . . . .	27
2.3.1.1 Aufgabenumgebungen für intelligente Agenten . . . . .	28
2.3.1.2 Klassen intelligenter Agenten . . . . .	30
2.3.1.3 Agentenarchitekturen . . . . .	32
2.3.2 Verfahren der Computational Intelligence . . . . .	34
2.3.2.1 Fuzzylogik und Fuzzyinferenz . . . . .	34
2.3.2.2 Künstliche neuronale Netze . . . . .	37
2.3.2.3 Bayessche Netze . . . . .	39
2.3.2.4 Entscheidungsbäume . . . . .	40
2.4 Entscheiden und Handeln in den Sozialwissenschaften . . . . .	41
2.4.1 Soziologische Theorien und Modelle . . . . .	42
2.4.1.1 Kapital, Habitus und Felder . . . . .	42

2.4.1.2	Structuration Theory . . . . .	43
2.4.1.3	Makro-Mikro-Makro-Modell . . . . .	44
2.4.2	Psychologische Theorien und Modelle . . . . .	45
2.4.2.1	Social Cognitive Theory . . . . .	45
2.4.2.2	Reasoned Action Approach . . . . .	48
2.4.3	Informationswissenschaftliche Theorien und Modelle . . . . .	49
2.4.3.1	Technology-to-Performance Chain . . . . .	50
2.4.3.2	Lazy User Theory . . . . .	51
2.4.3.3	Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2 . . . . .	52
2.4.4	Wirtschaftswissenschaftliche Theorien und Modelle . . . . .	54
2.4.4.1	Homo Oeconomicus und rationale Entscheidung . . . . .	55
2.4.4.2	Verhaltensökonomie . . . . .	55
<b>3</b>	<b>Verwandte Arbeiten</b>	<b>57</b>
3.1	Methode zur Erhebung der verwandten Arbeiten . . . . .	57
3.2	Vorbereitung der Literatursuche . . . . .	59
3.3	Stand der Technik . . . . .	61
3.3.1	ALBATROSS . . . . .	61
3.3.2	CEMDAP . . . . .	62
3.3.3	TASHA . . . . .	63
3.3.4	MATSim-T . . . . .	64
3.3.5	SimMobility . . . . .	65
3.3.6	C-TAP . . . . .	66
3.3.7	InnoMind . . . . .	67
3.3.8	TAPAS . . . . .	68
3.4	Handlungsbedarf . . . . .	69
<b>4</b>	<b>Anforderungsanalyse</b>	<b>75</b>
4.1	Anforderungserhebung . . . . .	75
4.1.1	Anforderungen aus dem Stand der Technik . . . . .	76
4.1.2	Anforderungen aus den Forschungsdisziplinen . . . . .	77
4.1.3	Anforderungen der Stakeholder . . . . .	80
4.2	Erfüllbarkeit von Zielen und Forschungsfragen . . . . .	83
<b>5</b>	<b>Konzeptentwicklung</b>	<b>85</b>
5.1	Modellbildung . . . . .	86
5.1.1	Aktivitäten als Ursache für Mobilitätsbedarfe und Verkehr . . . . .	86
5.1.2	Modellelemente für das Simulationsmodell . . . . .	88
5.1.2.1	Modellelemente aus der Verkehrsplanung . . . . .	89
5.1.2.2	Modellelemente aus der Mobilitätsforschung . . . . .	92
5.1.2.3	Modellelemente aus den Sozialwissenschaften . . . . .	93

---

5.1.3	Agentenmodell . . . . .	96
5.1.3.1	Definition der Agentenfunktion und -umgebung . . . . .	97
5.1.3.2	Bestimmung der Agentenklasse und -architektur . . . . .	100
5.2	Entscheidungsfindung . . . . .	103
5.2.1	Einordnung in die Entscheidungstheorie . . . . .	103
5.2.2	Verfahren zur Entscheidungsfindung . . . . .	105
5.2.2.1	Kriterien an das Entscheidungsverfahren . . . . .	106
5.2.2.2	Auswahl eines Entscheidungsverfahrens . . . . .	108
5.2.3	Fuzzyinferenz zur Entscheidung für Mobilitätsoptionen . . . . .	112
5.2.4	Methode zur Erstellung eines Fuzzyinferenzsystems . . . . .	115
5.3	Beschreibung eines Simulationsszenarios . . . . .	120
<b>6</b>	<b>Umsetzung</b>	<b>125</b>
6.1	Entwurf des Prototyps . . . . .	126
6.1.1	Grobentwurf der Subsysteme . . . . .	126
6.1.1.1	Grundlegende Gestaltungsentscheidungen . . . . .	126
6.1.1.2	Systemarchitektur und Schnittstellen . . . . .	130
6.1.1.3	Ablauf eines Simulationsschritts zwischen den Komponenten	132
6.1.1.4	Zustände eines Agenten . . . . .	134
6.1.1.5	Phasen eines Simulationsschritts innerhalb eines Agenten . .	136
6.1.2	Feinentwurf der Komponenten . . . . .	139
6.1.2.1	Technologiestack und Datenformate . . . . .	139
6.1.2.2	Klassenstruktur . . . . .	141
6.2	Implementierung des Prototyps . . . . .	147
6.2.1	Anbindung von Mobilitätsdienstleistern . . . . .	147
6.2.2	Datenstruktur einer Szenariobeschreibung . . . . .	150
6.2.2.1	Datenstruktur einer FCL-Datei . . . . .	151
6.2.2.2	Datenstruktur einer Startszene . . . . .	154
6.2.3	Grafische Benutzeroberfläche des Prototyps . . . . .	156
<b>7</b>	<b>Evaluation</b>	<b>159</b>
7.1	Untersuchung der Eignung des Prototyps . . . . .	160
7.1.1	Fallstudie mit einem quantitativen Modell . . . . .	161
7.1.1.1	Erstellung des Fuzzyinferenzsystems . . . . .	162
7.1.1.2	Ergebnisse der Fuzzyinferenz . . . . .	165
7.1.1.3	Diskussion . . . . .	168
7.1.2	Fallstudie mit einem qualitativen Modell . . . . .	169
7.1.2.1	Erstellung der Szenariobeschreibung . . . . .	170
7.1.2.2	Simulationsverhalten und -ergebnisse . . . . .	176
7.1.2.3	Diskussion . . . . .	185
7.2	Performance des Prototyps . . . . .	187
7.2.1	Vergleich der angebundenen Mobilitätsdienstleister . . . . .	187

---

7.2.2	Laufzeiten der Komponenten . . . . .	189
7.2.2.1	Laufzeiten des Fuzzyinferenzsystems . . . . .	190
7.2.2.2	Laufzeiten der Schnittstellen der Mobilitätsdienstleister . . .	190
7.2.2.3	Laufzeiten der grafischen Benutzeroberfläche . . . . .	192
7.3	Anforderungserfüllung des Prototyps . . . . .	193
7.3.1	Anforderungen an das Mobilitätssimulationssystem . . . . .	194
7.3.2	Anforderungen an das Simulationsmodell . . . . .	195
7.3.3	Anforderungen an die Entscheidungsfindung . . . . .	196
<b>8</b>	<b>Fazit</b>	<b>199</b>
8.1	Ergebnisse und wissenschaftlicher Beitrag . . . . .	200
8.2	Grenzen der entwickelten Lösung . . . . .	202
8.3	Reflexion der Methodik . . . . .	203
8.4	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf . . . . .	204
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>207</b>
	<b>Anhang A Fuzzyinferenzsystem</b>	<b>225</b>
	<b>Anhang B Interviewzitate</b>	<b>229</b>
	<b>Anhang C Szenariobeschreibung</b>	<b>231</b>
	<b>Anhang D Zugehörigkeitsfunktion Nacht</b>	<b>239</b>
	<b>Glossar</b>	<b>243</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>247</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau der Arbeit . . . . .	8
2.1	Bedürfniskontinuum für Mobilität . . . . .	16
2.2	Mehrebenen-Modell der Mobilitätssozialisation . . . . .	17
2.3	Simulationspipeline . . . . .	25
2.4	Agent und Umwelt . . . . .	28
2.5	Modell eines künstlichen Neurons . . . . .	37
2.6	Stratifikationsmodell des Handelnden . . . . .	44
2.7	Makro-Mikro-Makro-Modell . . . . .	44
2.8	Selbstwirksamkeitserwartung und Ergebniserwartung . . . . .	47
2.9	Social Cognitive Theory . . . . .	47
2.10	Reasoned Action Approach . . . . .	48
2.11	Technology-to-Performance Chain . . . . .	50
2.12	Lazy User Theory . . . . .	52
2.13	Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2 . . . . .	53
4.1	Anforderungsschablone für funktionale Anforderungen . . . . .	76
4.2	Anwendungsfalldiagramm der Stakeholder und Anwendungsfälle . . . . .	81
4.3	Anforderungsdiagramm der Forschungsfragen, Ziele und Anforderungen . . . . .	84
5.1	Modellelemente aus der Verkehrsplanung . . . . .	91
5.2	Modellelemente aus der Mobilitätsforschung . . . . .	93
5.3	Modellelemente aus den Sozialwissenschaften . . . . .	96
5.4	Nutzenmaximierende Agentenarchitektur . . . . .	102
5.5	Dreistufiges, generisches Inferenzmodell des Fuzzyinferenzsystems . . . . .	112
5.6	Methode zur Erstellung eines Fuzzyinferenzsystems . . . . .	120
5.7	Struktur und Inhalt einer Szenariobeschreibung . . . . .	122
6.1	Komponentendiagramm der Systemarchitektur . . . . .	131
6.2	Sequenzdiagramm eines Simulationsschritts . . . . .	134
6.3	Zustandsdiagramm eines Simulationsagenten . . . . .	135
6.4	Aktivitätsdiagramm innerhalb eines Simulationsschritts eines Agenten . . . . .	137
6.5	Paketdiagramm des Prototyps . . . . .	142
6.6	Klassendiagramm der Laufzeitumgebung des Prototyps . . . . .	143
6.7	Klassendiagramm der Umwelt im Simulationsmodell . . . . .	144
6.8	Klassendiagramm des Agenten im Simulationsmodell . . . . .	146

---

6.9	Klassendiagramm zur Anbindung zur Mobilitätsdienstleistern . . . . .	149
6.10	Datenstruktur einer Szenariobeschreibung . . . . .	151
6.11	Datenstruktur einer FCL-Datei . . . . .	152
6.12	Datenstruktur einer Startszene . . . . .	155
6.13	Grafische Benutzeroberfläche des Prototyps . . . . .	157
7.1	Quantitatives Evaluationsmodell . . . . .	162
7.2	Linguistische Variable Alter . . . . .	165
7.3	Linguistische Variable Pünktlichkeit . . . . .	174
7.4	Nutzen der möglichen Touren zum Einkaufen . . . . .	184
7.5	Unterschiedliche Straßennetze in der grafischen Benutzeroberfläche . . . . .	192
A.1	Definitionsbereiche der linguistischen Variablen und Fuzzifizierung . . . . .	225
A.2	Linguistische Variablen der drei Inferenzstufen und Defuzzifizierung . . . . .	226
A.3	Regelbasen des Fuzzyinferenzsystems . . . . .	227
C.1	Datenstruktur der Szenariobeschreibung . . . . .	231
C.2	Definitionsbereiche der linguistischen Variablen und Fuzzifizierung . . . . .	232
C.3	Linguistische Variablen der drei Inferenzstufen und Defuzzifizierung . . . . .	233
C.4	Regelbasen des Fuzzyinferenzsystems . . . . .	234
C.5	Datenstruktur der Startszene . . . . .	235
C.6	Aktivitäten des Agenten . . . . .	236
C.7	Fuzzyregeln des Agenten . . . . .	237
C.8	Fortbewegungsmittel des Agenten . . . . .	237
D.1	Definition der linguistischen Variable Tageszeit . . . . .	241

# Tabellenverzeichnis

3.1	Zielerfüllung durch den Stand der Technik . . . . .	74
5.1	Detailgrad, Kontext und Datengrundlage von Verkehrsmodellen . . . . .	88
5.2	PEAS-Beschreibung eines Simulationsagenten . . . . .	97
5.3	Eignung von Verfahren der Computational Intelligence . . . . .	108
7.1	Nutzungsintentionen und Nutzen von Ridesharing-Angeboten . . . . .	166
7.2	Nutzungsintentionen und Nutzen bei unterschiedlichen Teilnehmern . . . . .	167
7.3	Mögliche Hin- und Rückfahrten für die Arbeit nördlich des Wohnorts . . . . .	177
7.4	Mögliche Hin- und Rückfahrten für die Arbeit westlich des Wohnorts . . . . .	179
7.5	Mögliche Hin- und Rückfahrten für Familienbesuche innerorts . . . . .	181
7.6	Mögliche Hin- und Rückfahrten für Familienbesuche außerorts . . . . .	183
7.7	Vergleich zwischen Fahrkreis-Schnittstelle und interner Schnittstelle . . . . .	188
7.8	Laufzeiten von Fahrkreis-Schnittstelle und interner Schnittstelle . . . . .	191
7.9	Laufzeiten von Simulationsexperimenten bei unterschiedlichen Gebieten . . . . .	193



# Abkürzungsverzeichnis

<b>BDI</b>	<b>B</b> elief, <b>D</b> esire, <b>I</b> ntention
<b>BOID</b>	<b>B</b> eliefs, <b>O</b> bligations, <b>I</b> ntentions, <b>D</b> esires
<b>CART</b>	<b>C</b> lassification and <b>R</b> egression <b>T</b> rees
<b>CHAID</b>	<b>C</b> hi-square <b>A</b> utomatic <b>I</b> nteraction <b>D</b> etectors
<b>CSV</b>	<b>C</b> omma- <b>S</b> eparated <b>V</b> alues
<b>DECIDE</b>	<b>D</b> efine, <b>E</b> stablish, <b>C</b> onsider, <b>I</b> dentify, <b>D</b> evelop, <b>E</b> valuate
<b>ER</b>	<b>E</b> ntity <b>R</b> elationship
<b>FCL</b>	<b>F</b> uzzy <b>C</b> ontrol <b>L</b> anguage
<b>GOFER</b>	<b>G</b> oals, <b>O</b> ptions, <b>F</b> acts, <b>E</b> ffects, <b>R</b> eview
<b>GPS</b>	<b>G</b> lobal <b>P</b> ositioning <b>S</b> ystem
<b>HOTCO</b>	<b>H</b> ot <b>C</b> ognition
<b>IDEF1X</b>	<b>I</b> ntegration <b>D</b> efinition for Information Modeling
<b>IKT</b>	<b>I</b> nformations- und <b>K</b> ommunikationstechnologie
<b>JSON</b>	<b>J</b> ava <b>S</b> cript <b>O</b> bject <b>N</b> otation
<b>PEAS</b>	<b>P</b> erformance measure, <b>E</b> nvironment, <b>A</b> ctuators, <b>S</b> ensors
<b>ReLU</b>	<b>R</b> ectified <b>L</b> inear <b>U</b> nit
<b>REST</b>	<b>R</b> epresentational <b>S</b> trate <b>T</b> ransfer
<b>SysML</b>	<b>S</b> ystems <b>M</b> odeling <b>L</b> anguage
<b>UML</b>	<b>U</b> nified <b>M</b> odeling <b>L</b> anguage
<b>XML</b>	<b>E</b> xtensible <b>M</b> arkup <b>L</b> anguage



# Kapitel 1

## Einleitung

Von den rund 83 Millionen Menschen in Deutschland leben etwa 56 Prozent in ländlichen Räumen (STBA, 2021, S. 12; THÜNEN-INSTITUT, 2021; THÜNEN-INSTITUT, 2016). In besonders durch ländliche Räume geprägten Bundesländern liegt dieser Anteil erheblich höher, in Niedersachsen beläuft er sich beispielsweise auf mehr als drei Viertel der Bevölkerung, in Brandenburg auf sogar 93 Prozent (THÜNEN-INSTITUT, 2021).

Beschleunigt durch den demografischen Wandel und die damit verbundene Überalterung der Landbevölkerung durch den Wegzug jüngerer Generationen wird die Daseinsvorsorge, wie beispielsweise die Erreichbarkeit von Ärzten<sup>1</sup> und Krankenhäusern, in ländlichen Räumen zunehmend erschwert, da sich Einrichtungen des öffentlichen Personenverkehrs oder zur Daseinsvorsorge aus mangelnder Rentabilität zurückziehen (NEUMEIER, 2017, S. 1–3, 133–135; SCHMITT, 2018, S. 1). Da durchschnittliche Strecken zur Nahversorgung in ländlichen Räumen ungefähr doppelt so lang sind wie die in Städten, ist die Bevölkerung in ländlichen Räumen damit derzeit in besonderem Maße auf den motorisierten Individualverkehr angewiesen (KOKORSCH und KÜPPER, 2019, S. 12; BECKER, 2016, S. 22 f.; KAGERMEIER, 2004, S. 20 f.). Diese Notwendigkeit zur Nutzung des motorisierten Individualverkehrs in ländlichen Räumen steht im direkten Gegensatz zur seit langem überfälligen Verkehrswende und dem damit verbundenen Streben nach nachhaltigeren und bedarfsorientierteren *Mobilitätsangeboten* (BECKER, 2016, S. 27–29).

In deutschen Städten wird mit Carsharing-Anbietern wie Cambio<sup>2</sup>, Bikesharing-Anbietern wie Nextbike<sup>3</sup>, Ridepooling-Anbietern wie CleverShuttle<sup>4</sup> und in jüngster Zeit E-Scooter-Anbietern wie Lime<sup>5</sup> eine Vielzahl neuer Mobilitätsangebote und -konzepte erprobt<sup>6</sup> und kommerziell angeboten. Im Ausland stellen darüber hinaus auch Ridehailing-Dienstleister wie Uber<sup>7</sup> flexible und neuartige Mobilitätsangebote bereit, die in Deutschland jedoch nicht zugelassen sind. Ermöglicht werden diese Angebote wesentlich durch die in urbanen Räumen

---

<sup>1</sup>Diese Arbeit nutzt aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum. Soweit inhaltlich nicht anders angezeigt, bezieht sich dieses ausdrücklich zugleich auf männliche, weibliche und andere Geschlechteridentitäten.

<sup>2</sup><https://www.cambio-carsharing.de> (letzter Abruf: 27.02.2022).

<sup>3</sup><https://www.nextbike.de> (letzter Abruf: 27.02.2022).

<sup>4</sup><https://www.clevershuttle.de> (letzter Abruf: 27.02.2022).

<sup>5</sup><https://www.li.me> (letzter Abruf: 27.02.2022).

<sup>6</sup>Zur Zeit werden viele der in Deutschland verfügbaren neuartigen Mobilitätsangebote im Sinne von § 2 Abs. 7 PBefG auf bis zu fünf Jahre befristet experimentell zur Erprobung neuer Verkehrsarten betrieben.

<sup>7</sup><https://www.uber.com> (letzter Abruf: 27.02.2022).

ubiquitäre Verfügbarkeit von mobilem Internet und der damit verbundenen Möglichkeit zum unmittelbaren Anbahnen, Buchen und Abrechnen (AMEY et al., 2011). Ländliche Räume werden in dieser Entwicklung häufig nicht oder erst zweitrangig berücksichtigt, aufgrund der im Vergleich zu urbanen Zentren längeren Strecken und geringeren Bevölkerungsdichte beschränkt sich das Angebot dort häufig auf Ridesharing-Anbieter wie Blablacar<sup>8</sup>.

Aber nicht alle Mobilitätsangebote sind langfristig erfolgreich. Am Beispiel gescheiterter Carsharing-Anbieter wie CiteeCar ist zu erkennen, dass nicht jedes innovative Konzept für nachhaltigere Mobilität von den jeweiligen Zielgruppen tatsächlich in ausreichendem Maße angenommen wird. Andere Anbieter wie der Ridesharing-Anbieter Flinc<sup>9</sup> haben ihr Geschäftsmodell von der spontanen Vermittlung von Mitfahrgelegenheiten für Privatpersonen auf die Bildung von Fahrgemeinschaften innerhalb von Unternehmen fundamental anpassen müssen, um weiterhin rentabel zu bleiben.

## 1.1 Problemstellung

Um Akzeptanz und zu erwartende Nutzung neuartiger wie auch etablierter Mobilitätsangebote zu untersuchen und zu prognostizieren und damit zum Beispiel dem möglichen Scheitern von Mobilitätsangeboten entgegenzuwirken, wird vielfach auf Methoden sozialwissenschaftlicher *Primärforschung*, wie beispielsweise Fragebögen oder Interviews, zurückgegriffen (BORTZ und DÖRING, 2006, S. 252–262, 308–321). Je nach konkreten Forschungszielen und -methoden werden dabei qualitative oder quantitative Daten erfasst. Während qualitative Daten natürlichsprachlich erhoben, beschrieben und anschließend interpretiert werden müssen, werden quantitative Daten numerisch erfasst und messbar gemacht (BORTZ und DÖRING, 2006, S. 296–298). Typischerweise wird in der quantitativen Primärforschung daher mit geeigneten Stichproben und unter möglichst kontrollierbaren Laborbedingungen mit naturwissenschaftlichen Methoden versucht, Verhalten zu messen und zu erklären, während in der qualitativen Primärforschung vordergründig Einzelfälle explorativ und mit geisteswissenschaftlichen Methoden möglichst ganzheitlich untersucht und beschrieben werden (BORTZ und DÖRING, 2006, S. 299; RAITHEL, 2008, S. 11 f.). Auch die Mischung qualitativer und quantitativer Methoden ist jedoch möglich (KUCKARTZ, 2014, S. 33; SCHREIER und ODAĀ, 2010, S. 263–265).

Bei der praktischen Anwendung dieser Methoden sozialwissenschaftlicher Primärforschung auf einen Untersuchungsgegenstand wie das Mobilitätsverhalten von Menschen ergibt sich der zentrale Erkenntnisgewinn aus der Identifikation bisher unerkannter Zusammenhänge, Beweggründe und subjektiver Meinungen. Neben der Beschreibung soziodemografischer Eigenschaften und Strukturen potenzieller Zielgruppen können somit auch weiche Faktoren, wie beispielsweise das bei der Nutzung von Ridesharing-Angeboten relevante Sicherheitsgefühl der Nutzer oder ihre Bestrebungen nach nachhaltiger Mobilität, identifiziert werden (WIND et al., 2012, S. 7; SHAHEEN et al., 2017; AMEY et al., 2011; KIRSCH, 2015, S. 153,

<sup>8</sup><https://www.blablacar.de> (letzter Abruf: 27.02.2022).

<sup>9</sup><https://flinc.org> (letzter Abruf: 27.02.2022).

161; WILHELMS et al., 2017). Einzelne Forschungsergebnisse bilden in diesem Zusammenhang jeweils Momentaufnahmen zu einzelnen Teilbereichen, Nutzergruppen oder Inhalten ab, ergeben bei gemeinsamer Analyse jedoch ein Gesamtbild zum Mobilitätsverhalten, das bei der zielgruppengerechten Gestaltung von Mobilitätsangeboten berücksichtigt werden kann.

Um Forschungsergebnisse über Erkenntnisgewinne aus derartigen Momentaufnahmen hinaus nutzbar zu machen, stellt sich die Frage, ob diese im Rahmen von die sozialwissenschaftliche Primärforschung unterstützenden, simulativen Experimenten ausführbar gemacht werden können. Hintergrund dieses Bestrebens ist die Annahme, dass Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten besser untersucht und verstanden werden können, wenn diese durch Simulation als zusätzliche, unterstützende Forschungsmethode beobachtbar gemacht werden können (BUNGARTZ et al., 2013, S. 2; CHALMERS, 2007, S. 25 f.). Eine solche Simulation von Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten scheint jedoch bisher nicht zu existieren, sodass in dieser Arbeit die dazu erforderlichen und geeigneten Methoden und Systeme erforscht und entwickelt werden sollen.

Am Beispiel des *Forschungsprojekts NEMo*<sup>10</sup> (Nachhaltige Erfüllung von Mobilitätsbedürfnissen im ländlichen Raum) soll die Problemstellung dieser Arbeit exemplarisch greifbar gemacht und konkretisiert werden. Im NEMo Projekt wird auf sozialer, organisatorischer, ökonomischer und technischer Ebene sowohl an einer konkreten, nachhaltigen und zweckorientierten Lösung von Mobilitäts- und Versorgungsproblemen im ländlichen Raum als auch an den zur Entwicklung dieser Lösung erforderlichen inter- und transdisziplinären Methoden und Forschungsansätzen gearbeitet. Dazu wird in den beiden Modellregionen des Projekts, dem Landkreis Wesermarsch und dem ländlichen Raum um die Stadt Oldenburg, sowohl aus soziologischer als auch wirtschaftswissenschaftlicher Perspektive qualitative und quantitative Primärforschung betrieben, um Beweggründe, Bedingungen, Praktiken, Motive und Hemmnisse der dort lebenden Bevölkerung bei der Nutzung von Verkehrsmitteln und Mobilitätsangeboten zu erheben und zu verstehen. Diese Ergebnisse werden innerhalb des Projekts weiterverwendet, um eine auf die Spezifika des ländlichen Raumes zugeschnittene und zielgruppenorientierte IKT<sup>11</sup>-Plattform, das *Fahrkreis-System*<sup>12</sup>, zu entwickeln und bereitzustellen, die zur Erfüllung dortiger Mobilitätsbedarfe geeignet ist. Am Beispiel des NEMo Projekts ist somit zu erwarten, dass die Entwicklung des Fahrkreis-Systems unterstützt werden kann, wenn dieses bereits frühzeitig auf Grundlage der durchgeführten sozialwissenschaftlichen Ergebnisse simulativ erprobt und gegebenenfalls angepasst werden kann, um die Bedürfnisse der zukünftigen Nutzer zu erfüllen.

---

<sup>10</sup>Förderkennzeichen VWZN3122, <https://nemo-mobilitaet.de> (letzter Abruf: 27.02.2022).

<sup>11</sup>Informations- und Kommunikationstechnologie

<sup>12</sup><https://nemo-mobilitaet.de/blog/de/fahrkreis-fahrplan> (letzter Abruf: 27.02.2022).

## 1.2 Forschungsfragen

Aus der in Abschnitt 1.1 beschriebenen und am Beispiel des NEMo Projekts vertieften und exemplarisch konkretisierten Problemstellung ergibt sich verallgemeinernd für die weitere Arbeit die folgende, übergeordnete Leitfrage.

### Leitfrage

*Wie können Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten simuliert werden, um sozialwissenschaftliche Primärforschung zu unterstützen?*

Aus der Leitfrage und der ihr zugrunde liegenden Problemstellung ergeben sich weiterhin vier *Stakeholder* (Deutsch: Teilhaber), die an der Durchführung eines derartigen *Simulationsexperiments* beteiligt sein müssen. Diese müssen nicht zwangsweise unterschiedliche Personen sein, es kann sich dabei sowohl um verschiedene Rollen der gleichen Person handeln oder um institutionelle Stakeholder statt einzelner Personen (PARTSCH, 2010, S. 8–10).

**Sozialwissenschaftler** Der *Sozialwissenschaftler* muss die Datengrundlage bereitstellen, die mit dem Simulationsexperiment ausgeführt und angewendet werden soll. Diese muss durch entsprechende, quantitative oder qualitative sozialwissenschaftliche Primärforschung erhoben werden.

**Mobilitätsdienstleister** Der *Mobilitätsdienstleister* muss die Mobilitätsangebote bereitstellen, deren Akzeptanz und Nutzung mit dem Simulationsexperiment untersucht werden sollen. Ein solches Mobilitätsangebot kann physisch, wie ein Carsharing-Angebot oder öffentlicher Verkehr, oder informationell, wie die Vermittlung von Ridesharing-Angeboten oder eine Strecken- und Mobilitätsauskunft, sein.

**Entscheidungsträger** Der *Entscheidungsträger* muss die sozialwissenschaftliche Datengrundlage sowie die zu untersuchenden Mobilitätsangebote festlegen. Diese ergeben sich aus dem konkreten Untersuchungsgegenstand, der mit dem Simulationsexperiment zu analysieren ist.

**Anwender** Der *Anwender* muss das Simulationsexperiment vorbereiten und durchführen. Dazu muss er die bereitgestellte sozialwissenschaftliche Datengrundlage sowie die bereitgestellten Mobilitätsangebote maschinenlesbar aufbereiten und modellieren.

Da mit einem derartigen Simulationsexperiment durch Nutzung einer sozialwissenschaftlichen Datengrundlage und bereitgestellter Mobilitätsangebote auf Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten, also von den Ursachen auf die Wirkung, geschlossen werden soll, ist davon auszugehen, dass Simulation für dieses Anwendungsgebiet eine geeignete Forschungsmethode ist. Für inverse Probleme, bei denen zu einer gewünschten Wirkung die Ursachen ermittelt werden sollen, ist Simulation ungeeignet (BUNGARTZ et al., 2013, S. 10; BANKS et al., 2005, S. 4 f.).

Aus der Leitfrage und der Beschreibung der vier Stakeholder ergeben sich die folgenden drei Teilfragen, die gezielt unterschiedliche Aspekte der Leitfrage vertiefen. Diese drei Teilfragen bauen inhaltlich aufeinander auf, von der Frage nach einem zugrundeliegenden Konzept hin zur Frage nach einer möglichen technischen Gestaltung.

### Teilfrage 1

*Wie können sozialwissenschaftliche Erklärungsansätze zur Formulierung eines Architekturmodells für die Simulation von Mobilitätsverhalten genutzt werden?*

Bei der Simulation von Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten steht das Mobilitätsverhalten von Menschen im Mittelpunkt der Untersuchung. Eine solche soziale Simulation ist mit der besonderen Herausforderung behaftet, eine komplexe, sozioökonomische Welt in einem Architekturmodell abbilden zu müssen (HELBING, 2012, S. 3; GILBERT und TROITZSCH, 2005, S. 10–12; MILLER und PAGE, 2007, S. 9 f.). Insbesondere unter dem Begriff der Sozionik wird untersucht, wie soziologische und informatische Ansätze für spezifische Anwendungen und zur Untersuchung emergenten Verhaltens zusammengeführt werden können (HARBACH, 2012, S. 62–64; FISCHER und FLORIAN, 2005, S. 1–3). Für diese Arbeit stellt sich daher die Frage, wie existierende sozialwissenschaftliche Erklärungsansätze im Kontext der Simulation von Mobilitätsverhalten zur Modellbildung strukturierend herangezogen werden können.

### Teilfrage 2

*Wie können verschiedene relevante Entscheidungsfaktoren bei der Entscheidung hinsichtlich einzelner Mobilitätsangebote formalisiert und einbezogen werden?*

Um die Entscheidung für konkrete Mobilitätsangebote sowie deren Nutzung simulativ untersuchen zu können, ist ein geeignetes Prinzip zur Entscheidungsfindung erforderlich. Algorithmisierbarkeit und sozialwissenschaftliche Komplexität sind jedoch typischerweise konkurrierende Dimensionen bei der Modellierung von Handlungen, sodass die Verbesserung der einen eine Verschlechterung der anderen zur Folge hat (KRON und WINTER, 2015, S. 365). Insbesondere bei steigender sozialwissenschaftlicher Komplexität ist die eindeutige Definition zu nutzender, algorithmischer Verfahren jedoch unerlässlich (SCHIMANK, 2005). Für diese Arbeit stellt sich somit die Frage, welcher mathematisch-informatische Formalismus grundsätzlich funktional geeignet ist und entsprechend adaptiert werden kann, um möglichst beliebige Entscheidungsfaktoren in einem Entscheidungsprozess für einzelne Mobilitätsangebote berücksichtigen zu können.

### Teilfrage 3

*Wie kann ein Simulationssystem für Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten softwaretechnisch gestaltet und umgesetzt werden?*

Um ein Simulationsexperiment zu Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten effizient durchführen zu können, ist eine entsprechend geeignete, technische Umsetzung erforderlich. Ein derartiges softwaretechnisches Simulationssystem ist das zentrale technische *Artefakt*, das zur Lösung der in Abschnitt 1.1 beschriebenen Problemstellung dieser Arbeit herangezogen und eingesetzt werden können soll (HEVNER et al., 2004, S. 80; PEFFERS et al., 2006; BALZERT, 2011, S. 9 f.). Für diese Arbeit stellt sich daher die Frage, mit welchen konkreten Mitteln, technischen Werkzeugen und Methoden ein Simulationssystem für Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten zu spezifizieren und umzusetzen ist.

## 1.3 Ziele der Arbeit

Auf Grundlage der in Abschnitt 1.2 formulierten Leitfrage und der sich aus ihr ergebenden Teilfragen zeichnen sich erste Herausforderungen ab, die als konkrete Ziele dieser Arbeit zu verfolgen sind. Diese stellen damit gleichermaßen sowohl konkrete Forschungsziele dieser Arbeit als auch notwendige Eigenschaften des Simulationssystems für Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten dar. Die Ziele beschreiben in erster Näherung, welche Eigenschaften das Simulationssystem erfüllen muss, nicht jedoch wie, das heißt mit welchen Mitteln und Methoden, diese erreicht werden können.

Insgesamt fünf Ziele ergeben sich aus den Teilfragen der Arbeit und sind diesen zugeordnet. Die Reihenfolge entspricht dadurch einer groben Sortierung von überwiegend konzeptionellen zu überwiegend technischen Zielen.

### Ziel 1: Interdisziplinäre Modellbildung

Ziel 1 ergibt sich aus Teilfrage 1. Zur Modellbildung und für die Simulation von Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten müssen Inhalte aus drei unterschiedlichen Disziplinen zusammengeführt werden. Als Anwendungsdomäne dieser Arbeit ist grundsätzlich die Verkehrsplanung und insbesondere die Mobilitätsforschung zu identifizieren, während von technisch-informatischer Seite die Bereiche Simulation und künstliche Intelligenz entsprechend zu berücksichtigen sind. Als dritte Disziplin sind darüber hinaus Theorien und Modelle zu Entscheidungsverhalten und Handeln aus den Sozialwissenschaften in die Modellbildung mit einzubeziehen, um das Mobilitätsverhalten von Menschen abbilden zu können.

### Ziel 2: Dynamische Mobilitätsangebote

Ziel 2 ergibt sich aus Teilfrage 1 und Teilfrage 2. Da unterschiedliche Mobilitätsangebote unterschiedliche Verfügbarkeiten vorweisen, müssen diese bei der Modellbildung

und Entscheidung berücksichtigt werden. Mobilitätsangebote des öffentlichen Verkehrs sind durch ihre Taktung beschränkt, während für Alternativen des Individualverkehrs entsprechende Verkehrsmittel vorhanden sein müssen. Darüber hinaus sind Sharing-Angebote wie Bike- oder Carsharing durch potenziell temporäre oder unregelmäßige Verfügbarkeiten sehr dynamisch begrenzt, während die Verfügbarkeit von Ridesharing dynamisch vom Angebot anderer Privatpersonen abhängt.

### **Ziel 3: Subjektive Einstellungen**

Ziel 3 ergibt sich aus Teilfrage 2. Da subjektive Meinungen und Gefühle eines Menschen, wie in Abschnitt 1.1 beschrieben, wesentlicher Bestandteil der Wahl eines Mobilitätsangebots sein können, müssen diese bei der Modellbildung und bei der Entscheidung berücksichtigt werden. Die für Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten notwendige Entscheidungsfindung muss damit sowohl mit harten als auch mit weichen Entscheidungsfaktoren umgehen können.

### **Ziel 4: Reproduzierbare Simulationsexperimente**

Ziel 4 ergibt sich aus Teilfrage 2 und Teilfrage 3. Ein Simulationsexperiment muss reproduzierbar sein, um Analysierbarkeit und Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten. Insbesondere müssen sie bei mehrfacher Durchführung bei gleicher Ausgangssituation zu den gleichen Ergebnissen kommen, um sozialwissenschaftliche Primärforschung zuverlässig unterstützen zu können.

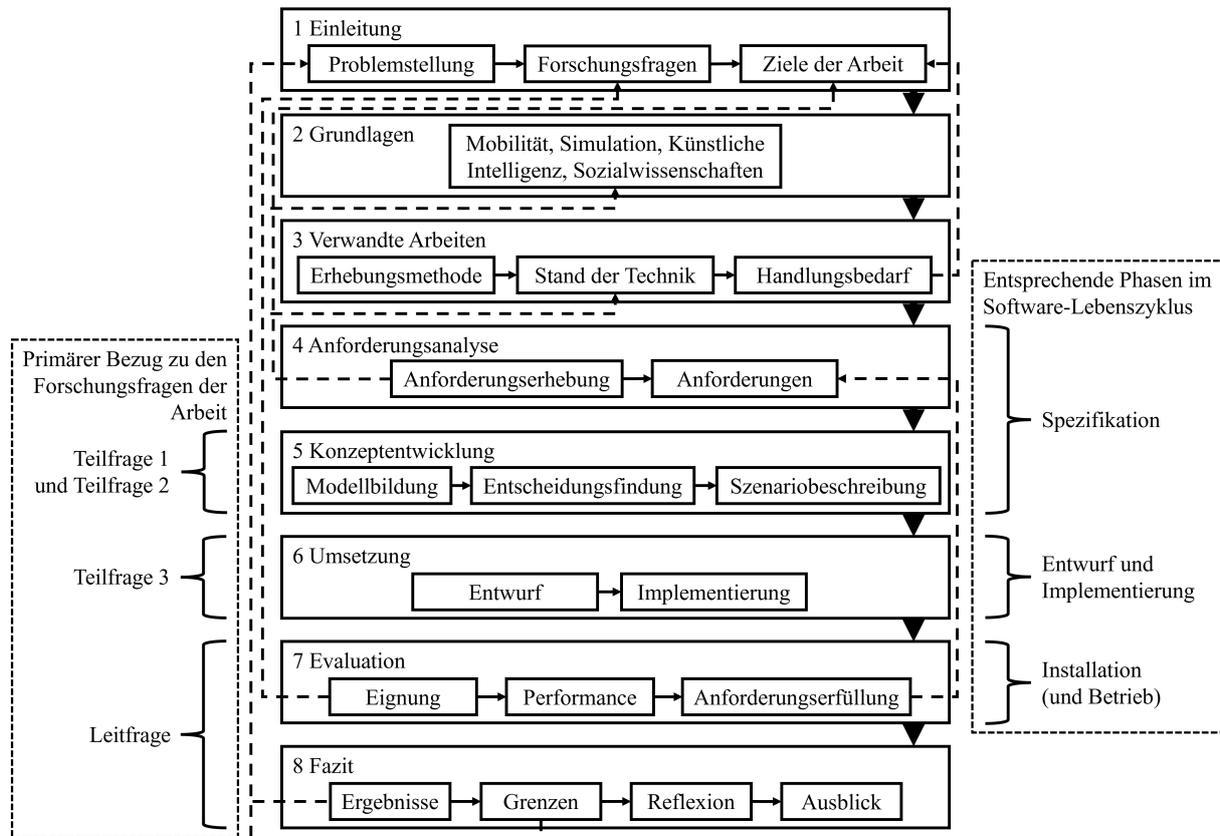
### **Ziel 5: Flexibles Simulationssystem**

Ziel 5 ergibt sich aus Teilfrage 3. Das Simulationssystem muss in der Lage sein, unterschiedliche Simulationsexperimente für Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten durchführen zu können. Insbesondere für hypothetische Simulationsexperimente müssen Parameter ausgetauscht oder auf Grundlage eines anderen Simulationsexperiments angepasst werden können, um Veränderungen und Unterschiede zwischen den Simulationsexperimenten untersuchen zu können.

## **1.4 Vorgehen und Aufbau der Arbeit**

Im Rahmen dieser Arbeit wird nach ingenieurwissenschaftlicher Methodik zur Gestaltung eines technischen Artefakts vorgegangen. Dies bedeutet, dass vor dem Hintergrund einer Problemstellung mit geeigneten Grundlagen und Methoden eine Lösung zu entwickeln und entsprechend zu evaluieren ist (HEVNER et al., 2004, S. 80; PEFFERS et al., 2006; BRINKKEMPER, 1996). Vor dem Hintergrund der sich insbesondere aus Teilfrage 3 ergebenden Entwicklung eines softwaretechnischen Simulationssystems orientiert sich diese Arbeit an den typischen Entwicklungsphasen der Softwaretechnik. Nach BALZERT (2011) sind die Phasen dieses *Software-Lebenszyklus* die Spezifikation, der Entwurf, die Implementierung, die Installation und der Betrieb eines Softwaresystems (BALZERT, 2011, S. 1 f.; PARTSCH, 2010, S. 1–3).

In Abbildung 1.1 ist daher der Aufbau dieser Arbeit sowohl in Bezug auf die Forschungsfragen als auch in Bezug auf die Phasen des Software-Lebenszyklus dargestellt.



**Abbildung 1.1:** Aufbau der Arbeit mit inhaltlichen Rückbezügen sowie Bezügen zu den Forschungsfragen und den Phasen des Software-Lebenszyklus.

Zentral dargestellt sind die acht aufeinander folgenden Kapitel dieser Arbeit mit ihren Inhalten in vereinfachter Form. Wesentliche Rückbezüge sind durch gestrichelte Pfeile dargestellt. Nach diesem Einleitungskapitel erfolgt in Kapitel 2 die Beschreibung aller wesentlichen Grundlagen zu den Themen Verkehrsplanung und insbesondere Mobilitätsforschung, Simulation, künstliche Intelligenz und Entscheidungsverhalten und Handeln in den Sozialwissenschaften. Anschließend wird in Kapitel 3 der Handlungsbedarf für diese Arbeit identifiziert, nachdem der Stand der Technik mit geeigneter Methode erhoben und die Erfüllung der Ziele dieser Arbeit durch diese verwandten Arbeiten untersucht wurde. Die in Kapitel 4 durchgeführte Anforderungsanalyse bezieht Erkenntnisse aus den vorherigen drei Kapiteln in die Anforderungserhebung mit ein, um die konkreten Anforderungen dieser Arbeit aufzustellen. Kapitel 5 beschreibt die Entwicklung des allgemeinen Lösungskonzepts, während die in Kapitel 6 beschriebene Umsetzung das entstandene technische Artefakt darstellt. In Kapitel 7 erfolgt die Evaluation des entstandenen Simulationssystems hinsichtlich seiner Eignung für die in Abschnitt 1.1 erläuterte Problemstellung, die Performance des Simulationssystems sowie die Erfüllung der aufgestellten Anforderungen an das Simulationssystem. Das Fazit in Kapitel 8 bildet den Abschluss, fasst Ergebnisse zusammen, zeigt Grenzen auf, reflektiert die Methodik und stellt potenziell anschließende Forschungsthemen dar.

Auf der linken Seite der Darstellung werden die Kapitel der Arbeit mit den in Abschnitt 1.2 aufgestellten Forschungsfragen in Verbindung gebracht, um abzubilden, in welchen Kapiteln welche Forschungsfragen adressiert werden. Diese Zuordnung ist nicht vollständig trennscharf zu sehen, ermöglicht jedoch eine grobe Zuordnung von Inhalten und Forschungsfragen. Teilfrage 1 und Teilfrage 2 werden demnach vor allem in Kapitel 5 aufgegriffen, während Teilfrage 3 überwiegend in Kapitel 6 berücksichtigt wird. Mit der Evaluation und dem Fazit der Arbeit wird insbesondere zur übergeordneten Leitfrage zurückgekehrt.

Auf der rechten Seite werden die Kapitel der Arbeit den fünf Phasen des Software-Lebenszyklus nach BALZERT (2011) zugeordnet. Vorgelagerter Ausgangspunkt dieser Perspektive ist der bei der Betrachtung der verwandten Arbeiten identifizierte Handlungsbedarf, der die in Kapitel 4 durchgeführte Spezifikation konkreter Anforderungen an das neu zu entwickelnde Simulationssystem erfordert. Die Konzeptentwicklung in Kapitel 5 ist ebenfalls der Spezifikationsphase zuzuordnen, da an dieser Stelle weitere konzeptionelle Entscheidungen zu erforderlichen Strukturen und Verfahren getroffen werden, die in Entwurf und Implementierung zu berücksichtigen sind. Die Entwurfs- und Implementierungsphase des Software-Lebenszyklus sind in den gleichnamigen Abschnitten von Kapitel 6 beschrieben und konzentrieren sich auf die konkrete technische Umsetzung des Simulationssystems. Die Installationsphase erfolgt durch die mit einem Abnahmetest für Software vergleichbare Evaluation in Kapitel 7 (BALZERT, 2011, S. 1 f.). Ein tatsächlicher Einsatz des entwickelten Simulationssystems im Sinne einer langfristigen Betriebsphase ist jedoch nicht mehr Teil dieser Arbeit.



# Kapitel 2

## Grundlagen

Wie in Abschnitt 1.4 beschrieben, ist die Kenntnis geeigneter Grundlagen und Methoden wesentliche Voraussetzung für eine ingenieurwissenschaftliche Vorgehensweise sowie für das Treffen informierter und gut begründeter Entscheidungen für eine spätere softwaretechnische Systementwicklung (HEVNER et al., 2004, S. 80). Diese Grundlagen werden an dieser Stelle zunächst unabhängig von der beabsichtigten Anwendung für eine softwaretechnische Systementwicklung aufgearbeitet und dargestellt (CALVERT, 2006, S. 203–205; SCHAUZ, 2014).

Die vier übergeordneten Abschnitte dieses Kapitels ergeben sich insbesondere aus den in Abschnitt 1.3 zu Ziel 1 dieser Arbeit identifizierten interdisziplinären Themenbereichen Verkehrsplanung und Mobilitätsforschung, Simulation, künstliche Intelligenz sowie Entscheidungsverhalten und Handeln in den Sozialwissenschaften. Die adäquate Aufarbeitung dieser sehr heterogenen Grundlagengebiete erfordert eine entsprechend umfangreiche Betrachtung. Mit Verkehrsplanung und Mobilitätsforschung in Abschnitt 2.1 wird dazu die Anwendungsdomäne dieser Arbeit genauer dargestellt, während mit Simulation in Abschnitt 2.2 und künstlicher Intelligenz in Abschnitt 2.3 die zentralen technisch-informatischen Grundlagen erörtert werden. Die Beschreibung von Theorien und Modellen zu Entscheidungsverhalten und Handeln in den Sozialwissenschaften in Abschnitt 2.4 schließlich ist insbesondere für die gewünschte interdisziplinäre Modellbildung erforderlich.

### 2.1 Verkehrsplanung und Mobilitätsforschung

Die Verkehrsplanung ist ein Fachbereich der Verkehrswissenschaften und aus dem Bauingenieurwesen hervorgegangen. AMMOSER und HOPPE (2006) identifizieren unterschiedliche Auslegungen und Dimensionen der Verkehrsplanung, von der Analyse von Verkehrsströmen und Verkehrsräumen über das Erarbeiten von Betriebsplänen im öffentlichen Verkehr bis zur langfristigen Konzipierung und Gestaltung der Verkehrsraumentwicklung, der Verkehrsinfrastruktur und der beteiligten Verkehrssysteme. Die Verkehrsplanung hat darüber hinaus eine koordinierende Aufgabe zwischen den an einem Verkehrssystem beteiligten Interessengruppen und vermittelt in diesem Sinne zwischen politischen, wirtschaftlichen, konstruktiven, sozialen, ökologischen und betrieblichen Anliegen. Für eine erfolgreiche Verkehrsplanung müssen unterschiedliche Zielgrößen berücksichtigt werden. Die Verkehrsinfrastruktur

tur muss aufgrund der oft schwierigen Veränderbarkeit bestehender Infrastruktur und ihrer Langlebigkeit sinnvoll geplant werden. Dennoch müssen Verkehrssysteme prinzipiell flexibel genug gestaltet sein, um mit starken Schwankungen in der Auslastung und langfristigen Weiterentwicklungs- und Anpassungsbestrebungen umgehen zu können. Weiterhin müssen die Interessen der verschiedenen, am Verkehr beteiligten Akteure und die Angebote der unterschiedlichen, im Verkehrssystem vorhandenen oder geplanten Verkehrszweige berücksichtigt werden (AMMOSER und HOPPE, 2006, S. 32–34).

Ein Teilbereich der Verkehrsplanung ist das Mobilitätsmanagement, dessen Grundlagen in der mathematisch-naturwissenschaftlich sowie gesellschaftswissenschaftlich verankerten Mobilitätsforschung liegen. Ziele des Mobilitätsmanagements sind die Regulierung und Beeinflussung aller Arten des Personenverkehrs, Forschungsgegenstände der Mobilitätsforschung sind die Mobilität und die Mobilitätskultur des Menschen (AMMOSER und HOPPE, 2006, S. 9–11).

### 2.1.1 Personenverkehr

Der *Personenverkehr* beziehungsweise die Personenbeförderung ist, im Gegensatz zum Güterverkehr, die übergeordnete Beschreibung für alle Verfahren zur Ortsveränderung von Personen. Neben den Personen selbst umfasst der Begriff des Personenverkehrs jedoch auch die zur Beförderung benötigten technischen, technologischen, organisatorischen und ökonomischen Komponenten. Darüber hinaus steht der Begriff gelegentlich stellvertretend für diejenigen Verkehrsdienstleister, deren primäres Geschäft die Beförderung von Personen ist (AMMOSER und HOPPE, 2006, S. 14). Personenverkehr lässt sich nach unterschiedlichen Gesichtspunkten kategorisieren.

**Zweck** Es kann im Personenverkehr zwischen verschiedenen Verkehrszwecken unterschieden werden. Diese sind im wesentlichen abhängig vom Verkehrsbedürfnis der betroffenen Person. Produktionsorientierter Personenverkehr als Teil des allgemeinen Wirtschaftsverkehrs dient der unmittelbaren Erfüllung wirtschaftlicher Aufgaben. Teil des produktionsorientierten Personenverkehrs ist der Berufsverkehr. Dieser umfasst die Fahrten zwischen Wohnort und Arbeitsplatz oder Ausbildungsstätten wie Schulen und Universitäten. Berufsverkehr tritt daher meist konzentriert zu den Hauptverkehrszeiten morgens sowie nachmittags und abends auf. Dem produktionsorientierten Personenverkehr gegenüber steht der konsumorientierte Personenverkehr beziehungsweise der Freizeitverkehr. Dieser dient Freizeit- und Konsuminteressen der betroffenen Person, wie beispielsweise Besuch von Sport- und Freizeitaktivitäten oder Einkaufen (AMMOSER und HOPPE, 2006, S. 22 f., 23 f., 43; GÖTZ und STEIN, 2018, S. 325–327).

**Verkehrsmittel** Im engeren Sinne bezeichnen *Verkehrsmittel* im Kontext des Personenverkehrs die zur Beförderung von Personen eingesetzten Fahrzeuge. Im Straßenverkehr sind diese besonders differenziert ausgebildet und umfassen nicht zuletzt Fußgänger, Fahrräder, Autos und Busse. Ein Übergang besteht an dieser Stelle durch Straßenbahnen und Trams zum Schienenverkehr. Weitere Verkehrsmittel des Schienenverkehrs

sind beispielsweise Varianten der Eisenbahn wie U-Bahn und S-Bahn. Weitere Verkehrsmittel sind unter anderem Flugzeuge und Helikopter im Flugverkehr und Fähren im Schiffsverkehr (AMMOSER und HOPPE, 2006, S. 30 f.). Tendenziell lässt sich feststellen, dass die Massenverkehrsmittel im öffentlichen Personenverkehr wie Busse und Bahnen vergleichsweise günstig, dafür jedoch durch Taktung sowie Linien- und gegebenenfalls Spurbildung weniger flexibel sind. Demgegenüber ist der motorisierte Individualverkehr meist teurer, im Gegenzug jedoch erheblich flexibler (AMMOSER und HOPPE, 2006, S. 14).

Unter dem Begriff *Modal Split* wird die anteilige Verteilung einzelner Verkehrsmittel, der Modi, am Verkehrsaufkommen innerhalb eines Verkehrszweiges beziehungsweise geografischen Raumes erfasst. Der Modal Split erlaubt Rückschlüsse über Auslastung und Nutzung innerhalb eines Verkehrszweiges und kann als Grundlage für unterschiedliche Planungs- und Entwicklungsvorhaben in der Verkehrsplanung herangezogen werden. Die anteilige Verkehrsnutzung einer einzelnen Person wird im Gegensatz dazu als Modal Mix bezeichnet (AMMOSER und HOPPE, 2006, S. 11 f.; BARTZ, 2015, S. 31). Die im Modal Mix einer Person genutzten Verkehrsmittel können darüber hinaus im Sinne des *intermodalen Personenverkehrs* zu integrierten Verkehrsketten kombiniert werden, in denen mehr als ein Verkehrsmittel genutzt wird, um ein Ziel zu erreichen. Intermodaler Verkehr ist damit ein Mittel nachhaltiger Mobilität, geht jedoch mit zusätzlichen Herausforderungen bei der Gestaltung der Umstiegspunkte zwischen den Verkehrsmitteln einher (PITSIAVA-LATINOPOULOU und IORDANOPOULOS, 2012; AMMOSER und HOPPE, 2006, S. 28).

**Zugang** Der Zugang zum Personenverkehr ist im wesentlichen in zwei Arten zu unterteilen. Der *Individualverkehr* zeichnet sich durch seine Autonomie hinsichtlich des Verkehrsprozesses aus und wird in der Regel in Eigenleistung erbracht. Typische Arten des Individualverkehrs sind der Fußgängerverkehr, der Fahrradverkehr und der motorisierte Individualverkehr (AMMOSER und HOPPE, 2006, S. 5). Sonderfälle wie beispielsweise Pedelecs beziehungsweise S-Pedelecs müssen gegebenenfalls, je nach Höchstgeschwindigkeit<sup>13</sup>, individuell berücksichtigt werden.

Gegenstück zum Individualverkehr ist der *öffentliche Personenverkehr* als Teil des allgemeinen öffentlichen Verkehrs. Die Verkehrsdienstleistungen innerhalb des öffentlichen Personenverkehrs sind prinzipiell jedem Nutzer offen zugänglich, solange dieser den Produktions- und Benutzungsbedingungen des Dienstleisters Folge leistet. Geregelt werden diese durch das Personenbeförderungsgesetz (AMMOSER und HOPPE, 2006, S. 12 f.; DZIEKAN und ZISTEL, 2018, S. 357 f.).

In jüngerer Zeit entstehen jedoch zunehmend Mobilitätsangebote, welche die Abgrenzungen zwischen Individualverkehr und öffentlichem Verkehr auflösen. Dies gilt insbesondere für *prosumerbasierte*<sup>14</sup> Konzepte, in denen private Nutzer des motorisierten

<sup>13</sup>§ 1 Abs. 3 S. 1 StVG.

<sup>14</sup>Prosumer ist ein englisches Kofferwort aus **producer** (Deutsch: Produzent, Anbieter, Hersteller) und **consumer** (Deutsch: Konsument, Nutzer, Verbraucher).

Individualverkehrs gegenüber anderen als Anbieter beziehungsweise Verkehrsdienstleister auftreten und gegebenenfalls auch vergütet werden. Organisiert werden diese Angebote zumeist über internetbasierte Plattformen oder Mitfahrzentralen, die zur automatisierten Vermittlung von Angebot und Nachfrage dienen. Ein wesentlicher Treiber für derartige Angebote liegt in der inzwischen vielerorts ubiquitären Verfügbarkeit von mobilem Internet, GPS<sup>15</sup> und Smartphones sowie deren Verbindung mit Zahlungsdiensten und Nutzerprofilen in sozialen Netzwerken (AMEY et al., 2011; FURUHATA et al., 2013). Eine einheitliche Nomenklatur besteht bisher nicht. Auch im deutschsprachigen Raum haben sich jedoch englische Bezeichnungen unter dem Sammelbegriff *Ridesharing* durchgesetzt. Typische Bezeichnungen sind beispielsweise Peer-to-Peer-Ridesharing oder Echtzeit-Ridesharing. Jeder dieser Begriffe stellt jeweils verschiedene Aspekte der angebotenen Verkehrsdienstleistung heraus, in diesen Beispielen einerseits den direkten Kontakt zwischen Anbieter und Nachfrager sowie andererseits die Spontanität und Dynamik in Anbahnung und Abwicklung der Fahrt.

**Entfernung** Die Entfernung zwischen Ausgangs- und Zielort hat im Personenverkehr einen wesentlichen Einfluss auf die potenziellen Verkehrsmittel. Üblicherweise wird zwischen Nah- und Fernverkehr unterschieden. Der Nahverkehr beinhaltet die Verkehrsdienstleistungen innerhalb einer Stadt oder Region, der Fernverkehr alle darüber hinausgehenden Dienstleistungen. Insbesondere bei der Erstellung verschiedener Angebote im öffentlichen Personenverkehr zur Sicherung der Grundversorgung kommt die Reichweite und Auslegung verschiedener Verkehrsmittel zum Tragen. Der öffentliche Personennahverkehr umfasst all jene Verkehrsdienstleistungen, die üblicherweise in einer Reisezeit von weniger als einer Stunde erfüllt werden können und deren Ziel innerhalb von weniger als 50 Kilometern um den Ausgangsort liegen. Dies beinhaltet zum Beispiel Linien- und Anrufbusse, Fähren sowie den Schienenpersonennahverkehr in Form von S-Bahn bis Regionalbahn. Verkehrsmittel für den öffentlichen Personenfernverkehr sind zumeist Fernzüge, Schiffe und Flugzeuge (AMMOSER und HOPPE, 2006, S. 13 f.; DZIEKAN und ZISTEL, 2018, S. 349). Für den Individualverkehr ist eine derartige Unterscheidung aus verkehrsplanerischer Sicht nicht zwingend notwendig, da dieser zumeist in Eigenleistung erbracht wird. Allerdings wird Fußgänger- und Fahrradverkehr vorrangig lokal genutzt, für Entfernungen darüber hinaus wird auf den motorisierten Individualverkehr zurückgegriffen.

## 2.1.2 Mobilität

Die *Mobilität* eines Menschen kann grundsätzlich in drei Arten unterschieden werden: Soziale, informationale und räumliche Mobilität.

Soziale Mobilität beschreibt die Fähigkeit eines Menschen, sich innerhalb und zwischen verschiedenen sozialen, kulturellen und wirtschaftlichen Schichten und Milieus zu bewegen. Vertikale soziale Mobilität umfasst den gesellschaftlichen Auf- oder Abstieg eines Menschen,

---

<sup>15</sup>Global Positioning System

horizontale soziale Mobilität beinhaltet soziale Veränderungen innerhalb einer Klasse. Soziale Mobilität kann als Voraussetzung für räumliche Mobilität gesehen werden (BARTZ, 2015, S. 29 f.; HAMMER und SCHEINER, 2006, S. 18 f.).

Informationale Mobilität umfasst als intrapersonale beziehungsweise geistige Mobilität die Fähigkeit eines Menschen zur Verarbeitung von Informationen und zur Ersinnung von Strategien und Handlungsalternativen. Als interpersonale Mobilität wird demgegenüber die Art der informationalen Mobilität bezeichnet, die zum mediengebundenen Austausch von Informationen zwischen zwei oder mehr Menschen dient (BARTZ, 2015, S. 29 f.; AMMOSER und HOPPE, 2006, S. 9).

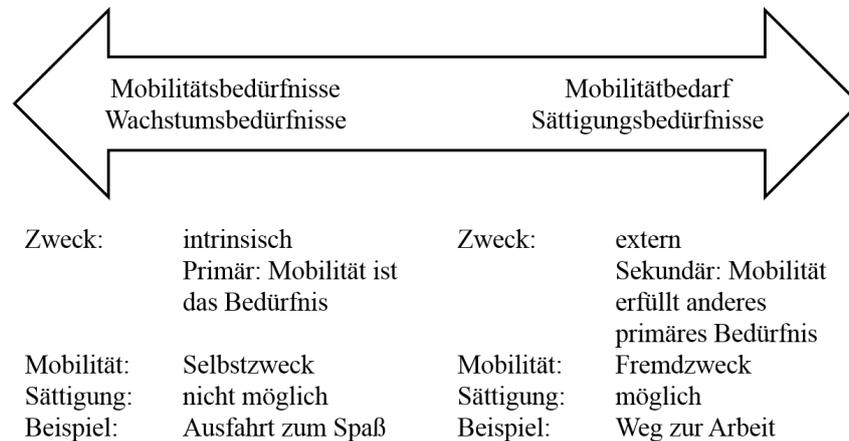
Physische beziehungsweise räumliche Mobilität schließlich beschreibt die Fähigkeit eines Menschen zur Bewegung innerhalb eines geografischen Raumes. Im Kontext der Verkehrsplanung und Mobilitätsforschung wird bei Verwendung des Begriffs Mobilität in der Regel die räumliche Mobilität impliziert (AMMOSER und HOPPE, 2006, S. 9). BARTZ (2015) unterscheidet räumliche Mobilität in kurzfristige Alltagsmobilität einerseits und langfristige, residentielle Wohnmobilität andererseits. Die Alltagsmobilität umfasst alle ortsverändernden Aktivitäten, die regelmäßig auftreten und letztendlich wieder am Ausgangspunkt enden. Die Alltagsmobilität besteht daher aus dem täglichen Arbeits-, Freizeit- und Konsumverkehr, schließt jedoch auch mehrtägige Dienstreisen und längere Urlaubsreisen mit ein. Demgegenüber steht die residentielle Mobilität, die sich durch einen anhaltenden Wohnortwechsel innerhalb eines Landes oder über Ländergrenzen hinweg auszeichnet (BARTZ, 2015, S. 30; HAMMER und SCHEINER, 2006, S. 18 f.; AMMOSER und HOPPE, 2006, S. 9).

Räumliche Mobilität und Verkehr sind eng miteinander verbunden, beschreiben jedoch unterschiedliche Phänomene. Mobilität ist eine natürliche Eigenschaft einer Person oder Personengruppe, gegebenenfalls erweitert oder eingeschränkt von ihren Handlungsoptionen oder technischen Hilfsmitteln. Verkehr ist die objektiv messbare Ausprägung von Mobilität innerhalb eines geografischen Betrachtungsraumes, lässt jedoch nur wenig Rückschlüsse über die dem Verkehr ursächlichen Mobilitätsbedarfe und -bedürfnisse zu (BARTZ, 2015, S. 31 f.; AMMOSER und HOPPE, 2006, S. 9, 21 f.; LITMAN, 2003).

### 2.1.2.1 Mobilitätsbedürfnisse und -bedarfe

Zur Erklärung der Entstehung von Mobilitätsverhalten unterscheidet BARTZ (2015) zwischen abstrakten *Mobilitätsbedürfnissen* und konkretisiertem *Mobilitätsbedarf*. Bedürfnisse sind in der Regel nicht direkt messbare Hintergründe für menschliches oder anderweitig intelligentes Handeln, daher muss zum Beleg ihrer Existenz zumeist auf ihre Satisfaktoren, also die angestrebten Ziele oder Tätigkeiten zur Bedürfnisbefriedigung, zurückgegriffen werden. Typischerweise lassen sich menschliche Bedürfnisse auf eine Form von Mangel zurückführen, das jeweilige Bedürfnis und seine jeweilige Stärke beschreibt die Diskrepanz zwischen wahrgenommenem Mangel und gewünschtem Zielzustand. Ein Bedarf demgegenüber beschreibt eine konkrete Lösungsoption zur Befriedigung des durch das Bedürfnis artikulierten Mangels (BARTZ, 2015, S. 14–16, 32; AMMOSER und HOPPE, 2006, S. 23 f.).

Mit Bezug auf das Mobilitätsverhalten eines Menschen kann daher zwischen einem Mobilitätsbedürfnis, dessen Befriedigung durch die Mobilität selbst erreicht wird, und zwischen einem Mobilitätsbedarf, der lediglich Mittel zum Zweck zur Befriedigung eines nicht unmittelbar mobilitätsbezogenen Mangels ist, unterschieden werden (BARTZ, 2015, S. 32). Die Darstellung in Abbildung 2.1 illustriert diesen Unterschied zwischen Mobilitätsbedürfnis und Mobilitätsbedarf.



**Abbildung 2.1:** Bedürfniskontinuum zwischen Mobilitätsbedürfnissen und Mobilitätsbedarf (BARTZ, 2015, S. 34).

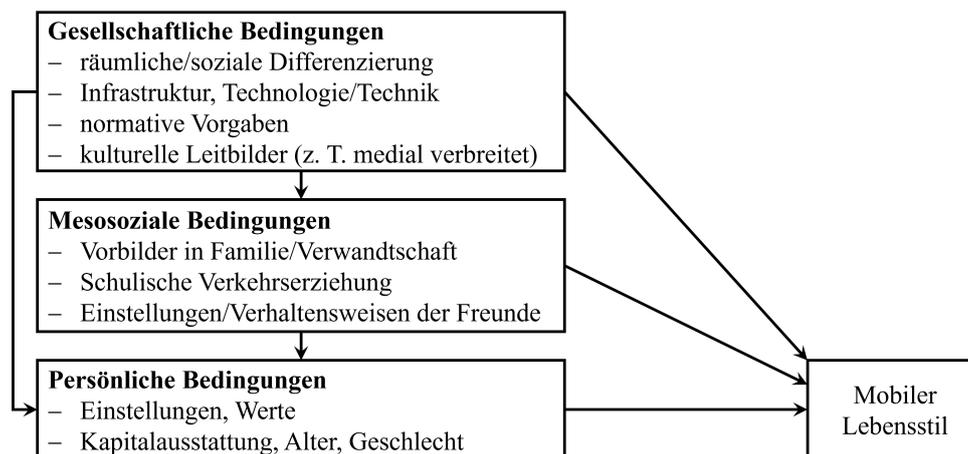
Reine Mobilitätsbedürfnisse sind demnach intrinsisch motivierte Wachstumsbedürfnisse zur Selbstverwirklichung. In diesem Sinne besteht keine Möglichkeit zur vollständigen Sättigung eines Mobilitätsbedürfnisses, da der Wunsch nach Selbstverwirklichung prinzipiell unbegrenzt ist. Demgegenüber stehen Mobilitätsbedarfe als extrinsisch begründete Ursache für das Mobilitätsverhalten eines Menschen. Ein Mobilitätsbedarf ist ein reines Mittel zum Zweck bei der Verfolgung eines anderen Bedürfnisses, daher kann er durch die Durchführung eines Mobilitätsverhaltens vollständig gesättigt und erfüllt werden (BARTZ, 2015, S. 33 f.).

### 2.1.2.2 Mobilitätskultur

Das Mobilitätsverhalten einzelner Personen ist eingebettet in eine gesamtgesellschaftliche *Mobilitätskultur*. Die Mobilitätskultur ergibt sich aus verschiedenen für die jeweilige Gesellschaft typischen Einflüssen. Die beiden maßgeblichen Einflüsse sind einerseits die praktischen Handlungen einzelner Personen und Gruppen sowie ihre dazu ursächliche *Mobilitätssozialisation* und Lebensweisen, andererseits die gegebene Infrastruktur und Regulierung der Mobilität und des Verkehrs durch die jeweiligen politischen Planungs- und Entscheidungsträger. Auf Grundlage dieser beiden Einflüsse entsteht darüber hinaus ein gesellschaftlich individuelles Bild des geografischen Raumes, das ebenfalls die Mobilitätskultur an beteiligten Orten und für beteiligte Personengruppen prägt. Weiterhin wird die Mobilitätskultur durch die Kommunikation und den Diskurs zwischen beiden Einflüssen auf der Suche nach Verbesserung der Möglichkeiten zu einem angemessenen mobilen Lebensstil einzelner oder

aller beteiligten Personengruppen fortwährend weiterentwickelt (DEFFNER, 2018, S. 439 f.; AMMOSER und HOPPE, 2006, S. 10 f.).

Die Mobilitätskultur ist eng verbunden mit dem Prozess der oben genannten Mobilitätssozialisation (WELSCH, 2015, S. 202). TULLY und BAIER (2018) formulieren diesen beiläufigen gesellschaftlichen, für die Bildung einer Mobilitätskultur wesentlichen Prozess der langfristigen Mobilitätssozialisation in ihrem Mehrebenen-Modell der Mobilitätssozialisation genauer aus. Das Modell ist in Abbildung 2.2 dargestellt.



**Abbildung 2.2:** Mehrebenen-Modell der Mobilitätssozialisation (TULLY und BAIER, 2018, S. 227).

Das grundsätzlich hierarchisch aufgebaute Modell definiert drei soziale Ebenen, die jeweils eigene Bedingungsdimensionen an die bereits in jungen Jahren beginnende Entstehung eines individuellen, mobilen Lebensstils einer Person darstellen (TULLY und BAIER, 2018, S. 231–233).

**Gesellschaftliche Bedingungen** Gesellschaftliche Bedingungen sind Einflüsse makroskopischer Gesellschaftsstrukturen auf den individuellen, mobilen Lebensstil. Die wichtigsten Bedingungen auf gesamtgesellschaftlicher Ebene sind die räumlichen Eigenheiten der jeweiligen geografischen Region sowie die dort verfügbare Infrastruktur und Technik sowie die sozialen Eigenheiten in Form von normativen und kulturellen Vorgaben und Leitbildern (TULLY und BAIER, 2018, S. 227, 231–233).

**Mesosoziale Bedingungen** Mesosoziale Bedingungen umfassen den individuellen Kontext der Sozialisation einer einzelnen Person. Sie werden vor allem durch den direkten und längerfristigen Kontakt zu anderen Personen und ihrem Mobilitätsverhalten bestimmt. Typische Vertreter dieser Bedingungen sind damit die eigene Familie und Verwandtschaft, schulische Einflüsse sowie das Verhalten Gleichaltriger. Die mesosozialen Bedingungen werden von den übergeordneten, gesellschaftlichen Bedingungen teilweise beeinflusst (TULLY und BAIER, 2018, S. 227, 234 f.).

**Persönliche Bedingungen** Persönliche Bedingungen sind die mikrosozialen Einstellungen und Möglichkeiten einer einzelnen Person. Neben den objektiven Eigenschaften wie

Alter, Geschlecht, und finanziellen Mitteln stehen auch subjektive Bedingungen wie die von der gesellschaftlichen oder mesosozialen Ebene übernommenen Werte. Die persönlichen Bedingungen sind daher zum Teil abhängig von den jeweils übergeordneten mesosozialen und gesellschaftlichen Bedingungen (TULLY und BAIER, 2018, S. 227 f., 235–238).

### 2.1.3 Verkehrsmodelle

Zur Analyse und Erklärung von Verkehrsnachfrage und Verkehrsaufkommen muss auf geeignete *Verkehrsmodelle* zurückgegriffen werden. Ein Verkehrsmodell kann, je nach Komplexität und Umfang, für unterschiedliche Fragestellungen bezüglich Verkehr und Mobilität verwendet werden.

Typische Fragestellungen, die mit einem Verkehrsmodell untersucht werden können, sind zum Beispiel die Verteilung des Modal Splits innerhalb eines lokal begrenzten Verkehrssystems oder die Auslastung beziehungsweise Fahrzeuganzahl pro Zeit innerhalb eines Straßennetzes zu den Hauptverkehrszeiten. Darüber hinaus kann ein bestehendes Verkehrsmodell genutzt werden, um die Sinnhaftigkeit infrastruktureller oder regulativer Veränderungen vorwegzunehmen. Beispielweise könnte mit einem derartigen Modell exemplarisch geprüft werden, wie sich der Ausbau einer der Hauptverkehrsstraßen des modellierten Verkehrssystems auf die oben genannte Auslastung zu den Stoßzeiten auswirkt (CASTIGLIONE et al., 2015, S. 5; ORTÚZAR und WILLUMSEN, 2011, S. 2–5).

CASTIGLIONE et al. (2015) identifizieren vier grundsätzliche Herangehensweisen, um ein Modell für Verkehrsnachfrage zu konzipieren, jede ist mit spezifischen Vor- und Nachteilen behaftet.

**Planskizzen** *Planskizzen* dienen zur groben, aber schnellen und kostengünstigen Abschätzung von Verkehrsflüssen. Die Topologie des in einer Planskizze abgebildeten Verkehrsnetzwerks wird häufig auf die Hauptverkehrswege reduziert oder verschiedene Verkehrswege werden zu einzelnen, idealtypischen Mobilitätsachsen zusammengefasst. Die Erreichbarkeit einer Straße wird in derartigen Planskizzen in der Regel vereinfacht über die Distanz zwischen Straße und Punkt im Einzugsgebiet der Straße definiert. Planskizzen können mit vergleichsweise einfachen Hilfsmitteln wie Tabellenkalkulationssoftware oder generischen Geoinformationssystemen<sup>16</sup> umgesetzt werden (KOCKELMAN et al., 2010, S. 1 f.; CASTIGLIONE et al., 2015, S. 5 f.; ORTÚZAR und WILLUMSEN, 2011, S. 430 f.).

**Strategische Planungsmodelle** *Strategische Planungsmodelle* dienen zur Untersuchung und zum Vergleich heterogener Szenarien und Lösungsansätze innerhalb eines gegebenen Verkehrssystems. Typischerweise dienen derartige Modelle zur initialen Abschätzung langfristiger, politischer Entwicklungs- und Investitionsstrategien, sind für die Untersuchung von Details im Verkehrssystem jedoch ungeeignet. Aus diesem Grund

<sup>16</sup>Geoinformationssysteme sind Informationssysteme zur Erfassung, Verarbeitung, Darstellung und Analyse räumlicher Daten (DE LANGE, 2020, S. 1 f.).

kann für die Modellierung und Berechnung strategischer Planungsmodelle ebenso wie im Fall der oben genannten Planskizzen auf generische Soft- und Hardware-Hilfsmittel zurückgegriffen werden (CASTIGLIONE et al., 2015, S. 6). Typische Fragestellungen für strategische Planungsmodelle sind zum Beispiel die Einschätzung der Verkehrsentwicklung bei konkurrierenden Entscheidungen hinsichtlich eines Verkehrssystems wie dem Ausbau des öffentlichen Personennahverkehrs im Gegensatz zur Trassierung neuer Verkehrswege im Interesse des motorisierten Individualverkehrs.

**Tripbasierte Modelle** *Tripbasierte Verkehrsmodelle* nutzen im Gegensatz zu Planskizzen oder strategischen Planungsmodellen einzelne *Trips* als Basiseinheit zur Bestimmung des Verkehrsaufkommens. Ein Trip ist die Bewegung beziehungsweise Fahrt einer Person von einem Ausgangs- zu einem Zielort. Das generische Vorgehen zur Erstellung eines tripbasierten Modells sind die folgenden vier Schritte, aus diesem Grund wird der Begriff 4-Schritte-Modell beziehungsweise -Methode häufig synonym mit dem tripbasierten Modell verwendet (CASTIGLIONE et al., 2015, S. 6).

- 1. Erzeugung der Trips** Die relevanten Ausgangs- und Zielorte innerhalb des Verkehrssystems werden bestimmt. Diese können je nach untersuchter Fragestellung und Größe des Verkehrssystems einzelne Punkte oder auch aggregierte Zonen und Regionen in der Topologie des Verkehrssystems sein (ORTÚZAR und WILLUMSEN, 2011, S. 20–22; CASCETTA, 2009, S. 172–175; CASTIGLIONE et al., 2015, S. 6).
- 2. Verteilung der Trips** Die Ausgangs- und Zielorte werden durch einzelne Trips verbunden und in einer Matrix abgebildet. Häufig frequentierte Orte müssen dementsprechend häufiger bei der Verteilung berücksichtigt werden, damit die Trips repräsentativ verteilt sind (ORTÚZAR und WILLUMSEN, 2011, S. 20–22; CASCETTA, 2009, S. 172–175; CASTIGLIONE et al., 2015, S. 6).
- 3. Zuweisung zu Verkehrsmitteln** Die Trips werden auf die im Modell vorgesehenen Verkehrsmittel verteilt. Der reale Modal Split innerhalb des zu modellierenden Verkehrssystems dient daher als Grundlage für die repräsentative Verteilung (ORTÚZAR und WILLUMSEN, 2011, S. 20–22; CASCETTA, 2009, S. 172–175; CASTIGLIONE et al., 2015, S. 6).
- 4. Zuweisung zu Routen** Die Trips werden konkreten *Routen* innerhalb des Verkehrssystems zugeordnet. So müssen für Trips via öffentlichem Personennahverkehr trotz gleicher Ausgangs- und Zielorte möglicherweise unterschiedliche Routen gewählt werden. Eine Route ist in diesem Fall der Weg von einem Ausgangsort durch ein Verkehrsnetz zu einem Zielort, im Straßenverkehr verläuft diese beispielsweise durch verschiedene Straßen (ORTÚZAR und WILLUMSEN, 2011, S. 20–22; CASCETTA, 2009, S. 172–175; CASTIGLIONE et al., 2015, S. 6).

Ergebnis dieser vier Schritte ist eine sogenannte *Origin-Destination-Matrix* (Deutsch: Start-Ziel-Matrix), welche die Anzahl aller Trips zwischen den modellrelevanten Start-

und Zielorten, angereichert um die Verkehrsmittel- und Routenverteilung, für den gewählten Zeitpunkt statisch gegenüberstellt (CASCETTA, 2009, S. 15).

Tripbasierte Modelle haben keinen direkten Zeitverlauf, da sie nur für einen einzelnen Zeitpunkt beziehungsweise für einen als statisch angenommenen Zeitraum erzeugt werden können. Die Nutzung und Auslastung eines Verkehrssystems zu unterschiedlichen Tageszeiten oder Wochentagen kann daher nur durch die Erzeugung und Verteilung von für den Zeitraum geeigneteren Trips erfolgen (GRETHER et al., 2009, S. 167; CASTIGLIONE et al., 2015, S. 6).

**Aktivitätsbasierte Modelle** *Aktivitätsbasierte Verkehrsmodelle* verwenden einzelne *Aktivitäten* zur Modellierung des Verkehrssystems. Eine Aktivität ist eine fortlaufende Tätigkeit einer Person an einem gleichbleibenden Ort, beispielsweise der Aufenthalt zu Hause, ein Schulbesuch oder ein Einkauf im Supermarkt. Aktivitäten sind daher an konkrete Tageszeiten gebunden und mit einer Dauer verknüpft. Unterschiedliche Aktivitäten können daher analog zum Vorgehen in der tripbasierten Modellierung genutzt werden, um zunächst einzelne Trips und anschließend den Modal Split und die Routen zwischen zwei Aktivitäten zu definieren (CASTIGLIONE et al., 2015, S. 6 f.; ORTÚZAR und WILLUMSEN, 2011, S. 473 f.; SHIFTAN und SUHRBIER, 2002, S. 147 f.; McNALLY und RINDT, 2007).

Ein aktivitätsbasiertes Modell bietet an dieser Stelle jedoch zwei Vorteile gegenüber der oben beschriebenen tripbasierten Modellierung. Erstens bildet ein aktivitätsbasiertes Modell durch den zeitlichen Bezug jeder Aktivität und der dazugehörigen Trips bereits alle modellrelevanten Zeiträume ab, es handelt sich dabei also um ein dynamisches Modell, sodass keine unterschiedlichen Modelle für unterschiedliche Tageszeiten oder Wochentage erstellt werden (CASCETTA, 2009, S. 231 f.). Zweitens können einzelne Trips zu *Touren* zusammengefasst werden, um realistische, logisch zusammenhängende Verkehrsflüsse in dynamischer Abhängigkeit von Tageszeiten und Wochentagen zu ermöglichen. Eine Tour ist eine Abfolge von Trips, die schlussendlich am selben Ort endet, an dem sie anfang. In Bezug auf Personenverkehr ist dies typischerweise ein Wohnort oder Wohngebiet (CASTIGLIONE et al., 2015, S. 8; ORTÚZAR und WILLUMSEN, 2011, S. 473 f.; CASCETTA, 2009, S. 219–221; McNALLY und RINDT, 2007). Aktivitätsbasierte Modelle sind daher stets auch tourbasierte Modelle und werden gelegentlich als solche bezeichnet (BOWMAN und BEN-AKIVA, 2000, S. 3).

Für komplexere Verkehrsmodelle mit einem erhöhtem Detailbedarf hinsichtlich räumlicher und zeitlicher Faktoren sowie einzelner Personen und Haushalte werden nahezu ausschließlich tripbasierte oder aktivitätsbasierte Modelle genutzt. Die Vorteile dieser Modelle gehen jedoch mit höheren Entwicklungskosten und längerer Laufzeit bei der Umsetzung in einem technischen System einher (CASTIGLIONE et al., 2015, S. 7).

## 2.2 Simulation

*Simulation* ist die Nachbildung der Funktionsweise eines realweltlichen Systems oder Vorgangs über einen bestimmten Zeitraum hinweg. Diese Nachbildung erfolgt durch die Formulierung und Erstellung eines geeigneten Modells (BANKS et al., 2005, S. 3; BUNGARTZ et al., 2013, S. 1; BOSSEL, 2004, S. 15). Nach STACHOWIAK (1973) zeichnet sich ein Modell durch drei Merkmale aus:

**Abbildungsmerkmal** Ein Modell ist immer eine Abbildung eines natürlichen oder künstlichen Originals, dieses Original kann jedoch ebenfalls bereits ein Modell sein. Selbst die Abbildung eines rein gedanklichen Prozesses ist demnach ein Modell, da erst die Existenz des Gedankens die Modellierung ermöglicht (STACHOWIAK, 1973, S. 131 f.; BUNGARTZ et al., 2013, S. 5).

**Verkürzungsmerkmal** Ein Modell beinhaltet nicht alle Eigenschaften des modellierten Originals, es stellt damit also nur einen Ausschnitt des abgebildeten Originals dar. Der Umfang des Modells ist also an die vom jeweiligen Modellierer als wesentlich befundenen Eigenschaften gebunden (STACHOWIAK, 1973, S. 132; BUNGARTZ et al., 2013, S. 5).

**Pragmatisches Merkmal** Ein Modell ist immer an einen bestimmten Zweck gebunden. Aufgrund des Verkürzungsmerkmals kann in aller Regel kein vollständiges Modell formuliert werden, dass für jeden Zweck geeignet ist. Darüber hinaus richtet sich ein Modell immer an einen natürlichen oder künstlichen Benutzer, der das Modell für seinen vorgesehenen Zweck einsetzt. Das Modell muss daher auch nur während dieses Einsatzzeitraums Bestand und Gültigkeit haben (STACHOWIAK, 1973, S. 132 f.; BUNGARTZ et al., 2013, S. 5).

Simulation kann aus verschiedenen Gründen ein geeignetes Hilfsmittel bei der Erklärung unbekannter Zusammenhänge sein, beispielsweise kann der reale, zu beobachtende physische Raum oder Zeitraum zu groß sein, als dass er ohne ein reduziertes Modell sinnvoll untersucht werden kann. Weiterhin ist Simulation ein sinnvoller Ansatz zur Beantwortung von Fragen, die zum Beispiel aus Kosten- oder Sicherheitsgründen besser an einem Modell als unmittelbar an der Realität durchzuführen sind. Damit einher geht die Möglichkeit des vorgelagerten Vergleichs von Alternativen in Entscheidungssituationen anhand von unterschiedlichen Modellen oder Parameterkonfigurationen, um möglichst informierte Entscheidungen treffen zu können (BUNGARTZ et al., 2013, S. 1 f.; BANKS et al., 2005, S. 3; BOSSEL, 2004, S. 15). Darüber hinaus kann Simulation auch als Ansatz zur Untersuchung sozialwissenschaftlicher und wissenschaftstheoretischer Gedankenexperimente herangezogen werden, solange ein geeignetes Modell formuliert werden kann (SAAM, 2015, S. 65 f.). Beispielsweise können spieltheoretische Fragestellungen vergleichsweise einfach modelliert und durch anschließende Simulation untersucht werden, um alternative Spielstrategien hinsichtlich ihrer zu erwartenden Ergebnisse beziehungsweise eintretender Gleichgewichte zu betrachten

(BUNGARTZ et al., 2013, S.81 f., 88 f.; OSBORNE und RUBINSTEIN, 1994, S. 14 f.; BARTHLOMAE und WIENS, 2016, S. 50 f.). Mit Blick auf *Simulationsmodelle* im Speziellen unterscheidet WEISBERG (2013) drei grundsätzliche Klassen von Simulationsmodellen:

**Gegenständliches Simulationsmodell** Ein gegenständliches (Englisch: concrete) Simulationsmodell ist eine physische Struktur, deren Beschaffenheit als Ersatz für die Eigenschaften des zu modellierenden Systems dient. Gegenständliche Modelle können bereits existierende Strukturen sein, die für die Modellierung geeignet sind, oder eigens dafür konstruiert werden, darüber hinaus gelten jedoch auch rein sprachlich kommunizierte und konzeptionelle Modelle als gegenständliche Simulationsmodelle (WEISBERG, 2013, S. 7, 24 f.; SONAR, 2001, S. 21 f.).

OSTROM (1988) benennt als Vorteile gegenständlicher, insbesondere sprachlicher Modelle die hohe Flexibilität bei der Beschreibung nahezu beliebiger Konzepte. Demgegenüber bietet ein rein sprachliches Modell jedoch nur wenig bis keine Möglichkeit, durch die praktische Ausführung des Modells eine Lösung des modellierten Systems zu bestimmen (OSTROM, 1988, S. 383; SAAM, 2009b, S. 517 f.).

**Mathematisches Simulationsmodell** Ein mathematisches Simulationsmodell ist eine durch Gleichungssysteme, Funktionen oder Graphen beschriebene, berechenbare Struktur zur abstrakten Beschreibung des zu modellierenden Systems. Der Zustand eines mathematischen Simulationsmodells ist abhängig von seinen Eingabewerten und gegebenenfalls den vorhergegangenen Zuständen. Die Menge von möglichen Zuständen, die ein mathematisches Simulationsmodell aufgrund seiner Eingabe-, Zustands- und Ausgabewerte annehmen kann, wird als Zustandsraum bezeichnet (WEISBERG, 2013, S. 7, 25–29; SONAR, 2001, S. 22).

Nach OSTROM (1988) liegen die Vorteile eines mathematischen Simulationsmodells insbesondere in der hohen Präzision sowie der Unmissverständlichkeit seiner Variablen und Zusammenhänge. Andererseits ist ein mathematisches Simulationsmodell nur dann ein geeignetes Mittel, wenn das zu modellierende System vergleichsweise einfach zu beschreiben ist (OSTROM, 1988, S. 383; SAAM, 2009b, S. 517 f.).

**Rechnerisches Simulationsmodell** Ein rechnerisches (Englisch: computational) Simulationsmodell wird durch eine Menge von Algorithmen beschrieben, die das Verhalten des zu modellierenden Systems annähern. Typischerweise wird es für die Ausführung im Rahmen einer späteren Computersimulation formuliert, daher werden die Begriffe rechnerisches oder numerisches Simulationsmodell, Computermodell und Computersimulationsmodell teilweise synonym verwendet. WEISBERG (2013) beschreibt rechnerische Simulationsmodelle letztendlich als Untermenge der mathematischen Simulationsmodelle, hebt jedoch zwei wesentliche Eigenschaften hervor, die eine Einordnung als eigenständige Modellklasse rechtfertigen: Erstens ist es vergleichsweise einfach, rechnerische Simulationsmodelle durch bedingte Anweisungen und Verzweigungen innerhalb der verwendeten Algorithmen zu steuern, eine Eigenschaft, die innerhalb von

Gleichungssystemen in mathematischen Modellen erheblich schwieriger umzusetzen ist. Zweitens gestatten rechnerische Simulationsmodelle den Einsatz probabilistisch gestalteter Zustandsveränderungen, wenn ein deterministisches Verhalten des zu modellierenden Systems unbekannt oder zu komplex für die Modellierung ist (WEISBERG, 2013, S. 7, 29–31; SONAR, 2001, S. 22 f.).

OSTROM (1988) hebt hinsichtlich rechnerischer Simulationsmodelle hervor, dass sie sowohl zur Abbildung qualitativer, sprachlicher Konstrukte geeignet sind, jedoch ebenso auch mathematische Systeme abbilden können. Darüber hinaus können rechnerische Simulationsmodelle nicht nur zur Bestimmung konkreter Lösungen anhand unterschiedlicher Parameterkombinationen genutzt werden, sondern auch zur Analyse der Systemdynamik bei der Erzeugung der Lösung (OSTROM, 1988, S. 383 f.; SAAM, 2009b, S. 517 f.).

### 2.2.1 Unterscheidungsmerkmale für Simulationsmodelle

Modelle im Allgemeinen und Simulationsmodelle im Speziellen können unterschiedlich gestaltet und umgesetzt werden. LEEMIS und PARK (2006) benennen eine Taxonomie mit den folgenden drei wesentlichen Unterscheidungsmerkmalen, die herangezogen werden können, um die grundsätzliche Art eines Simulationsmodells zu bestimmen.

**Statisches oder dynamisches Simulationsmodell** Ein Simulationsmodell kann als statisches oder dynamisches Modell gestaltet sein. Ein statisches Modell besitzt keinen zeitlichen Verlauf, vielmehr stellt es lediglich das Ergebnis der gewählten Belegung von Parametern und Modellvariablen zu einem einzelnen Zeitpunkt dar. Dementsprechend handelt es sich eher um die Berechnung eines Lösungsmodells anhand der Parameter und Variablen. Demgegenüber besitzt ein dynamisches Simulationsmodell einen zeitlichen Verlauf, sodass sein Verhalten nicht nur unmittelbar von den Eingabeparametern und -variablen abhängt, sondern auch von vorherigen Zuständen des Modells während des Simulationslaufs, also der Durchführung der Simulation über den vorgesehenen Zeitraum. Dieser Zeitraum bezieht sich auf den zu modellierenden Zeitraum, in dem das Modell Gültigkeit haben soll und ist unabhängig von der real benötigten Zeit zur Durchführung des Simulationslaufs (LEEMIS und PARK, 2006, S. 2 f.; BANKS et al., 2005, S. 11; SAAM, 2009b, S. 522).

**Deterministisches oder stochastisches Simulationsmodell** Ein Simulationsmodell kann vollständig deterministisch oder wenigstens teilweise stochastisch gestaltet sein. Ein deterministisches Modell führt bei gleichen Eingaben stets zum gleichen Ergebnis, eine einzelne Modellberechnung beziehungsweise ein einzelner Simulationslauf ist daher ausreichend, um eine bestimmte Belegung von Parametern und Modellvariablen abschließend zu untersuchen. Wie bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben, bieten insbesondere rechnerische Simulationsmodelle jedoch alternativ die Möglichkeit, potenziell deterministische, aber zu komplexe oder unbekannte Prozesse stochastisch anzunä-

hern. Bei ausreichend häufiger Durchführung einer bestimmten Belegung von Parametern und Modellvariablen kann somit gemäß dem Gesetz der großen Zahlen<sup>17</sup> das wahrscheinlichste Verhalten des modellierten Systems prognostiziert werden (LEEMIS und PARK, 2006, S. 2 f.; BANKS et al., 2005, S. 11 f.; SAAM, 2009b, S. 522; BUNGARTZ et al., 2013, S. 11 f.).

**Diskretes oder kontinuierliches Simulationsmodell** Ein Simulationsmodell kann als diskretes oder kontinuierliches Modell gestaltet sein. Diese Unterscheidung bezieht sich jedoch in der Regel lediglich auf einzelne Aspekte des Modells, sodass ein einzelnes Modell sowohl diskrete als auch kontinuierliche Modellaspekte enthalten kann. Ein kontinuierliches Modell basiert typischerweise auf stetigen mathematischen Funktionen und Gleichungssystemen, sodass das Verhalten des Modells prinzipiell lückenlos beschrieben werden kann. Demgegenüber sind die Übergänge zwischen einzelnen Zuständen in einem diskreten Modell sprunghaft, zwischen den Zustandsveränderungen ist das Modell in einem konstanten Zustand (LEEMIS und PARK, 2006, S. 2 f.; BANKS et al., 2005, S. 9, 12; SAAM, 2009b, S. 522; BUNGARTZ et al., 2013, S. 11).

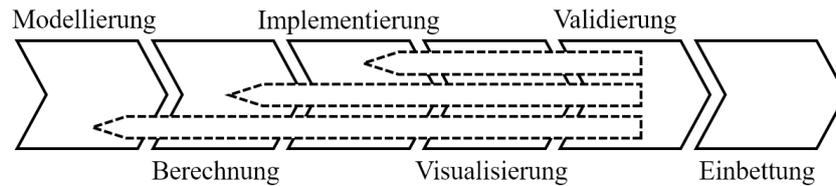
Eng mit dem Begriff der diskreten Simulation verbunden ist das Prinzip der *ereignisorientierten Simulation* (Englisch: discrete-event simulation). Bei einer ereignisorientierten Simulation wird der Zustand des Simulationsmodells während des Simulationslaufs nur an einzelnen Zeitpunkten, sogenannten Ereignissen (Englisch: events), verändert. Zwischen einzelnen Ereignissen verändert sich das Modell nicht. Bei der Ausführung des Modells müssen daher lediglich die einzelnen Ereignisse in korrekter Reihenfolge abgearbeitet werden, sodass die real benötigte Zeit zur Durchführung der Simulation erheblich reduziert werden kann (BANKS et al., 2005, S. 12; LEEMIS und PARK, 2006, S. 99 f., 186 f.). Sonderfall der ereignisorientierten Simulation ist die *zeitdiskrete Simulation*, bei der die Ereignisse gleichmäßig verteilt sind, in der Regel um den in der Realität kontinuierlichen Zeitverlauf in einem Simulationsmodell zu diskretisieren (TANG et al., 2020, S. 143 f.).

## 2.2.2 Entwicklung und Durchführung einer Computersimulation

Zur erfolgreichen Entwicklung und anschließenden Durchführung eines Computersimulationsvorhabens empfiehlt sich ein strukturiertes Vorgehen. BUNGARTZ et al. (2013) benennen in ihrer Simulationspipeline sechs Teilschritte, die zur erfolgreichen Umsetzung eines Computersimulationsvorhabens durchgeführt werden müssen. Die Darstellung in Abbildung 2.3 zeigt diese Schritte sowie die möglicherweise notwendigen Rückbezüge während der Entwicklung der Simulation.

**Modellierung** Der erste Schritt der Simulationspipeline ist die formale Modellierung des zu untersuchenden Systems, die Festlegung der Systemgrenzen sowie die Identifikati-

<sup>17</sup>Das Gesetz der großen Zahlen besagt, dass die relative Häufigkeit eines Zufallsergebnisses bei ausreichend häufiger Wiederholung des Zufallsexperiments gegen die tatsächliche Wahrscheinlichkeit des Ergebnisses konvergiert.



**Abbildung 2.3:** Teilschritte der Simulationspipeline zur Durchführung eines Computersimulationsvorhabens (BUNGARTZ et al., 2013, S. 3).

on der wesentlichen Annahmen und Einschränkungen. Diese Modellierung unterliegt daher den oben beschriebenen Einschränkungen eines Modells (BUNGARTZ et al., 2013, S. 3). Bei der Erstellung des Modells sollten bereits die Anforderungen an den geplanten Nutzen der Simulation berücksichtigt werden, um eine unnötig komplexe Modellbildung zu vermeiden. Darüber hinaus besteht eine ständige Wechselwirkung zwischen der Modellbildung einerseits und der Erhebung der im Modell genutzten Datengrundlage andererseits (BANKS et al., 2005, S. 12–14).

**Berechnung** Der als Berechnung bezeichnete zweite Schritt umfasst die Überführung des bis dahin konzeptionellen Modells in einen zur Umsetzung in einer Computersimulation geeigneten, typischerweise diskretisierten Entwurf. Dies beinhaltet insbesondere die Identifikation oder Entwicklung geeigneter Datenstrukturen und Verfahren für die anschließende technische Implementierung der Simulation (BUNGARTZ et al., 2013, S. 3).

**Implementierung** Die Implementierung ist der dritte Schritt und beinhaltet die konkrete technische Umsetzung der zuvor entwickelten Simulation. Neben der unmittelbaren Umsetzung der Simulation selbst gehören jedoch auch alle weiteren Aspekte guter Software-Entwicklung zur Implementierung (BUNGARTZ et al., 2013, S. 3). Die beinhaltet zum Beispiel die Identifikation geeigneter Programmiersprachen, Entwicklungsumgebungen und bereits existierender Software für die technische Umsetzung der Simulation (BANKS et al., 2005, S. 14). Mit Abschluss des Implementierungsschritts ist die grundsätzliche Erstellung der Simulation abgeschlossen, die folgenden Schritte beziehen sich daher nicht mehr primär auf ihre Entwicklung, sondern ihre Nutzung.

**Visualisierung** Der vierte Schritt ist die Visualisierung der Ergebnisse und des Verhaltens der Simulation. Im weiteren Sinne umfasst dieser Schritt nicht nur die tatsächliche visuelle beziehungsweise grafische Darstellung der Simulationsergebnisse, sondern auch alle damit verbundenen, notwendigen Vorgänge zur Datenexploration und Analyse des Simulationsverhaltens. Insbesondere bei Simulationen, die viele und hochdimensionale Datensätze generieren, ist die Bestimmung geeigneter Verfahren zur Darstellung und Analyse der Ergebnisse essenziell (BUNGARTZ et al., 2013, S. 3).

**Validierung** Der fünfte Schritt ist die Validierung der Simulation auf Grundlage der zuvor erhobenen Ergebnisse. Sollten sich bei dieser Evaluation der Simulationsergebnis-

se Fehler im konzeptionellen Modell, dem Entwurf oder der technischen Umsetzung herausstellen, muss gegebenenfalls in den jeweiligen Schritt zurückgegangen und der gesamte Prozess von dort neu durchlaufen werden (BUNGARTZ et al., 2013, S. 3). Die Ursache für Fehler in der Simulation kann dabei sowohl durch eine fehlerhafte Umsetzung als auch durch eine unzureichende Eignung hinsichtlich des beabsichtigten Zwecks der Simulation selbst begründet sein. Daher umfasst dieser als Validierung bezeichnete Schritt nicht nur ebenjene Validierung, sondern weiterhin auch die Verifikation der Simulation (BANKS et al., 2005, S. 14 f.). Dieser im Allgemeinen als Verifikation und Validierung bezeichnete Prozess zielt darauf ab, sowohl die korrekte Anforderungserfüllung im Sinne der Verifikation als auch die grundsätzliche Eignung der Anforderungen für den Zweck des entwickelten, technischen Artefakts im Sinne der Validierung sicherzustellen (WASSON, 2006, S. 693; PARTSCH, 2010, S. 51; IEEE Std 1012-2016/Cor1-2017, S. 16).

**Einbettung** Der sechste und letzte Schritt ist die Einbettung der Simulation und ihrer Ergebnisse in den jeweiligen Nutzungskontext. Eine Simulation dient keinem Selbstzweck, sondern soll zur Untersuchung und Beantwortung bestimmter Fragestellungen genutzt werden können. Neben dieser zweckgebundenen Anwendung ist es weiterhin ratsam, eine einfache Anpassbarkeit der Simulationsparameter zu gewährleisten, um die Simulation durch geringfügige Veränderungen gegebenenfalls auch für dem ursprünglichen Zweck ähnliche Fragestellungen einsetzen zu können (BUNGARTZ et al., 2013, S. 3; BANKS et al., 2005, S. 15 f.).

## 2.3 Künstliche Intelligenz

Die Zielsetzung der *künstlichen Intelligenz* kann je nach Standpunkt auf unterschiedliche Art und Weise definiert werden. RUSSELL und NORVIG (2010) identifizieren zwei wesentliche Zieldimensionen der künstlichen Intelligenz, die zur Erklärung des Begriffs herangezogen werden können: Einerseits kann zwischen intelligentem Denken und intelligentem Handeln, andererseits zwischen menschlicher und rationaler Intelligenz unterschieden werden. Die Kombination dieser möglichen Ausprägungen gestattet die folgenden vier grundsätzlichen Sichten auf Systeme der künstlichen Intelligenz (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 1 f.):

**Systeme zur Nachbildung von menschlichem Denken** Bei der Nachbildung von menschlichem Denken wird mithilfe empirischer Methoden wie psychologischer Experimente und Hirnscans versucht, allgemeingültige Modelle und Systeme zur Erklärung von menschlichen Denkprozessen zu formulieren. Diese Sicht wird insbesondere innerhalb der Kognitionswissenschaft verfolgt, die dazu Ansätze aus Philosophie, Psychologie, Linguistik, Informatik, Anthropologie und Neurowissenschaft vereint, um menschliche Gedankengänge und Urteilsvermögen zu verstehen und authentisch modellieren zu können (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 3; MILLER, 2003, S. 143).

**Systeme zur Nachbildung von rationalem Denken** Im Gegensatz zum oben beschriebenen Fokus auf möglichst menschliches Denken wird bei der Nachbildung von rationalem Denken ein mathematisch-technischer Ansatz aus logischem Schließen und formaler Deduktion verfolgt. Dieser Sicht folgend ergibt sich Intelligenz insbesondere aus dem Treffen korrekter und optimaler Entscheidungen auf Grundlage aller zur Entscheidungsfindung zur Verfügung stehenden Informationen (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 4).

**Systeme zur Nachbildung von menschlichem Handeln** Wird die Nachbildung von menschlichem Handeln in den Vordergrund gestellt, so zeichnet sich künstliche Intelligenz insbesondere dadurch aus, dass ihr beobachtbares Verhalten möglichst nicht von menschlichem Verhalten in vergleichbaren Situationen zu unterscheiden sein soll beziehungsweise dieses von einem außenstehenden Beobachter als menschlich aufgefasst wird. Konzeptionelle Grundlage für die Bestimmung von Intelligenz nach dieser Sicht ist der von TURING (1950) formulierte und später nach ihm benannte Turing-Test, der die Erfüllung ebenjener Merkmale als für intelligentes Verhalten wesentlich benennt (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 2 f.; TURING, 1950).

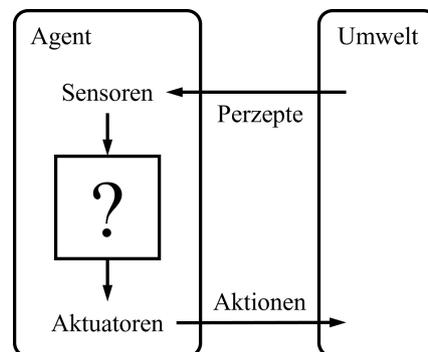
**Systeme zur Nachbildung von rationalem Handeln** Die letzte mögliche Sicht in dieser Unterscheidung ist die Nachbildung von rationalem Handeln. Diese Auslegung stellt das Konzept des rationalen Agenten in den Mittelpunkt. Dieser ist eine handlungsfähige Entität, die im Austausch mit der für sie vorgesehenen Umwelt steht und ihr Verhalten so ausrichtet, dass sie ein für sie bestmögliches Ergebnis erwarten kann, dies gegebenenfalls auch bei Unsicherheit oder limitierter Entscheidungszeit (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 4 f., 37, WOOLDRIDGE, 2002, S. 15).

Alle vier Sichten und die damit verbundenen Herangehensweisen stehen nicht zwangsweise für sich alleine. Konzepte und Methoden können kombiniert werden, um neue Lösungsansätze zu konzipieren (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 2). Beispielweise ist auch für Ansätze, die vorrangig die intelligente Handlung als Ziel betonen, ein geeigneter, interner Mechanismus zur Entscheidungsfindung erforderlich. Weiterhin können die beiden technisch leichter umsetzbaren Ansätze rationaler Intelligenz als Rahmen beziehungsweise Plattform für die Umsetzung menschenähnlicher Intelligenz genutzt werden. Aus diesem Grund konzentrieren sich die weiteren Inhalte dieses Abschnitts auf das Prinzip des rationalen Agenten sowie die damit verbundenen strukturellen und funktionalen Ansätze zur Entwicklung künstlicher Intelligenz.

### 2.3.1 Der intelligente Agent

Ein *Agent* ist autonom in der Lage, seine Umwelt durch *Perzepte* wahrzunehmen und diese durch *Aktionen* zu beeinflussen. Der abstrakte Prozess, der von den wahrgenommenen Perzepten zu der durchzuführenden Aktion führt, ist die *Agentenfunktion*. Die konkrete,

typischerweise technische Umsetzung der Agentenfunktion wird als *Agentenprogramm* bezeichnet (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 34 f.; WOOLDRIDGE, 2002, S. 15 f.). Dieses Zusammenspiel von Agent und Umwelt ist in Abbildung 2.4 grafisch dargestellt.



**Abbildung 2.4:** Wechselseitige Abhängigkeit zwischen Agent und Umwelt durch Wahrnehmung von Perzepten, Verarbeitung durch eine beliebige Agentenfunktion und Ausführung von Aktionen des Agenten. Aus dem Englischen übersetzt nach RUSSELL und NORVIG (2010, S. 35).

Nach WOOLDRIDGE (2002) muss ein Agent drei wesentliche Eigenschaften erfüllen, um in Hinblick auf seinen Einsatzzweck als *intelligenter Agent* identifiziert werden zu können: Der Agent muss reaktiv auf Veränderungen in seiner Umwelt reagieren können, er muss proaktiv die Initiative ergreifen können, um seine Ziele zu verfolgen und er muss Sozialverhalten an den Tag legen können, um mit anderen Agenten oder Menschen kommunizieren oder interagieren zu können (WOOLDRIDGE, 2002, S. 23; FERBER, 2001, S. 29).

Neben diesen allgemeinen, konzeptionellen Eigenschaften können Agenten auch praktisch gestaltet werden und damit auf informatisch-technischer Ebene von bestehenden Paradigmen wie der Objektorientierung abgegrenzt werden. Die agentenorientierte Programmierung erweitert die objektorientierte Programmierung insoweit, als die vergleichsweise starke Datenkapselung innerhalb der Agenten zur Folge hat, dass diese in der Regel nicht von außen aufgerufen werden können, sondern selbstständig die für sie zugänglichen Systemkomponenten beobachten und bei Bedarf gegebenenfalls entsprechende Methoden aufrufen müssen (WOOLDRIDGE, 2002, S. 25–27; SHOHAM, 1993, S. 55–57; BUSSMANN et al., 2000).

### 2.3.1.1 Aufgabenumgebungen für intelligente Agenten

Die *Aufgabenumgebung* eines intelligenten Agenten spielt eine wesentliche Rolle bei der Formulierung der Agentenfunktion und der Konzipierung des damit verbundenen Agentenprogramms. Selbst ohne Kenntnis der internen Funktionsweise eines Agenten kann dieser durch die Beschreibung seiner Aufgabenumgebung genauer spezifiziert werden. RUSSELL und NORVIG (2010) schlagen dazu mit der *PEAS-Beschreibung* (performance measure, environment, actuators, sensors. Deutsch: Leistungsbewertung, Umwelt, Aktuatoren, Sensoren) vier Dimensionen vor, anhand derer die Aufgabenumgebung eines Agenten systematisch definiert und eingegrenzt werden kann (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 40 f.):

**Leistungsbewertung** *Leistungsbewertungen* sind die Maße, anhand derer die Güte eines Agenten hinsichtlich seines Zwecks bewertet werden kann. Einzelne Leistungsbewertungen sind zunächst voneinander unabhängig und können gegebenenfalls auch zueinander widersprüchlich sein. Es liegt daher am tatsächlichen Verhalten des Agenten, diese Maße sinnvoll zu vereinen und Kompromissmöglichkeiten zu identifizieren (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 40).

**Umwelt** Die *Umwelt* eines Agenten umfasst alle für eine Aufgabe wesentlichen Entitäten und Strukturen, die nicht Teil des Agenten selbst sind, sowie die abstrakte Position des Agenten innerhalb der Umwelt. Die zu berücksichtigende Umwelt ist an den Zweck des Agenten gebunden, es ist daher nicht notwendig, für den Zweck irrelevante Aspekte überhaupt in die Beschreibung mit einzubeziehen (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 40 f.). Die Umwelt eines Agenten muss nicht zwangsweise physisch sein, auch eine virtuelle Umwelt ist je nach Zweck möglich (FERBER, 2001, S. 32 f.).

**Aktuatoren** *Aktuatoren* sind sämtliche Fähigkeiten eines Agenten, durch Aktionen Einfluss auf die Umwelt zu nehmen, indem er sich selbst oder andere Aspekte der Umwelt verändert. Dies kann sowohl die physische Manipulation der Umwelt als auch die Veränderung einer virtuellen Umwelt bedeuten (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 41). Für einen erfolgreichen Agenten müssen die Aktuatoren zur Veränderung der Umwelt hinsichtlich der durch die Leistungsbewertung geforderten Kriterien geeignet sein (FERBER, 2001, S. 32 f.).

**Sensoren** *Sensoren* sind sämtliche Mittel eines Agenten, einzelne Perzepte aus der Umwelt wahrzunehmen, um den aktuellen Zustand der Umwelt und seine Position darin zu bestimmen. Dies ist notwendig, um sowohl durch den Agenten als auch durch äußere Umstände verursachte Veränderungen der Umwelt zu erkennen (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 41 f.). Auch für Sensoren gilt, dass sich diese nicht auf Perzepte aus der physischen Umwelt beschränken müssen, sondern auch auf virtuelle Perzepte. Weiterhin gilt für einen erfolgreichen Agenten, dass die Sensoren des Agenten die zur Leistungsbewertung relevanten Kriterien erfassen können müssen (FERBER, 2001, S. 32 f.).

Neben der PEAS-Beschreibung kann die Aufgabenumgebung eines Agenten anhand weiterer Dimensionen kategorisiert werden. Analog zur Beschreibung der Unterscheidungsmerkmale eines Simulationsmodells in Abschnitt 2.2.1 kann auch eine Aufgabenumgebung in statische oder dynamische, deterministische oder stochastische sowie diskrete oder kontinuierliche Umgebungen kategorisiert werden: Eine statische Umgebung ist unveränderlich zwischen zwei Perzepten eines Agenten, während sich eine dynamische Umgebung auch während des Entscheidungsprozesses des Agenten verändern kann. In einer deterministischen Umgebung führen gleiche Aktionen bei gleichem Zustand der Welt stets zum gleichen Ergebnis, während das Ergebnis einer Aktion in einer stochastischen Umgebung unsicher ist. Eine diskrete Umgebung hat eine endliche Menge von möglichen Zuständen sowie Perzepten und Aktionen,

während eine kontinuierliche Umgebung in mindestens einer dieser Dimensionen unbegrenzt ist (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 43 f.).

Darüber hinaus können weitere, für die Aufgabenumgebung eines Agenten spezielle Merkmale zur Unterscheidung herangezogen werden: bekannte oder unbekannte, vollständig oder teilweise beobachtbare, episodische oder sequenzielle Umgebung sowie Einzel- oder Multiagentenumgebung.

In einer bekannten Aufgabenumgebung sind die Ergebnisse beziehungsweise Wahrscheinlichkeiten von Ergebnissen einzelner Aktionen grundsätzlich bekannt, in einer unbekanntem Umgebung besteht für den Agenten demgegenüber initial kein Zusammenhang zwischen möglichen Aktionen und den damit verbundenen zu erwartenden Ergebnissen. Der Agent agiert daher zunächst zwangsweise vollständig zufällig. Damit ein Agent selbstständig Strategien zur Erfüllung seiner Leistungsbewertung entwickeln kann, muss dieser lernfähig sein (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 44).

In einer vollständig beobachtbaren Aufgabenumgebung kann ein Agent mithilfe seiner Sensoren jederzeit sämtliche entscheidungsrelevanten Informationen beziehen. In einer nur teilweise beobachtbaren Umgebung kann im Gegenzug nicht zu jedem Zeitpunkt sichergestellt werden, dass der Agent seine Umgebung vollständig erfassen kann (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 42).

In einer episodischen Aufgabenumgebung spielen vergangene Perzepte, Aktionen und Zustände keine Rolle für den aktuellen Zeitpunkt, alle Entscheidungsvorgänge des Agenten sind daher voneinander unabhängig. Demgegenüber können unterschiedliche Perzept- und Aktionsfolgen des Agenten sowie vergangene Zustände der Umwelt in einer sequentiellen Umgebung die aktuelle Entscheidungsfindung wesentlich beeinflussen (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 43 f.).

In einer Einzelagentenumgebung existiert nur ein einziger Agent in einer intelligenten, handlungsfähigen Funktion, alle weiteren Strukturen und Entitäten der Umwelt sind von den innerhalb der Umgebung geltenden Regeln und Gesetzen abhängig. In einer Multiagentenumgebung beziehungsweise einem *Multiagentensystem* existieren mindestens zwei autonom handlungsfähige Agenten. Das Verhältnis der Agenten eines Multiagentensystems untereinander kann dazu kooperativ, konkurrierend oder voneinander unabhängig sein (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 42 f.; WOOLDRIDGE, 2002, S. 105 f.).

### 2.3.1.2 Klassen intelligenter Agenten

RUSSELL und NORVIG (2010) unterscheiden die folgenden fünf wesentlichen Klassen intelligenter Agenten. Diese *Agentenklassen* können als Grundlage für die Konzipierung eines für die gewünschte Agentenfunktion geeigneten Agentenprogramms dienen (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 46 f.). Die Komplexität und Mächtigkeit der Klassen sowie die Erfüllung der in Abschnitt 2.3.1 dargestellten Eigenschaften intelligenter Agenten nach WOOLDRIDGE (2002) steigen mit jeder Klasse an:

**Einfacher Reflexagent** Der *einfache Reflexagent* trifft seine Verhaltensentscheidungen ausschließlich auf Grundlage seiner aktuellen Perzepte. Notwendig sind dazu Konditionalregeln, die einen unmittelbaren Zusammenhang zwischen den aktuellen Sensoreingaben und Aktionsausgaben herstellen. Voraussetzung für einen erfolgreichen, einfachen Reflexagenten ist häufig die vollständige Beobachtbarkeit der Umwelt durch den Agenten, da der Agent jede neue Sensoreingabe einzeln verarbeitet und somit nicht den Kontext seiner Situation kennt. Weiterhin sind einfache Reflexagenten anfällig für Endlosschleifen, wenn unterschiedliche Zustände sich jeweils gegenseitig durch die Entscheidungsregeln des Agenten bedingen (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 48–50).

**Modellbasierter Reflexagent** Der *modellbasierte Reflexagent* erweitert den oben beschriebenen einfachen Reflexagenten um einen auf Grundlage der bisherigen Sensoreingaben gebildetes, internes Modell. Dieses interne Modell über den Kontext der Umwelt, in der sich der Agent befindet, erlaubt es dem Agenten, Entscheidungen zu treffen, die zusätzlich zu den aktuellen Sensoreingaben auch die Vergangenheit mit einbeziehen. Aktuelle Sensoreingaben können mit dem Modell verglichen werden, um festzustellen, ob sich die Situation, in der sich der Agent befindet, zwischen den vorherigen Eingaben wesentlich verändert hat (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 50–52). Ein komplexeres, internes Modell kann weiterhin auch für Prognosen genutzt werden, um Annahmen darüber zu treffen, wie sich das Verhalten anderer Entitäten in der Umwelt in Zukunft potenziell entwickeln könnte (ALBRECHT und STONE, 2018).

**Zielorientierter Agent** Der *zielorientierte Agent* ist im Gegensatz zu den oben beschriebenen Reflexagenten in der Lage, sein Verhalten zu planen und damit verbundene zielführende Handlungsoptionen bereits vor der Ausführung zu identifizieren, anstatt sein Verhalten reflexartig auf Grundlage von Konditionalregeln zu bestimmen. Der zielorientierte Agent kann nominal<sup>18</sup> feststellen, ob eine Handlungsoption ein gesetztes Ziel erfüllt. Erreicht der Agent einen Zielzustand, kann er diesen erkennen und entsprechend reagieren, daher ist er im Gegensatz zu Reflexagenten weniger anfällig für Endlosschleifen (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 52 f.).

**Nutzenmaximierender Agent** Der *nutzenmaximierende Agent* ist eine Erweiterung des zielorientierten Agenten, der zusätzlich zur nominalen Erkennung von zielförderlichem Verhalten in der Lage ist, mithilfe einer Nutzenfunktion den abstrakten Nutzen unterschiedlicher Handlungsoptionen mindestens ordinal<sup>19</sup> zu sortieren oder gegebenenfalls sogar kardinal<sup>20</sup> zu quantifizieren. Somit kann der nutzenmaximierende Agent auch bei mehreren zielführenden Handlungsoptionen eine optimale Entscheidung treffen (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 53 f.).

<sup>18</sup>Nominal vergleichbare Merkmale können unterschieden werden, besitzen jedoch keine feste Reihenfolge.

<sup>19</sup>Ordinal vergleichbare Merkmale besitzen eine untereinander feste Reihenfolge, anhand derer sie sortierbar sind.

<sup>20</sup>Kardinal vergleichbare Merkmale besitzen einen metrischen Wert, der nicht nur die Reihenfolge der Merkmale, sondern auch den Abstand der Merkmale untereinander definiert.

**Lernender Agent** Der *lernende Agent* ist in der Lage, Problemlösungsstrategien und Verhalten für unbekannte Situationen anhand einer von außen vorgegebenen Leistungsgröße zu erlernen und weiter zu optimieren. Durch die Reflexion seines vergangenen Verhaltens hinsichtlich der Leistungsgröße kann der Agent feststellen, ob ein Verhalten erfolgreich beziehungsweise ob eine Verbesserung gegenüber vergangenerm Verhalten eingetreten ist. Durch das Abwandeln oder Verwerfen bestehender Problemlösungsstrategien oder Verhaltensweisen können somit neue oder bessere Ansätze entwickelt und getestet werden (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 54–57; SUTTON und BARTO, 2018, S. 1–4).

### 2.3.1.3 Agentenarchitekturen

Während die in Abschnitt 2.3.1.2 beschriebenen Agentenklassen eher zur Kategorisierung der grundsätzlichen Mächtigkeit eines intelligenten Agenten geeignet sind, liefern unterschiedliche *Agentenarchitekturen* Alternativen zur konkreten Gestaltung des Entscheidungsprozesses eines Agenten. Eine gewisse Überschneidung zwischen einerseits Agentenarchitekturen und andererseits Agentenklassen im Speziellen wie auch den in Abschnitt 2.3 beschriebenen übergeordneten Sichten künstlicher Intelligenz im Allgemeinen ist dennoch vorhanden, sodass für komplexere Zielsetzungen und Klassen tendenziell auch eine komplexere Architektur angemessen ist. WOOLDRIDGE (2013) schlägt in aufsteigender Komplexität die folgenden vier unterschiedlichen, grundsätzlichen Architekturansätze zur Gestaltung des Entscheidungsfindungsprozesses eines Agenten vor (WOOLDRIDGE, 2013, S. 13 f.):

**Logikbasierte Agentenarchitekturen** Eine *logikbasierte Agentenarchitektur* folgt der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Sicht des rationalen Denkens. Ein Agent bildet dazu auf Grundlage der Prädikatenlogik symbolische Annahmen über sich und seine Umwelt anhand seiner Perzepte und bestimmt Aktionen mithilfe logischer Deduktion. Dazu werden die Menge der Annahmen und die Menge der für den Agenten geltenden Deduktionsregeln genutzt, um idealerweise die optimale Aktion aus seiner Menge an möglichen Aktionen zu inferieren, wenigstens jedoch keine ungültige Aktion (WOOLDRIDGE, 2013, S. 14 f.).

**Reaktive Agentenarchitekturen** Entscheidungsfindung innerhalb einer *reaktiven Agentenarchitektur* erfolgt reflexartig auf Grundlage von Perzepten aus der Umwelt sowie gegebenenfalls des Zustands des Agenten, sie ist daher besonders prädestiniert für die beiden in Abschnitt 2.3.1.2 beschriebenen Klassen von Reflexagenten. Die Interaktion des Agenten mit der Umwelt steht dabei im Vordergrund, intelligentes Verhalten ergibt sich in einer reaktiven Agentenarchitektur aus dem Zusammenspiel einzelner, einfacher Verhaltensregeln (WOOLDRIDGE, 2013, S. 20).

Die von BROOKS (1986) vorgeschlagene Subsumption-Architektur basiert auf dem Prinzip der reaktiven Agentenarchitektur. Kern der Subsumption-Architektur ist die hierarchische Anordnung von unterschiedlichen Verhalten, die zur Zweckerfüllung des

Agenten potenziell benötigt werden. Übergeordnete, abstraktere Verhalten können von untergeordneten, konkreteren Verhalten beziehungsweise einzelnen Aktionen unterbrochen werden, sollte dies erforderlich sein. Wurde das untergeordnete Verhalten erfolgreich ausgeführt, kann das übergeordnete Verhalten fortgesetzt werden. Komplexes intelligentes Verhalten ergibt sich somit durch die Verkettung und Verschachtelung einzelner atomarer Aktionen (BROOKS, 1986; WOOLDRIDGE, 2013, S. 21–25; FERBER, 2001, S. 152 f.). Auch ein sogenannter Behavior Tree (Deutsch: Verhaltensbaum) funktioniert im Wesentlichen nach dem hierarchischen Prinzip der Subsumption-Architektur und entspricht damit ebenfalls einer reaktiven Agentenarchitektur (COLLEDANCHISE und ÖGREN, 2019, S. 3–5, 32 f.; COLLEDANCHISE und ÖGREN, 2017).

**BDI-Agentenarchitekturen** *BDI-Agentenarchitekturen* gehen auf das von BRATMAN (1987) formulierte Belief<sup>21</sup>/Desire/Intention-Modell (kurz: BDI, Deutsch: Annahme, Ziel, Handlungsabsicht) zurück. Wesentliches Merkmal ist die namensgebende Zerlegung des Entscheidungsprozesses in die Annahmen des Agenten über sich und seine Umwelt, das deliberative Bestimmen von langfristigen Zielen und das Entwickeln konkreter Handlungsintentionen beziehungsweise Pläne zur Umsetzung seiner gesetzten Ziele. Handlungsintentionen werden in der BDI-Agentenarchitektur zunächst langfristig verfolgt und gegebenenfalls bei sich verändernden Annahmen dynamisch verfeinert. Es ist allerdings ebenso gestattet, Handlungsintentionen zu unterbrechen oder vollständig abzubrechen, sollten neue Annahmen dies nahelegen. Die Stärke der BDI-Agentenarchitektur ist daher die dynamische und reaktive Anpassung der Handlungsintentionen in Situationen begrenzter Rationalität wie unvollständiger Informationslage und limitierter Entscheidungszeit (BRATMAN et al., 1988; WOOLDRIDGE, 2013, S. 28–35; NORLING et al., 2001, S. 219–221; BECK, 2014, S. 2 f.).

Spätere Zusätze wie die BOID-Agentenarchitektur erweitern die BDI-Agentenarchitektur um die Berücksichtigung der Verpflichtungen (Englisch: obligations) des Agenten. Dies erschwert die Koordination zwischen den Komponenten der Architektur zur Findung angemessener Handlungsintentionen, da die mit den Verpflichtungen einhergehenden Konflikte zwischen individuellen und normativen Zielen des Agenten zusätzlich berücksichtigt werden müssen (BROERSEN et al., 2001).

**Schichtenbasierte Agentenarchitekturen** Hybride beziehungsweise *Schichtenbasierte Agentenarchitekturen* versuchen, die Vorteile deliberativer Entscheidungsansätze und reaktiver Verhalten zu kombinieren, indem die Architektur in unterschiedliche hierarchische Schichten zerlegt wird. Typischerweise übernehmen untere Schichten das rein reaktive Verhalten des Agenten, während höhere Schichten die rationale Planung und die Modellierung der Annahmen über Agent und Umwelt übernehmen. Innerhalb der schichtenbasierten Agentenarchitekturen kann zwischen horizontalen und vertikalen Architekturen unterschieden werden: In horizontalen Architekturen

<sup>21</sup>Der englische Begriff ‚belief‘ ist nicht eindeutig übersetzbar. Insbesondere im Bezug auf Menschen umfasst dieser neben Annahmen auch Überzeugungen, Einstellungen und Glaubenssätze.

werden Perzepte parallel von allen Schichten verarbeitet, jede Schicht bestimmt individuell die Aktionen des Agenten. Es ist daher in diesem Fall eine zusätzliche Steuerungskomponente zur Bestimmung der jeweils zu befolgenden Schicht notwendig. In vertikalen Architekturen werden Perzepte von unten nach oben durch jede der Schichten propagiert. Je nach konkreter Gestaltung bestimmt entweder die höchste Schicht unmittelbar die Aktionen des Agenten oder die Aktion wird anschließend durch alle Schichten zurückpropagiert, sodass die unterste Schicht letztendlich die Aktion ermittelt (WOOLDRIDGE, 2013, S. 36–38; FERBER, 2001, S. 153 f.).

### 2.3.2 Verfahren der Computational Intelligence

Unter dem Begriff *Computational Intelligence* (Deutsch: Computerintelligenz) als Teilgebiet der künstlichen Intelligenz werden verschiedene Ansätze zur intelligenten Informationsverarbeitung zusammengefasst, die für Anwendungsbereiche wie Optimierung, Klassifikation, Mustererkennung oder Regelungstechnik eingesetzt werden können (KRAMER, 2009, S. 3). Häufig sind diese in Analogie zur Funktionsweise in der Natur vorkommender Phänomene zur Problemlösung gestaltet und können für unterschiedliche Anwendungsbereiche angepasst und eingesetzt werden (KRAMER, 2009, S. 6). Als Kerndisziplinen der Computational Intelligence werden insbesondere Fuzzylogik, künstliche neuronale Netze und evolutionäre Algorithmen angesehen (KRAMER, 2016, S. 13).

Da aus Abschnitt 1.1 und insbesondere Teilfrage 2 für diese Arbeit ein deutlicher Fokus auf Entscheidungsfindung liegt, werden evolutionäre Algorithmen in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt, da diese nahezu ausschließlich zur Optimierung bestehender Lösungen eingesetzt werden, zur Entscheidungsfindung jedoch ungeeignet erscheinen (KRAMER, 2017, S. 3). Stattdessen werden zwei alternative, klassischerweise nicht unmittelbar der Computational Intelligence zugeordnete Ansätze, Bayessche Netze und Entscheidungsbäume, ebenfalls in diese Betrachtung mit aufgenommen. Beide Verfahren können zum Inferieren von Wissen oder Treffen von Entscheidungen genutzt werden, erscheinen daher als mögliche Ansätze zur Entscheidungsfindung plausibel und werden somit in ihrer Funktionsweise im Folgenden vorgestellt.

#### 2.3.2.1 Fuzzylogik und Fuzzyinferenz

*Fuzzylogik* (Deutsch: unscharfe Logik) ist eine mehrwertige Logik, die es im Gegensatz zu zweiwertiger beziehungsweise boolescher Logik erlaubt, auch unscharfe Wahrheitswerte und Aussagen zwischen eindeutig wahr und eindeutig falsch abbilden zu können. Zurückzuführen ist Fuzzylogik auf die von ZADEH (1965) formulierte Fuzzymengen-Theorie (Englisch: fuzzy set theory). Eine Fuzzymenge  $M$  ist durch eine *Zugehörigkeitsfunktion*  $\mu_M(x), x \in \mathcal{U}$  beschrieben, die einer Zahl  $x$  aus dem relevanten Universum  $\mathcal{U} \subseteq \mathbb{R}$  ihre Zugehörigkeit  $\mu$  zu ebenjener Fuzzymenge im Intervall  $[0, 1]$  zuordnet. Diese gegebenenfalls nur partielle Zugehörigkeit eines Wertes zu einer Fuzzymenge begründet die Mehrwertigkeit der Fuzzylogik. Typische Zugehörigkeitsfunktionen sind beispielsweise abschnittsweise definierte Dreiecks-

funktionen, Gaußkurven oder *Singletons*, die nur für exakt ein  $x$  ihres Universums eine Zugehörigkeit von 1 beschreiben und 0 für alle anderen (LILLY, 2010, S. 11–15, 22 f.; PASSINO und YURKOVICH, 1998, S. 56 f.). Die Operationen zur Definition der Schnittmenge  $M \cap N$  zweier Fuzzymengen  $M$  und  $N$  werden als t-Normen bezeichnet, die zur Definition der Vereinigungsmenge  $M \cup N$  als t-Conormen oder s-Normen. Eine gebräuchliche t-Norm ist die Minimumfunktion, sodass  $\mu_{M \cap N} = \min(\mu_M, \mu_N)$ , die dazu entsprechende t-Conorm ist die Maximumfunktion, sodass  $\mu_{M \cup N} = \max(\mu_M, \mu_N)$ . Andere Funktionen, wie beispielsweise das algebraische Produkt  $\mu_M \mu_N$  als t-Norm und die algebraische Summe  $\mu_M + \mu_N - \mu_M \mu_N$  als t-Conorm, sind ebenfalls möglich. Das Komplement  $\bar{M}$  einer Fuzzymenge  $M$  wird durch die Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{\bar{M}} = 1 - \mu_M$  definiert (LILLY, 2010, S. 16–18; PASSINO und YURKOVICH, 1998, S. 58–60).

Praktische Anwendung finden Fuzzymengen zur logischen Deduktion und zum Entscheiden im Rahmen von regelbasierter *Fuzzyinferenz*. Insbesondere wenn Entscheidungsregeln im Sinne eines Expertensystems durch Domänenexperten formuliert werden, enthalten sie häufig vage, unscharfe und natürlichsprachlich formulierte Ein- und Ausgabegrößen, die zur unmittelbaren automatisierten Inferenz von Wissen ungeeignet sind (LILLY, 2010, S. 3). Daher wird jede dieser unscharfen Ein- und Ausgabegrößen als sogenannter *linguistischer Term* durch jeweils eine passende Fuzzymenge beziehungsweise die Zugehörigkeitsfunktion dieser abgebildet. Verschiedene linguistische Terme zur Beschreibung des gleichen Universums werden in *linguistischen Variablen* zusammengefasst (LILLY, 2010, S. 11 f.; PASSINO und YURKOVICH, 1998, S. 53 f.). Beispielsweise können kurze und lange Distanzen mit den linguistischen Termen  $\mu_{\text{kurz}}$  und  $\mu_{\text{lang}}$  in der linguistischen Variable Distanz zusammengefasst werden. Aussagen, bestehend aus einer linguistischen Variable und einem linguistischen Term, wie beispielsweise ‚Distanz ist kurz‘, können als Propositionen zum logischen Schließen genutzt werden. Die logische Konjunktion, Disjunktion und Negation von Propositionen sind entsprechend der oben beschriebenen t-Normen, t-Conormen und Komplementfunktion definiert, für zwei Propositionen  $p$  und  $q$  über die Fuzzymengen  $P$  respektive  $Q$  also typischerweise  $p \wedge q = \min(\mu_P, \mu_Q)$  für die Konjunktion,  $p \vee q = \max(\mu_P, \mu_Q)$  für die Disjunktion und  $\neg p = 1 - \mu_P$  für die Negation (LILLY, 2010, S. 27–30).

Die Inferenz von Wissen mithilfe eines *Fuzzyinferenzsystems* erfolgt durch die gleichzeitige Auswertung aller vorhandenen *Fuzzyregeln* der natürlichsprachlichen Form ‚Wenn a dann b‘ in der *Regelbasis* des Systems. Dazu werden die konkreten Zugehörigkeiten der gegebenen scharfen (Englisch: crisp) Eingabewerte aller vorhandenen linguistischen Variablen zu ihren jeweiligen linguistischen Termen anhand ihrer Zugehörigkeitsfunktionen bestimmt. Dieser Vorgang wird als *Fuzzifizierung* bezeichnet (LILLY, 2010, S. 27–29; PASSINO und YURKOVICH, 1998, S. 61 f.).

Bei der Umsetzung eines Fuzzyinferenzsystems sind insbesondere zwei unterschiedliche Ansätze der Fuzzyinferenz zu unterscheiden: Die auf MAMDANI und ASSILIAN (1975) zurückgehende *Mamdani-Inferenz* und die auf TAKAGI und SUGENO (1985) zurückgehende *Takagi-Sugeno-Inferenz* (LILLY, 2010, S. 27 f., 88 f.; PASSINO und YURKOVICH, 1998, S. 73). Zunächst wird bei beiden Ansätzen gleichermaßen der *Aktivierungsgrad*  $a$  jeder Fuzzyregel

der Form ‚Wenn  $a$  dann  $b$ ‘ einzeln bestimmt, indem der konkrete Funktionswert der durch die im Antezedens ‚ $a$ ‘ der jeweiligen Regel beschriebenen Fuzzymenge  $A$  auf Grundlage der fuzzifizierten Eingabewerte mit der gewählten  $t$ -Norm und  $t$ -Conorm berechnet wird (LILLY, 2010, S. 29 f.; PASSINO und YURKOVICH, 1998, S. 62–63). Der Aktivierungsgrad einer Fuzzyregel liegt damit zunächst ebenfalls im Intervall  $[0, 1]$ . Durch Multiplikation mit einem optionalen *Regelgewicht* kann der Aktivierungsgrad einer Fuzzyregel jedoch beliebig manipuliert werden. Mamdani- und Takagi-Sugeno-Inferenz unterscheiden sich jedoch in der Formulierung der Konsequenz ‚ $b$ ‘ einer Fuzzyregel der Form ‚Wenn  $a$  dann  $b$ ‘.

Bei der Mamdani-Inferenz besteht die Konsequenz einer Fuzzyregel aus einer Fuzzymenge  $B$ , beschrieben durch wenigstens eine Proposition aus linguistischer Variable und linguistischem Term (LILLY, 2010, S. 27–29). Zur Berechnung der Implikation  $A \implies B$  zwischen den beiden Fuzzymengen einer Fuzzyregel wird auch an dieser Stelle eine  $t$ -Norm genutzt. Häufig ist dies erneut die Minimumfunktion, sodass  $\mu_{A \implies B} = \min(a, \mu_B)$ , mit  $a$  als konkretem Aktivierungsgrad der Regel. Auch hier sind jedoch andere Funktionen möglich (SILER und BUCKLEY, 2005, S. 34; PASSINO und YURKOVICH, 1998, S. 63 f.). Diese implizierten Fuzzymengen jeder einzelnen Fuzzyregel werden anschließend mit einer  $t$ -Conorm als *Aggregationsfunktion*, häufig der Maximumfunktion, zu jeweils einer einzigen Fuzzymenge für jede der in den Konsequenzen aller Fuzzyregeln genannten linguistischen Variablen aggregiert (KRAMER, 2009, S. 91 f.). Insgesamt ergibt dieser ganze Prozess damit aus den gegebenen scharfen Eingabewerten für jede der eine Ausgabegröße beschreibenden linguistischen Variablen genau eine Fuzzymenge. Der letzte Schritt der Mamdani-Inferenz ist nun die sogenannte *Defuzzifizierung* zur Gewinnung technisch verwertbarer scharfer Ausgabewerte aus dem Universum jeder linguistischen Variable. Dazu können prinzipiell verschiedene Funktionen eingesetzt werden, häufig genutzt wird in diesem Zusammenhang jedoch die *Flächenschwerpunktfunktion* (Englisch: center of gravity). Dazu wird der Flächenschwerpunkt des Integrals der Zugehörigkeitsfunktion berechnet, die zu der sich aus der oben beschriebenen Inferenz ergebenden Fuzzymenge einer linguistischen Variable gehört. Der  $x$ -Wert dieses Punktes wird als scharfer Ausgabewert der linguistischen Variable genutzt. Andere Funktionen zur Defuzzifizierung sind jedoch ebenfalls möglich (LILLY, 2010, S. 30 f.; PASSINO und YURKOVICH, 1998, S. 64–67; KRAMER, 2009, S. 92–94).

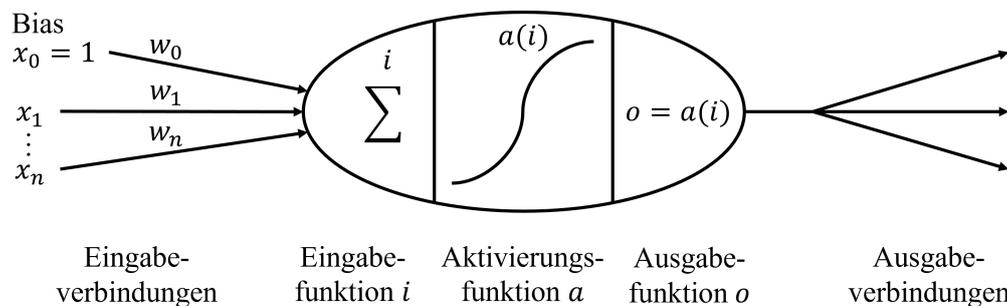
Die Takagi-Sugeno-Inferenz unterscheidet sich insofern von der Mamdani-Inferenz, als die Konsequenz ‚ $b$ ‘ einer Fuzzyregel der Form ‚Wenn  $a$  dann  $b$ ‘ keine Fuzzymenge, sondern eine Funktion  $b$  beschreibt. Diese Funktion  $b$  ist entweder eine Funktion der scharfen Eingabewerte oder eine konstante Funktion. Eine Fuzzyregel hat damit nach der Fuzzifizierung zwei wesentliche Werte, ihren Aktivierungsgrad  $a$  und ihren entweder dynamisch von den Eingabewerten abhängigen oder konstanten Funktionswert  $b$ . Die Bestimmung eines oder mehrerer scharfer Ausgabewerte erfolgt bei der Takagi-Sugeno-Inferenz typischerweise mit der Berechnung des gewichteten Mittelwerts  $\bar{b} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i b_i}{\sum_{i=1}^n a_i}$  über  $n$  Regeln mit ihren jeweiligen Aktivierungsgraden  $a_i$  und Funktionswerten  $b_i$ . Andere Funktionen wie etwa eine gewichtete Summe aus Aktivierungsgraden und Funktionswerten sind ebenso möglich. Eine aufwändige Defuzzifizierung mit Berechnung eines Integrals wie bei der Mamdani-Inferenz

ist damit bei der Takagi-Sugeno-Inferenz nicht notwendig. Im Gegenzug ist eine Fuzzyregel zur Takagi-Sugeno-Inferenz weniger gut nachvollziehbar und weniger natürlichsprachlich als bei Mamdani-Inferenz (LILLY, 2010, S. 88 f.; PASSINO und YURKOVICH, 1998, S. 73 f.). Eine besondere Rolle nehmen Fuzzyinferenzsysteme mit Takagi-Sugeno-Inferenz ein, deren Fuzzyregeln in ihren Konsequenzen ausschließlich konstante Funktionen beschreiben. Ein solches System ist identisch zu einem System mit Mamdani-Inferenz, dessen linguistische Variablen der Ausgangsgrößen ausschließlich Singletons enthalten.

### 2.3.2.2 Künstliche neuronale Netze

Ein *künstliches neuronales Netz* ist ein konnektionistisches System, bestehend aus einer Vielzahl an vergleichsweise einfachen *künstlichen Neuronen*. Biologisches Vorbild eines künstlichen neuronalen Netzes ist das Gehirn, das ebenso aus einzelnen Nervenzellen, den Neuronen, besteht (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 727; SHANMUGANATHAN, 2016, S. 3 f.). Eine Nervenzelle besteht im Wesentlichen aus den zur Reizaufnahme dienenden Dendriten und dem zur Reizweiterleitung dienenden Axon. Die einzelnen Synapsen zur Verbindung von Axonendplatte und Dendriten verschiedener Nervenzellen können erregender oder hemmender Art für die nachfolgende Nervenzelle sein (FAKLER und JONAS, 2010, S. 69; HECKMANN und DUDEL, 2010, S. 77–79).

Ein einzelnes künstliches Neuron ist ein auf MCCULLOCH und PITTS (1943) zurückgehendes mathematisches Modell, welches das Prinzip einer Nervenzelle adaptiert (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 727; SHANMUGANATHAN, 2016, S. 4 f.). Die Darstellung in Abbildung 2.5 zeigt ein solches künstliches Neuron.



**Abbildung 2.5:** Modell eines künstlichen Neurons. Aus dem Englischen übersetzt nach RUSSELL und NORVIG (2010, S. 728).

Ein künstliches Neuron hat  $x_1$  bis  $x_n$  Eingabeverbindungen mit jeweils einer Eingabe, die entweder direkter Eingabewert ist oder von Vorgängerneuronen stammt. Jede Eingabe-Verbindung besitzt ein korrespondierendes Gewicht  $w_1$  bis  $w_n$ , das als Multiplikator für die Eingabe dient. Zusätzlich ist es in vielen Anwendungen sinnvoll, eine Bias-Eingabe  $x_0 = 1$  mit einem Gewicht  $w_0$  einzuführen, das mit keinem Vorgänger verbunden ist, um die Ausgabe eines oder mehrerer Neuronen für das künstliche neuronale Netz als Ganzes anzupassen. Ein Künstliches Neuron verkettet nun drei wesentliche Funktionen, um eine Ausgabe zu berechnen, die ihrerseits entweder als Eingabe für nachfolgende Neuronen oder

als Ausgabewert für das Netzwerk als Ganzes dient. Zunächst wird mit der Eingabefunktion  $i(\vec{x}, \vec{w}) = \sum_{i=0}^n x_i w_i$  die gewichtete Summe der Eingaben  $\vec{x}$  und ihrer Gewichte  $\vec{w}$  des Neurons bestimmt (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 728; SHANMUGANATHAN, 2016, S. 6). Anschließend erfolgt die Berechnung der Aktivierung des Neurons mithilfe der *Aktivierungsfunktion*  $a$ . Je nach Zweck des Netzwerks kann eine Vielzahl verschiedener Funktionen als Aktivierungsfunktion in Betracht kommen. Typische Funktionen mit  $i$  als Ergebnis der Eingabefunktion sind an dieser Stelle beispielsweise die Identitätsfunktion  $a_{\text{Id}}(i) = i$ , die ReLU<sup>22</sup>-Funktion  $a_{\text{ReLU}}(i) = \max(0, i)$  des Inputs, die logistische Funktion  $a_{\text{log}}(i) = \frac{1}{1+e^{-ci}}$  oder die Hyperbeltangens-Funktion  $a_{\text{tanh}}(i) = \tanh(ci)$  mit  $c$  zur Steuerung der Steilheit der Kurve (LÄMMEL und CLEVE, 2020, S. 193 f.). Zuletzt wird die Ausgabe des Neurons mit der Ausgabefunktion  $o$  bestimmt. Dies ist normalerweise unmittelbar das Ergebnis der Aktivierungsfunktion, sodass  $o = a(i)$  (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 728; SHANMUGANATHAN, 2016, S. 6).

Die Topologie eines künstlichen neuronalen Netzwerks ist nahezu beliebig. In autoassoziativen Netzwerken stellen die Neuronen zur Eingabe von Werten gleichzeitig die Ausgabe des Netzwerks bereit, während heteroassoziative Netzwerke eine beliebige Menge von zusätzlichen, von der Ein- und Ausgabeschicht versteckten Schichten von Neuronen, sogenannten *Hidden Layern*, enthalten können. Weiterhin kann die Richtung der Vernetzung der Neuronen eines Netzwerks unterschieden werden. In einem Feedforward-Netzwerk ist keine Rückkopplung von Neuronen in den eigenen Eingang oder den von Vorgängern möglich, während verschiedene Arten von rekurrenten Netzwerken dies gestatten (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 729 f.; SHANMUGANATHAN, 2016, S. 7). Eine Topologie mit lediglich einer Schicht und ohne Rückkopplung ist beispielsweise das einlagige Perzeptron, das bereits für binäre Klassifikationsprobleme eingesetzt werden kann (SHANMUGANATHAN, 2016, S. 9).

Einsatz finden künstliche neuronale Netze insbesondere für verschiedene Arten des *maschinellen Lernens* (Englisch: machine learning). Je nach Topologie kann ein Netzwerk für überwachtes, unüberwachtes oder bestärkendes Lernen (Englisch: supervised/unsupervised/reinforcement learning) eingesetzt werden. Alle Lernverfahren haben gemeinsam, dass sie in einer Trainingsphase eine Funktion durch Anpassung der Gewichte der Eingangsverbindungen der Neuronen des Netzwerks erlernen und der Erfolg der Lernphase in einer anschließenden Testphase mit einer geeigneten Metrik überprüft wird. Beim überwachten Lernen soll ein künstliches neuronales Netzwerk als Klassifikator zur Erkennung einer bestimmten Art von Ereignissen angelernt werden. Dazu wird ein ausreichend großer Datensatz mit gelabelten Beispieldaten zum zu klassifizierenden Ereignis für das Training des Netzwerks benötigt. Anschließend wird iterativ für jedes Beispiel im Datensatz der Fehler, das heißt die Abweichung zwischen Ist- und Soll-Ausgabe des Netzwerks, bestimmt und mit einem geeigneten Lernverfahren rückpropagiert, bis das gesuchte Ereignis mit einer ausreichenden Genauigkeit auch in anderen Datensätzen erkannt werden kann. Beim unüberwachten Lernen hingegen enthält der bereitgestellte Trainingsdatensatz keine gelabelten Daten. Ziel des unüberwachten Lernens ist die automatische Clusterbildung, also das Suchen von bisher unbekanntem Mus-

---

<sup>22</sup>Rectified Linear Unit

tern innerhalb des Datensatzes. Beim bestärkenden Lernen schließlich erfolgt das Anlernen des Netzwerks anhand einer abstrakten Belohnungsfunktion, welche die Ausgabewerte eines Netzwerks regelmäßig positiv oder negativ verstärkt (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 733–737; SHANMUGANATHAN, 2016, S. 8; LÄMMEL und CLEVE, 2020, S. 199). Das bestärkende Lernen ist damit eng verwandt mit dem Prinzip des in Abschnitt 2.3.1.2 vorgestellten lernenden Agenten.

### 2.3.2.3 Bayessche Netze

Ein *bayessches Netz* ist ein gerichteter, zyklener Graph zur Abbildung von unsicherem Wissen. Im Gegensatz zur in Abschnitt 2.3.2.1 beschriebenen Fuzzyinferenz sind Aussagen innerhalb eines bayessches Netz also mit Wahrscheinlichkeiten behaftet (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 510 f.; LÄMMEL und CLEVE, 2020, S. 87 f.; KOSKI und NOBLE, 2009, S. 1–4). Namensgeber ist der englische Mathematiker Thomas Bayes, auf den auch der Satz von Bayes zur Beschreibung bedingter Wahrscheinlichkeiten zurückgeht (BAYES und PRICE, 1763). Zentrale Erkenntnis des Satzes von Bayes ist, dass die bedingte Wahrscheinlichkeit  $P(X|Y) = \frac{P(Y|X) \cdot P(X)}{P(Y)}$  zweier Zufallsereignisse  $X$  und  $Y$  auch dann berechnet werden kann, wenn lediglich die bedingte Wahrscheinlichkeit  $P(Y|X)$  sowie die Anfangswahrscheinlichkeiten  $P(X)$  und  $P(Y) > 0$  bekannt sind (LÄMMEL und CLEVE, 2020, S. 81).

Jeder Knoten in einem bayesschen Netz ist beschrieben durch eine diskrete oder kontinuierliche Zufallsvariable, die, je nach Kontext, beispielsweise einen Zustand, ein Ereignis oder eine Annahme repräsentiert. Eine gerichtete Kante zwischen zwei Knoten stellt einen direkten Einfluss auf den Zustand des Kindsknotens in Abhängigkeit des Zustands des Elternknotens dar. Die bedingte Wahrscheinlichkeit  $P(X_i|\text{Eltern}(X_i))$  eines beliebigen Knotens  $X_i$  eines bayesschen Netzes ist damit abhängig von seinen Eltern. Ein Knoten ohne Eltern repräsentiert eine unabhängige Zufallsvariable, deren Eintrittswahrscheinlichkeit nicht durch andere Knoten des Netzes beeinflusst wird. Beispielsweise können die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Zufallsvariablen für ein Netz mit diskreten Zufallsvariablen, im einfachsten Fall solche, die lediglich die Werte wahr und falsch annehmen können, einfach aufgelistet werden. Für bedingte Zufallsvariablen kann dies mithilfe einer Wahrscheinlichkeitstafel erfolgen, die jeder möglichen Kombination aus Wahrheitswerten der Elternknoten eine Wahrscheinlichkeit zuordnet (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 511–513). Gegeben die unabhängigen und bedingten Wahrscheinlichkeiten aller Knoten eines bayesschen Netzes können somit gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilungen  $P(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i|\text{Eltern}(X_i))$  für den Eintritt konkreter Ereignisse  $x_i$  für die einzelnen Knoten des Netzes berechnet werden (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 513).

Praktisch genutzt werden kann ein bayessches Netz zur probabilistischen Inferenz von unsicherem Wissen. Verändern sich beispielsweise die Anfangswahrscheinlichkeiten von Zufallsvariablen durch konkrete Beobachtungen, kann diese Evidenz dazu genutzt werden, die bedingten Wahrscheinlichkeiten innerhalb des übrigen Netzes neu zu berechnen. Somit können auch die Wahrscheinlichkeiten von nicht beobachtbaren oder momentan nicht bekannten

Zufallsvariablen dynamisch anhand von einer oder mehreren beobachtbaren Variablen des Netzes berechnet werden (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 522–524).

#### 2.3.2.4 Entscheidungsbäume

Ein *Entscheidungsbaum* (Englisch: decision tree) ist ein gerichteter graphentheoretischer Baum zur strukturierten Abbildung entscheidungsrelevanter Faktoren bei einem Entscheidungsproblem. Zwei wesentliche Arten von Entscheidungsbäumen können unterschieden werden. Ein *Klassifikationsbaum* (Englisch: classification tree) dient zur Einordnung in eine von mehreren diskreten Klassen, die durch die Blätter des Baumes repräsentiert werden, während ein *Regressionsbaum* (Englisch: regression tree) eine stetige Ausgabe besitzt und für Entscheidungsprobleme mit numerischer Entscheidungsgröße genutzt werden (SUTTON, 2005, S. 303 f.). Beginnend an der Wurzel des Entscheidungsbaumes, repräsentiert diese und jeder innere Knoten des Baumes eine Teilentscheidung anhand eines entscheidungsrelevanten Faktors. Für jede mögliche Teilentscheidung muss eine ausgehende Kante angelegt werden, die zu nachfolgenden Knoten führt. Ein Pfad von Wurzel bis Blatt repräsentiert damit alle Teilentscheidungen, welche die gewählte Handlungsoption begründen (ROKACH und MAIMON, 2015, S. 10–12; POMEROL, 2012, S. 28–32). Die Teilentscheidungen in einem Entscheidungsbaum sind damit hierarchisch angeordnet. Soll ein Entscheidungsbaum von einem Menschen komfortabel genutzt werden können, ist es daher empfehlenswert, Teilentscheidungen so anzuordnen, dass diejenigen Teilentscheidungen, die unmittelbar zu einer Entscheidung für eine Handlungsoption führen, früh im Entscheidungsbaum auftreten, damit gegebenenfalls nicht der weitere Baum traversiert werden muss. Jede der Handlungsoptionen eines Entscheidungsbaumes lässt sich damit auch in disjunktiver Normalform angeben, wobei jeder der Disjunktionsterme genau einen Pfad von der Wurzel zu einem Blatt beschreibt. Jeder Disjunktionsterm ist damit eine Konjunktion der Teilentscheidungen (QUINLAN, 1987). Der Entscheidungsbaum kann somit auch beispielsweise kompakt als Wahrheitstafel dargestellt werden. Entscheidungsbäume mit deterministischen Teilentscheidungen enthalten ausschließlich Knoten, deren Teilentscheidungen oder entscheidungsrelevante Beobachtungen gesichert sind. Sind einzelne Teilentscheidungen oder entscheidungsrelevante Beobachtungen jedoch probabilistisch, können die bedingten Wahrscheinlichkeiten der vorliegenden Handlungsalternativen bei vorliegender Wahrscheinlichkeit der Pfade mit dem bereits in Abschnitt 2.3.2.3 beschriebenen Satz von Bayes bestimmt werden (POMEROL, 2012, S. 28–32).

Entscheidungsbäume werden in unterschiedlichen Domänen eingesetzt. Im Kontext von betriebswirtschaftlichen Entscheidungsproblemen werden Entscheidungsbäume unter anderem genutzt, um begründete Entscheidungen für Handlungsoptionen strukturiert und systematisch treffen zu können, die Blätter des Baumes repräsentieren die möglichen Handlungsalternativen. In diesen Fällen kann ein Entscheidungsbaum beispielsweise durch einen Experten formuliert werden, der die entscheidungsrelevanten Faktoren einschätzt und im Entscheidungsbaum abbildet (POMEROL, 2012, S. 1–5, 28–32).

Die Erzeugung von Entscheidungsbäumen kann jedoch auch im Rahmen von maschinellem Lernen automatisch erfolgen, um beispielsweise als Klassifikator genutzt werden zu können. In diesem Fall repräsentieren die Blätter des Baumes die möglichen Klassen. Benötigt wird ein ausreichend großer Datensatz mit Trainingsdaten zu den entscheidungsrelevanten Faktoren, aus denen ein Entscheidungsbaum induziert werden soll. Dies geschieht typischerweise iterativ und regressiv in einem Top Down-Verfahren (ROKACH und MAIMON, 2015, S. 23 f.). Verschiedene konkrete Verfahren, wie beispielsweise der CHAID<sup>23</sup>-, CART<sup>24</sup>- oder C4.5-Algorithmus, können eingesetzt werden, um einen Entscheidungsbaum zu erzeugen (KASS, 1980; BREIMAN et al., 1984; QUINLAN, 1993). Die Verfahren bergen verschiedene Vor- und Nachteile, beispielsweise kann der CART-Algorithmus im Gegensatz zum CHAID-Algorithmus auch reellwertige entscheidungsrelevante Faktoren verarbeiten, allerdings erzeugt dieser im Gegensatz zum C4.5-Algorithmus lediglich dementsprechend große Binärbäume. Ein weiter Ansatz zur Klassifikation mit Entscheidungsbäumen ist das Prinzip des sogenannten Random Forest (Deutsch: Zufallswald). Statt eines einzelnen, komplexen Entscheidungsbaums wird bei einem Random Forest im Rahmen von Ensemblelernen (Englisch: ensemble learning) eine Vielzahl kleinerer und gegebenenfalls unvollständiger Entscheidungsbäume erzeugt. Jeder Entscheidungsbaum des Random Forest wird einzeln zur Klassifikation eingesetzt, das Ergebnis ist typischerweise die am häufigsten gewählte Klasse seiner Bäume (HO, 1995; BREIMAN, 2001).

## 2.4 Entscheiden und Handeln in den Sozialwissenschaften

In den Sozialwissenschaften findet sich eine Vielzahl von Theorien und Modellen zur Beschreibung und Erklärung von menschlichem Entscheidungsverhalten und Handeln. Dem von außen beobachtbaren Verhalten eines Lebewesens geht im Falle eines Menschen typischerweise eine bewusste und zielgerichtete Entscheidung oder Absicht für eine Handlung voraus. Die Untersuchung von menschlichem Handeln ist damit einer der wesentlichen Untersuchungsgegenstände der Sozialwissenschaften (HARBACH, 2012, S. 94 f.). Der bereits in Abschnitt 2.3.1 eingeführte Begriff des Agenten ist daher auch in den Sozialwissenschaften eine übliche Bezeichnung für ein autonomes, handlungsfähiges Individuum. In dieser Arbeit wird allerdings zur deutlichen Unterscheidung zum technischen Konzept eines Agenten stattdessen, insbesondere in diesem Abschnitt, der Begriff Akteur genutzt, um einen handelnden Menschen zu beschreiben (BANDURA, 2001a, S. 6–11; FELSCH, 2010, S. 35–37).

Die vier hier betrachteten Disziplinen Soziologie, Psychologie, Informationswissenschaft und Wirtschaftswissenschaft sind vollständig oder wenigstens teilweise den Sozialwissenschaften zuzuordnen und liefern jeweils unterschiedliche Theorien und Modelle zur Erklärung von Entscheidungsverhalten und Handeln. Da im wissenschaftlichen Diskurs für viele dieser Theorien und Modelle auch im deutschsprachigen Raum die englischen Bezeichnungen vorherrschen, werden diese, wenn üblich, gegenüber einer deutschen Übersetzung genutzt.

---

<sup>23</sup>Chi-square Automatic Interaction Detectors

<sup>24</sup>Classification and Regression Trees

Die konkret benannten Theorien und Modelle wurden einerseits so ausgewählt, dass ein möglichst breiter Überblick über die unterschiedlichen Ansätze der vier betrachteten Disziplinen ermöglicht wird, andererseits wurden bevorzugt Theorien und Modelle berücksichtigt, die, beispielsweise durch grafische Darstellungen, möglichst wenig Raum für missverständliche Interpretationen zulassen.

### 2.4.1 Soziologische Theorien und Modelle

Die Soziologie versucht unter anderem, die Dynamik von Gesellschaften, sozialen Gruppen und Individuen zu ergründen. Dazu wird auf eine Vielzahl unterschiedlicher und teilweise gegenläufiger Methoden und Theorien aus unterschiedlichen Schulen der Soziologie zurückgegriffen. (MIEBACH, 2014, S. 19 f.; BÜSCHGES et al., 1998, S. 9–12). Eines der Kernthemen der Soziologie ist die Erklärung von sozialem Handeln, insbesondere vor dem Hintergrund sozialer Normen und Strukturen, die Handeln und Handlungsmöglichkeiten von Individuen und Gruppen beeinflussen (MIEBACH, 2014, S. 17–39).

#### 2.4.1.1 Kapital, Habitus und Felder

Das von BOURDIEU (1984) formulierte Verständnis von *Kapital*, *Habitus* und *sozialen Feldern* ist ein praxistheoretisches Mittel zur Aufgliederung und Erklärung der Wechselwirkungen zwischen Akteuren und der Gesellschaft. Kapital stellt nach BOURDIEU (1983) die unterschiedlichen, einem Akteur zur Verfügung stehenden Mittel und Ressourcen zur Durchsetzung seiner Ziele dar. Er identifiziert vier teilweise voneinander abhängige beziehungsweise ineinander umwandelbare Kapitalarten zur Beschreibung eines Akteurs (BOURDIEU, 1986, S. 252–255):

**Ökonomisches Kapital** Das ökonomische Kapital eines Akteurs beschreibt seine materiellen Handlungsmöglichkeiten und seinen Besitz. In der Regel kann ökonomisches Kapital in kulturelles Kapital umgewandelt werden (HILLEBRANDT, 2009, S. 382).

**Kulturelles Kapital** Das kulturelle Kapital eines Akteurs umfasst seinen Bildungsstand und fachlichen Fertigkeiten und Qualifikationen sowie seine Interessen. Aus dem kulturellen Kapital eines Akteurs ergibt sich sein Zugang zu sozialem Kapital (HILLEBRANDT, 2009, S. 382).

**Soziales Kapital** Das soziale Kapital eines Akteurs beschreibt Zugehörigkeit, Vernetzung und Einfluss in sozialen Gruppen und Systemen. Soziales Kapital kann eingesetzt werden, um in ökonomisches Kapital umgewandelt zu werden (HILLEBRANDT, 2009, S. 382 f.)

**Symbolisches Kapital** Das symbolische Kapital eines Akteurs nimmt gegenüber den anderen drei Kapitalarten eine übergeordnete Rolle ein. In gewisser Weise bildet es die Summe der übrigen drei Kapitalarten und beschreibt Prestige und gesellschaftliche Legitimität des Akteurs nach außen (HILLEBRANDT, 2009, S. 383).

Eng verbunden mit dem Konzept der Kapitalarten ist der Begriff des Habitus von BOURDIEU (1984). Der Habitus umfasst das Auftreten und den Lebensstil sowie die Bedürfnisse und Motivationen eines Akteurs und ermöglicht die Zugehörigkeit zu einer sozialen Klasse. Im Gegensatz zu den Kapitalarten ist er keine Beschreibung der gegenwärtigen Situation, sondern beinhaltet auch Herkunft und Werdegang des Akteurs (HILLEBRANDT, 2009, S. 375 f.).

Soziale Felder schließlich bilden nach BOURDIEU (1984) die unterschiedlichen sozialen Umwelten und Kontexte, in die ein Akteur und sein Handeln eingebettet sind. Unterschiedliche Felder definieren unterschiedliche Regeln und Handlungsspielräume für den Akteur innerhalb eines Feldes. Die Rolle und Machtposition eines Akteurs innerhalb eines Feldes und seine Möglichkeiten zur Einflussnahme auf das Feld sind dabei maßgeblich von seinem Habitus und den ihm zur Verfügung stehenden Kapitalarten abhängig (HILLEBRANDT, 2009, S. 380–383).

### 2.4.1.2 Structuration Theory

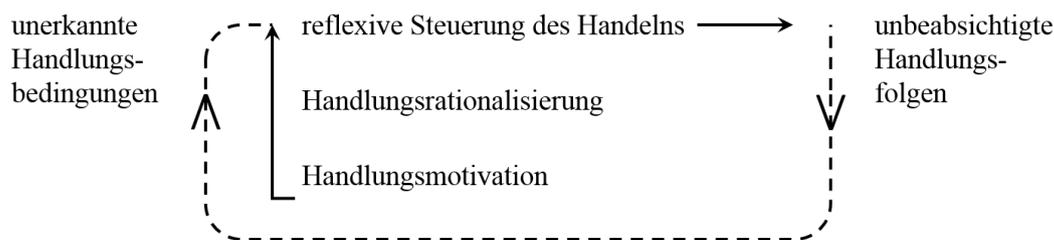
Die *Structuration Theory* von GIDDENS (1997) ist ein praxistheoretischer Ansatz zur Verbindung und Erklärung des wechselseitigen Verhältnisses zwischen handlungsfähigen Akteuren einerseits und sozialen Strukturen innerhalb der Gesellschaft als Ganzes andererseits. Auf diesem Wege wird das Spannungsverhältnis zwischen strukturalistischen und voluntaristischen Sichten auf die soziale Welt teilweise aufgelöst (BRYANT und JARY, 2003, S. 253 f.).

Gemäß der Structuration Theory werden soziale Strukturen geformt und geprägt durch das Handeln eigenständiger und zur Reflexion ihrer Handlungen befähigter Akteure, stellen jedoch gleichzeitig die Modalitäten der Akteure für ihre eigene Entstehung und Erhaltung rekursiv bereit. In der Structuration Theory wird dieses Phänomen als die *Dualität der Struktur* bezeichnet (GIDDENS, 1997, S. 77–80). Die strukturellen Modalitäten umfassen dazu die *Regeln und Ressourcen*, also die das Handeln eines Akteurs einschränkenden oder ermöglichenden Elemente einer sozialen Struktur (BRYANT und JARY, 2003, S. 254; GIDDENS, 1997, S. 81 f.).

Eng verbunden mit dem Konzept der Dualität der Struktur ist das Prinzip der *Produktion und Reproduktion* sozialer Strukturen, das beschreibt, wie das bewusste und eigenständige Handeln eines Akteurs einerseits Strukturen gezielt produziert, diese oder andere Strukturen andererseits unbewusst oder unbeabsichtigt durch das Handeln aufrechterhält beziehungsweise reproduziert (GIDDENS, 1997, S. 75 f.).

Das in Abbildung 2.6 dargestellte Stratifikationsmodell des Handelnden beschreibt die unterschiedlichen mit einer Handlung verbundenen Bewusstseinssebenen eines Akteurs sowie die äußeren Wechselwirkungen.

Eine Handlung entsteht auf unterster Ebene aus der Handlungsmotivation des Akteurs, die den grundlegenden und gegebenenfalls unbewussten Bedürfnissen des Akteurs entspricht. Die Handlungsrationalisierung demgegenüber beschreibt die dem Akteurs bewussten, aber unreflektierten und routinemäßigen Gründe für sein Verhalten. Die reflexive Steuerung des Handelns schließlich umfasst die vom Akteur abgewägten und reflektierten Gründe hin-

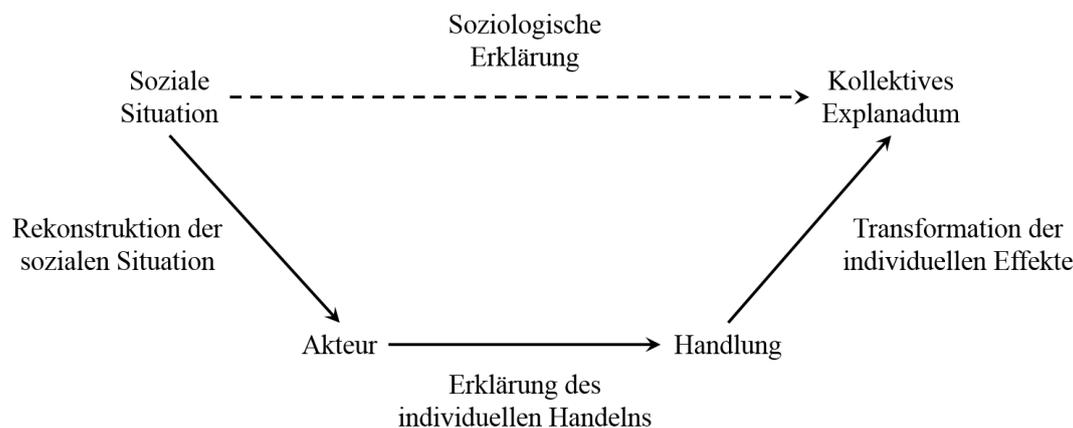


**Abbildung 2.6:** Bewusstseins Ebenen im Stratifikationsmodell des Handelnden gemäß der Structuration Theory (GIDDENS, 1997, S. 56).

sichtlich eines bewussten Handelns. Weiterhin hat jede Handlung gemäß der Dualität der Struktur vom Akteur unbeabsichtigte Handlungsfolgen, die als unerkannte Handlungsbedingungen in zukünftiges Handeln eingehen (GIDDENS, 1997, S. 55–57).

### 2.4.1.3 Makro-Mikro-Makro-Modell

Das *Makro-Mikro-Makro-Modell* von COLEMAN (1986), aufgrund seiner typischen, grafischen Darstellung auch als Colemans Boot oder Colemans Badewanne bezeichnet, ist ein soziologisches Hilfsmittel zur Beschreibung der Abhängigkeiten zwischen und der Entwicklung von soziologischen Makro- und Mikrostrukturen. Das schematische Modell der Makro-Mikro-Makro-Abhängigkeit ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Da COLEMAN (1987) das Modell nie allgemeingültig darstellte, sondern stets für ein konkretes Beispiel initialisierte, wird im Rahmen dieser Arbeit eine verallgemeinerte Darstellung aus einer Sekundärquelle genutzt.



**Abbildung 2.7:** Abhängigkeiten zwischen soziologischen Makro- und Mikrostrukturen im Makro-Mikro-Makro-Modell. Zusammengefasst nach ESSER (1999, S. 94–98).

Das Modell wird zur soziologischen Erklärung des Zusammenhangs zwischen einer gegebenen sozialen Situation und ihrer Implikationen und Auswirkungen auf ein bestimmtes makrosoziologisches Ergebnis, das kollektive Explanadum, benutzt. Da die rein makroskopische Erklärung auf gesellschaftlicher Ebene meist nicht möglich oder nachvollziehbar ist,

wird die Erklärung stattdessen über drei Schritte, sogenannte Brückenhypothesen, getroffen (ESSER, 1999, S. 91–93; RAUB und VOSS, 2017, S. 11–13).

Der erste Schritt ist die Rekonstruktion der sozialen Situation der betroffenen Akteure. Jeder einzelne Akteur hat seine eigene Auslegung der durch die gegebene Situation von ihm wahrgenommenen Erwartungen und Handlungsspielräume (ESSER, 1999, S. 94; RAUB und VOSS, 2017, S. 13 f.).

Der zweite Schritt ist die Erklärung des individuellen Handelns jedes einzelnen Akteurs auf mikrosoziologischer Ebene. Auf Grundlage geeigneter Handlungstheorien kann an dieser Stelle begründet werden, wie sich das konkrete Handeln jedes Akteurs aus seinen persönlichen Eigenschaften und seinem Weltbild ergibt (ESSER, 1999, S. 94–96; RAUB und VOSS, 2017, S. 13 f.).

Den dritten und letzten Schritt bildet die aggregierende Transformation der individuellen Effekte zurück auf die makrosoziologische, gesellschaftliche Ebene. Diese Transformation muss erklären, wie sich die Handlungen einzelner Akteure als gesamtgesellschaftliches Phänomen manifestieren (ESSER, 1999, S. 96–98; RAUB und VOSS, 2017, S. 13 f.).

## 2.4.2 Psychologische Theorien und Modelle

Ziele der Psychologie sind die Beschreibung, Erklärung, Vorhersage und Veränderung des Bewusstseins, Erlebens und Verhaltens von Menschen (MADERTHANER, 2017, S. 27–37). Konkrete Forschungsgegenstände der Psychologie sind beispielsweise die Rolle der Umwelt eines Individuums, seine Biografie, Werte und seine freien Willensbildung sowie die Untersuchung der Verhältnisse von Bewusstem und Unbewusstem (MADERTHANER, 2017, S. 38–44). Während die Persönlichkeitspsychologie vor allem die Gründe für unterschiedliche Verhalten unterschiedlicher Individuen untersucht, betrachtet die Sozialpsychologie insbesondere die Rolle zwischenmenschlicher Beziehungen und Situationskontexte beim Handeln von Individuen (MYERS, 2014, S. 597 f., MADERTHANER, 2017, S. 47–49).

### 2.4.2.1 Social Cognitive Theory

Die *Social Cognitive Theory* von BANDURA (1989) ist ein konzeptionelles Rahmenwerk zur Analyse und Erklärung von Lernvorgängen eines Menschen anhand von Vorbildern. Sie stellt eine Erweiterung und Fortsetzung der ebenfalls von BANDURA (1971) entwickelten Social Learning Theory dar. Gemäß der Social Cognitive Theory wird ein wesentlicher Teil der erlernten Fähigkeiten und des persönlichen Wissens eines Akteurs nicht unmittelbar durch eigene Handlungen erworben, sondern durch Beobachtung von Handlungen Anderer.

Die Social Cognitive Theory beruht auf zwei wesentlichen, generellen Annahmen über die grundsätzliche Art des Menschseins. Einerseits nimmt die Social Cognitive Theory eine konsequent agentische Perspektive ein und stellt den Menschen als eigenständig handlungsfähige Entität in den Mittelpunkt. Andererseits beschreibt die Social Cognitive Theory vier wesentliche Befähigungen eines jeden Menschen, die ihn die Lage versetzen, Handlungsentscheidungen zu treffen (BANDURA, 2001b, S. 267–271):

**Befähigung zur Interpretation** Der Mensch ist in der Lage, nicht nur durch unmittelbare, eigene Erfahrungen zu lernen, sondern auch durch indirekte Gegebenheiten. Durch die Verwendung von Symbolsystemen wie zum Beispiel Sprache und Texten hat der Mensch die Möglichkeit, komplexe Vorgänge und Problemlösungen zu erdenken und diese anderen zu kommunizieren (BANDURA, 2001b, S. 267).

**Befähigung zur Selbstregulation** Der Mensch hat die Möglichkeit, sich selbstständig durch eigene Zielsetzungen und die zu erwartende Befriedigung bei erfolgreicher Zielerreichung zu motivieren und somit auch auf unmittelbare Kommoditäten zugunsten mittelbarer Vorteile zu verzichten (BANDURA, 2001b, S. 267 f.).

**Befähigung zur Selbstreflexion** Der Mensch kann seine Gedanken und Handlungen bewerten und damit Plausibilität, Zielrichtung und potenziellen Erfolg seiner Handlungen gedanklich vorwegnehmen und einschätzen oder nachträglich bewerten und reflektieren (BANDURA, 2001b, S. 269 f.).

**Befähigung zur Nachempfindung** Der Mensch besitzt die Fähigkeit, sich in die Situation anderer zu versetzen und anhand geschilderter oder beobachteter Verhalten das eigene Verhalten anzupassen. Mit zunehmender medialer Durchdringung ist das stellvertretende Verstehen anderer Verhalten statt ausschließlich eigener Versuch- und Irrtum-Erfahrungen essenziell (BANDURA, 2001b, S. 270 f.).

Ein zentrales Konstrukt der Social Cognitive Theory ist die *Selbstwirksamkeitserwartung* (Englisch: self-efficacy) eines Akteurs. Selbstwirksamkeitserwartung beschreibt die Überzeugung eines Akteurs, erfolgreich Einfluss auf äußere Umstände nehmen und beabsichtigte Handlungen erfolgreich durchführen zu können. Selbstwirksamkeitserwartung wird nach BANDURA (1977) von vier wesentlichen Quellen beeinflusst:

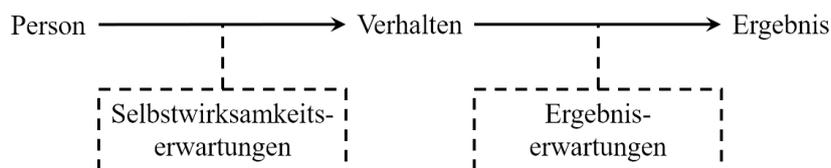
**Eigene Leistungen** Das durch eigene Erfolgserlebnisse gestiegene Selbstvertrauen kann die Selbstwirksamkeitserwartung eines Akteurs positiv beeinflussen, während Rückschläge und Misserfolge zu einer Verringerung der Selbstwirksamkeitserwartung führen können. Das Reflektieren eigener Leistungen birgt den höchsten Einfluss auf die Selbstwirksamkeitserwartung (BANDURA, 1977, S. 195–197).

**Stellvertretende Erfahrungen** Das Beobachten anderer Personen bei der erfolgreichen Durchführung bestimmter Verhalten ohne Eintritt potenzieller Rückschläge kann die Selbstwirksamkeitserwartung eines Akteurs stärken, wenngleich in geringerem Maße als die unmittelbar eigene Erfahrung (BANDURA, 1977, S. 197 f.).

**Verbale Überredung** Die Ermutigung eines Akteurs durch andere Personen kann die Selbstwirksamkeitserwartung in begrenztem Maße zusätzlich und unkompliziert stärken. Allerdings besteht bei Misserfolg die Gefahr der Diskreditierung und des Vertrauensverlust in die die Ermutigung aussprechenden Personen (BANDURA, 1977, S. 198).

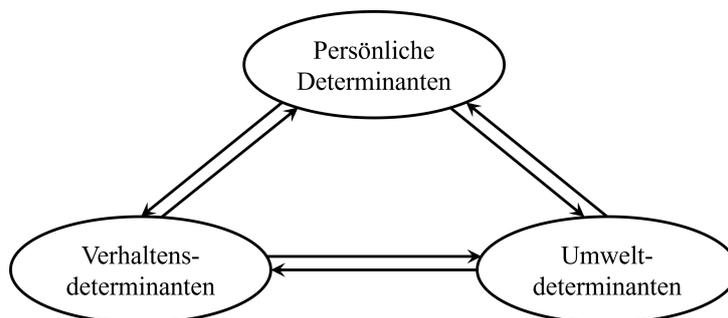
**Emotionale Anspannung** Die Angst vor dem Scheitern und den damit verbundenen Konsequenzen kann die Selbstwirksamkeitserwartung eines Akteurs schmälern, es besteht jedoch ebenso die Möglichkeit, dass die gesteigerte Anspannung und Konzentration die Durchführung einer neuen Handlung für den Moment erleichtern (BANDURA, 1977, S. 198–200).

Neben der Selbstwirksamkeitserwartung steht die *Ergebniserwartung* (Englisch: outcome expectancy) als weiteres Element für das erfolgreiche Erlernen und Übernehmen neuer Verhalten. Ergebniserwartung beschreibt die Erwartungshaltung eines Akteurs, dass ein bestimmtes Verhalten ein bestimmtes Ergebnis nach sich zieht. Die Ergebniserwartung ist insofern von der Selbstwirksamkeitserwartung zu unterscheiden, als ein Akteur sich trotz bekannter und korrekter Ergebniserwartung nicht imstande sehen kann, ein Verhalten durchzuführen, da ihm persönlich die notwendige Selbstwirksamkeitserwartung für das Verhalten selbst fehlt (BANDURA, 1977, S. 193 f.). Dieser Unterschied zwischen Selbstwirksamkeitserwartung und Ergebniserwartung bei der Erwägung eines Verhaltens durch eine Person ist in Abbildung 2.8 dargestellt.



**Abbildung 2.8:** Darstellung des Unterschieds zwischen Selbstwirksamkeitserwartung und Ergebniserwartung. Aus dem Englischen übersetzt nach BANDURA (1977, S. 193).

Den eigentlichen Kern zur Erklärung und Beschreibung des Verhaltens eines Akteurs innerhalb der Social Cognitive Theory bilden schließlich die reziproken Beziehungen innerhalb der in Abbildung 2.9 dargestellten Dreieckskonstellation.



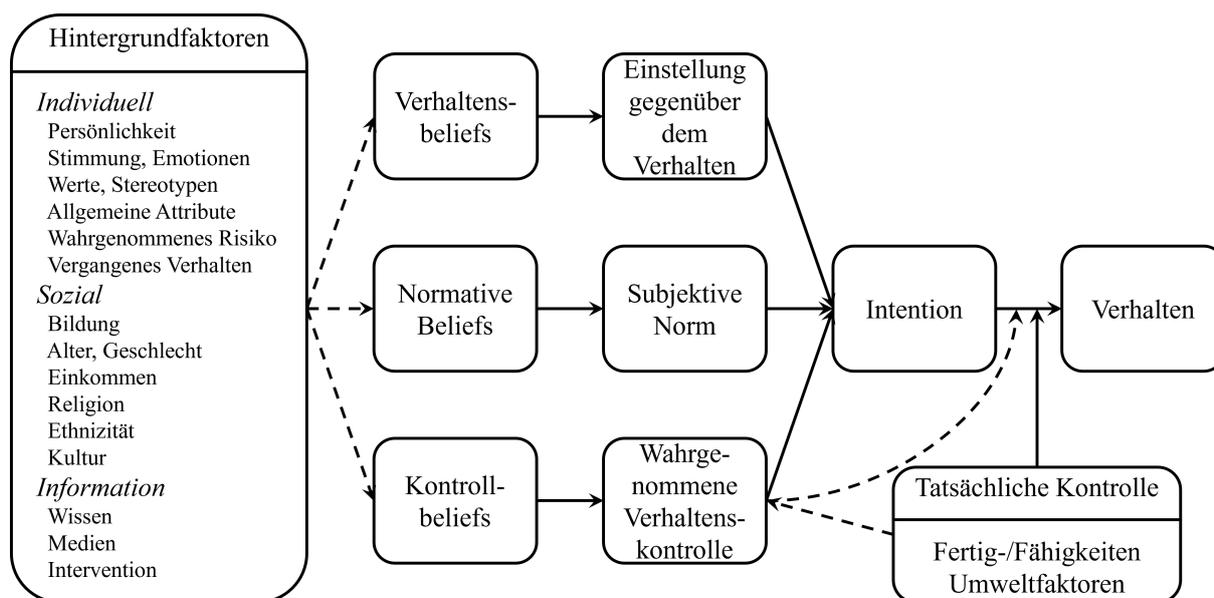
**Abbildung 2.9:** Schematische Darstellung der reziproken Dreiecksbeziehung im Kausalmodell der Social Cognitive Theory. Aus dem Englischen übersetzt nach BANDURA (2001b, S. 266).

Die persönlichen Determinanten bei der Entscheidung für oder gegen ein Verhalten beinhalten die korrekte Einschätzung der eigenen Mittel und umfassen insbesondere die Selbstwirksamkeitserwartung des Akteurs. Die Verhaltensdeterminanten repräsentieren die Erwar-

tungshaltung des Akteurs an das Ergebnis des erwogenen Verhaltens und damit die Dringlichkeit oder die zu erwartende Gratifikation bei erfolgreicher Durchführung des Verhaltens. Die Umweltdeterminanten schließlich umfassen die externen Einflüsse auf den Akteur bei der Entscheidung für oder gegen das erwogene Verhalten. Insbesondere beinhalten diese die Wirkung anderer Personen auf den Akteur (BANDURA, 2001b, S. 265 f.). Durch die wechselseitige Abhängigkeit der drei Determinanten besteht zum Beispiel die Möglichkeit der Stärkung positiver Verhaltensdeterminanten durch eine Veränderung der Umweltdeterminanten zugunsten des Verhaltens. Die erfolgreiche Durchführung des Verhaltens stärkt im Gegenzug die Selbstwirksamkeitswahrnehmung in den persönlichen Determinanten und erleichtert das gleiche Verhalten auch bei weniger günstigen Umweltdeterminanten.

### 2.4.2.2 Reasoned Action Approach

Der *Reasoned Action Approach* von FISHBEIN und AJZEN (2010) ist eine Methodik zur Erklärung und Vorhersage von menschlichem Verhalten. Er stellt die dritte Iteration und Erweiterung der vorhergegangenen Theory of Reasoned Action von FISHBEIN und AJZEN (1975) und der darauf aufbauenden Theory of Planned Behavior von AJZEN (1991) dar. Teil der Methodik des Reasoned Action Approach ist ein Modell zur Beschreibung und Erklärung von Handlungsintentionen und Verhalten eines Akteurs anhand von unterschiedlichen Beliefs des Akteurs. Das schematische Modell des Reasoned Action Approach ist in Abbildung 2.10 dargestellt. Gestrichelte Pfeile repräsentieren eine allgemeine Beeinflussung des Pfeilziels durch den Pfeilursprung, durchgezogene Pfeile repräsentieren eine direkte Folge des Pfeilendes durch den Pfeilursprung.



**Abbildung 2.10:** Schematisches Modell des Reasoned Action Approach zur Entstehung von Intention und resultierendem Verhalten. Aus dem Englischen übersetzt nach FISHBEIN und AJZEN (2010, S. 22).

Grundlage für jedes Verhalten bilden nach dem Reasoned Action Approach die Hintergrundfaktoren eines jeden Akteurs. Diese gliedern sich auf in individuelle Faktoren, soziale Faktoren sowie Informationsfaktoren und repräsentieren die unterschiedlichen, den Akteur definierenden Eigenschaften. Aus den prinzipiell beliebigen Hintergrundfaktoren werden anschließend drei wesentliche Arten von Beliefs abgeleitet:

Verhaltensbeliefs bilden die mit dem Verhalten assoziierten, positiven oder negativen Konsequenzen ab und münden in die grundsätzliche Einstellung gegenüber dem Verhalten, positiv oder negativ. Normative Beliefs bilden die subjektiv wahrgenommene Handlungsnorm, bestehend aus injunktiven Normen, also die vom Akteur erwartete Akzeptanz oder Ablehnung des Verhaltens durch das soziale Umfeld, und deskriptiven Normen, also das vom Akteur erwartete Verhalten des sozialen Umfelds in vergleichbaren Handlungssituationen. Kontrollbeliefs sowie die daraus gewonnene, wahrgenommene Verhaltenskontrolle repräsentieren die vom Akteur erwarteten Hilfen und Hinderlichkeiten aus seinen persönlichen Fertigkeiten und Fähigkeiten sowie den in der konkreten Situation gegebenen Umweltfaktoren.

Die Einstellung gegenüber dem erwogenen Verhalten, die subjektive Norm und die wahrgenommene Verhaltenskontrolle bilden gemeinsam die Entscheidungsgrundlage zur Bildung einer Handlungsintention hinsichtlich des erwogenen Verhaltens. Je stärker die Intention desto wahrscheinlicher ist es, dass das erwogene Verhalten vom Akteur durchgeführt wird. Die tatsächliche Durchführung der zuvor gebildeten Intention in Form eines konkreten, sichtbaren Verhaltens erfolgt abschließend unter Moderation der Fertigkeiten und Fähigkeiten des Akteurs und den gegebenen Umweltfaktoren. Die korrekte Einschätzung der Fertigkeiten, Fähigkeiten und Umweltfaktoren in der wahrgenommenen Verhaltenskontrolle hat dabei wesentlichen Einfluss auf die tatsächliche Kontrolle bei der Durchführung des Verhaltens (FISHBEIN und AJZEN, 2010, S. 21–23).

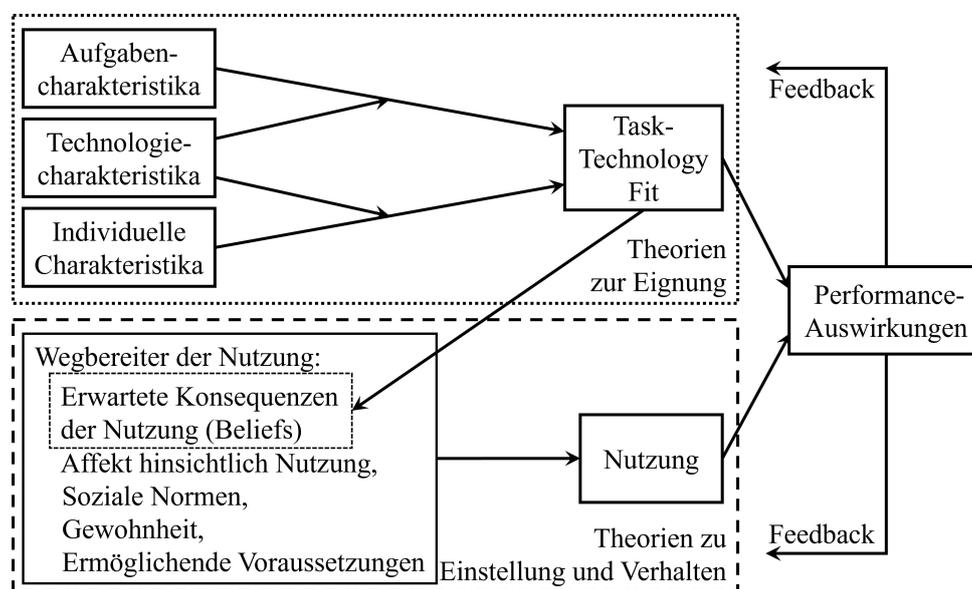
### 2.4.3 Informationswissenschaftliche Theorien und Modelle

Die Informationswissenschaft ist im deutschsprachigen Raum häufig der eher ingenieurwissenschaftlichen Wirtschaftsinformatik zugeordnet, während diese unter dem englischen Begriff Information Science international überwiegend durch die überwiegend empirische Methodik der Forschungsdisziplin Information Systems geprägt ist. In beiden Auslegungen ist jedoch die Untersuchung soziotechnischer Informationssysteme und ihrer Nutzung ein zentraler Gegenstand. Dabei wird insbesondere die Dreiecksbeziehung von Mensch, Aufgabe und Technik bei der Gestaltung und Nutzung soziotechnischer Informationssysteme untersucht (BÄCHLE et al., 2018, S. 7 f.; RAUTENSTRAUCH und SCHULZE, 2003, S. 216–219). Da der Mensch somit als Nutzer eines technischen Systems zur Erfüllung einer bestimmten Aufgabe angesehen wird, werden die Begriffe Nutzer und Akteur in diesem Abschnitt synonym genutzt.

### 2.4.3.1 Technology-to-Performance Chain

Die *Technology-to-Performance Chain* von GOODHUE und THOMPSON (1995) ist ein Modell zur Erklärung des Nutzungsverhaltens technischer Systeme durch einen Akteur. Sie basiert auf dem ursprünglichen I/S Success-Modell von DELONE und MCLEAN (1992), bezieht aber im Gegensatz zu diesem die Eigenschaften des konkreten Akteurs expliziter in die Erklärung des Nutzungsverhaltens mit ein. Da auch die jüngsten Erweiterungen des I/S Success-Modells durch DELONE und MCLEAN (2002) zum selbstbenannten DeLone & McLean IS Success Model einen deutlichen Fokus auf die Anbieterperspektive eines Informationssystems legen und die individuellen Eigenschaften des das System nutzenden Akteurs weiterhin vergleichsweise stark vernachlässigen, wird im Rahmen dieser Arbeit auf die ältere *Technology-to-Performance Chain* zurückgegriffen, die diesen Aspekt deutlicher betrachtet (DELONE und MCLEAN, 2003, S. 23 f.).

Die *Technology-to-Performance Chain* verbindet zwei eigenständige Forschungsrichtungen in einem gemeinsamen Modell. Einerseits werden in der Psychologie begründete Theorien zu Einstellung und Verhalten herangezogen, andererseits wird die praktische Eignung eines technischen Systems zur erfolgreichen Anwendung in das Nutzungsverhalten mit einbezogen. Die grundsätzliche Eignung eines technischen Systems für die gegebene Aufgabe mit den individuellen Fähigkeiten und Kenntnissen eines Akteurs wird in der *Technology-to-Performance Chain* mit dem Konzept des *Task-Technology Fit* zusammengefasst (GOODHUE und THOMPSON, 1995, S. 213). Das Modell der *Technology-to-Performance Chain* ist in Abbildung 2.11 dargestellt.



**Abbildung 2.11:** Modell der *Technology-to-Performance Chain*. Aus dem Englischen übersetzt nach GOODHUE und THOMPSON (1995, S. 217).

Nach der *Technology-to-Performance Chain* ergibt sich der *Task-Technology Fit* aus den Aufgabencharakteristika, also dem konkreten Zweck und Ziel der erwogenen Tätigkeit, und den individuellen Charakteristika des Akteurs im Umgang mit technischen Systemen, zum

Beispiel seiner Erfahrung und seinen Fähigkeiten. Beide werden jedoch von den Technologiecharakteristika des konkreten technischen Systems beeinflusst. Die Technologiecharakteristika bestimmen maßgeblich, ob das gegebene, technische System grundsätzlich sinnvoll und plausibel eingesetzt werden kann, um den Zweck und die Ziele der Aufgabe zu erfüllen. Ebenso ist die Nützlichkeit der Erfahrung und Fähigkeiten des Akteurs vom gegebenen technischen System abhängig; hat dieser keine Expertise im Umgang mit dem technischen System sind ihm seine individuellen Charakteristika unter Umständen nicht hilfreich (GOODHUE und THOMPSON, 1995, S. 216–218). Der Task-Technology Fit entspricht damit im Wesentlichen der in Abschnitt 2.4.3 genannten Dreiecksbeziehung von Mensch, Aufgabe und Technik.

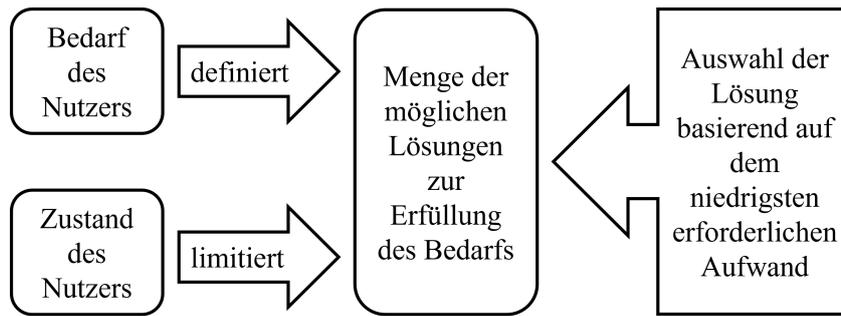
Der Task-Technology Fit beeinflusst einerseits die Auswirkungen auf das Ergebnis direkt, andererseits ist er Grundlage für die Beliefs eines Akteurs über die zu erwartenden Konsequenzen aus der Nutzung des gegebenen Systems hinsichtlich der Aufgabe. Neben den Beliefs über die Konsequenzen identifiziert die Technology-to-Performance Chain weitere Wegbereiter für die Nutzung eines Systems. Diese sind der Affekt des Akteurs, soziale Normen an die Nutzung, das Gewohnheitsverhalten des Akteurs sowie weitere ermöglichende Voraussetzungen. Affekte können dabei zum Beispiel die Motivation oder die Vorfreude des Akteurs auf die Nutzung sein, soziale Normen beinhalten die Erwartungshaltung anderer an das Nutzungsverhalten des Akteurs, die Gewohnheit bildet die Routine des Akteurs im Umgang mit dem System ab, die weiteren ermöglichenden Voraussetzungen schließlich stellen alle weiteren Hilfestellungen und Anreize dar, welche die Nutzung des Systems beeinflussen (GOODHUE und THOMPSON, 1995, S. 218 f.).

Die abschließenden Performance-Auswirkungen ergeben sich aus dem grundsätzlichen Task-Technology Fit und der Nutzung des Systems durch den konkreten, einzelnen Nutzer. Die letzte Komponente im Modell der Technology-to-Performance Chain sind Feedback-Schleifen zur Reflexion der Auswirkungen. Durch tatsächliche Nutzung des Systems können beispielsweise Erwartungshaltungen an das System angepasst werden oder Routine und Expertise im Umgang mit dem System ausgebaut werden (GOODHUE und THOMPSON, 1995, S. 218 f.).

### 2.4.3.2 Lazy User Theory

Die *Lazy User Theory* von TÉTARD und COLLAN (2009) ist eine Theorie zur Erklärung des Entscheidungsverhaltens eines Akteurs anhand des wahrgenommenen Aufwands der ihm zur Verfügung stehenden Handlungsoptionen. Das schematische Modell der Lazy User Theory ist in Abbildung 2.12 dargestellt.

Gemäß der Lazy User Theory wählt ein Akteur genau das technische System zur Lösung und Erfüllung seines Bedarfs aus einer Menge von Lösungsoptionen aus, das mit dem geringsten *Aufwand* (Englisch: least effort) für den Akteur verbunden ist. Diese Menge der Lösungsoptionen ist in der Lazy User Theory von zwei zentralen Einflüssen abhängig. Erstens ergibt sich aus dem konkreten Bedarf des Nutzers die Menge der Entscheidungsoptionen, die diesen potenziell befriedigen können. Zweitens wird diese Menge jedoch durch



**Abbildung 2.12:** Modell der Lazy User Theory. Aus dem Englischen übersetzt nach TÉTARD und COLLAN (2009, S. 3).

den Zustand des Nutzers zum Zeitpunkt des Bedarfs limitiert. Beispielsweise können räumliche oder zeitliche Einschränkungen dazu führen, dass nicht jedes grundsätzlich geeignete System zur Befriedigung des Bedarfs zur Verfügung steht. Aus den somit reduzierten Entscheidungsoptionen wählt der Akteur anschließend das System aus, das für ihn mit dem geringsten wahrgenommenen Aufwand verbunden ist. Der Aufwand kann neben tatsächlichen physischen oder geistigen Anstrengungen des Akteurs jedoch auch beispielsweise durch den notwendigen monetären Einsatz oder durch eine Kombination beschrieben werden. In jedem Fall geht die Lazy User Theory jedoch davon aus, dass stets eine Minimierung des Aufwands durch den Akteur angestrebt wird (TÉTARD und COLLAN, 2009, S. 3–6; COLLAN, 2007, S. 1 f.).

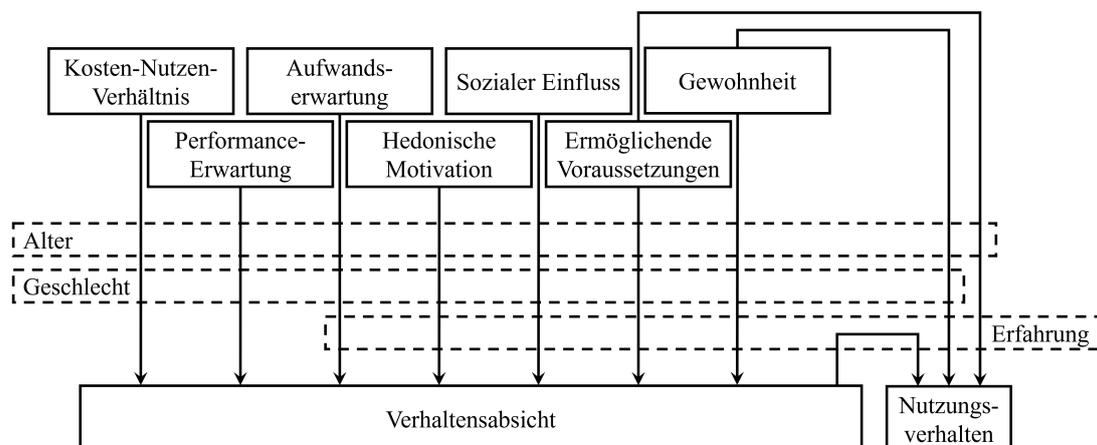
### 2.4.3.3 Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2

Die *Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2* von VENKATESH et al. (2012) ist ein theoretisches Modell zur Begründung und Erklärung des Nutzungsverhaltens eines technischen Systems durch einen Akteur. Sie ist eine Erweiterung der ursprünglichen Unified Theory of Acceptance and Use of Technology von VENKATESH et al. (2003) um weitere Elemente und stellt im Gegensatz dazu den einzelnen Konsumenten eines technischen Systems statt der betrieblichen Perspektive in den Mittelpunkt (VENKATESH et al., 2012, S. 157). Seinen Ursprung hat die Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2 im Technology Acceptance Model 2 von VENKATESH und DAVIS (2000), das wiederum auf dem Technology Acceptance Model von DAVIS et al. (1989) basiert.

Erklärtes Ziel der Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2 ist die Verbindung und Integration verschiedener, überwiegend psychologischer oder informationswissenschaftlicher Erklärungsansätze wie zum Beispiel der Social Cognitive Theory, der dem Reasoned Action Approach vorhergehenden Theory of Planned Behavior oder dem oben genannten Technology Acceptance Model in einem einheitlichen und konsistenten Erklärungsmodell (VENKATESH et al., 2003, S. 426).

Das der Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2 zugrundeliegende Modell ist in Abbildung 2.13 dargestellt. Die Darstellung und Anordnung der einzelnen Komponenten des Modells wurden für diese Arbeit im Vergleich zur Primärquelle erheblich verändert,

um die schlechte Nachvollziehbarkeit der ursprünglichen Darstellung zu verbessern. Am Inhalt des Modells wurden jedoch keine Veränderungen vorgenommen.



**Abbildung 2.13:** Modell der Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2. Aus dem Englischen übersetzt und neu angeordnet nach VENKATESH et al. (2012, S. 160).

Die Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2 benennt sieben zentrale Einflussgrößen, welche die Bildung der Verhaltensabsicht eines Akteurs formen.

**Kosten-Nutzen-Verhältnis** Das Kosten-Nutzen-Verhältnis bildet das vom Akteur wahrgenommene, wechselseitige Verhältnis zwischen den monetären Kosten und den erwarteten Vorteilen durch die Nutzung des Systems ab. Wenn der erwartete Nutzen größer als die relativen Kosten wahrgenommen wird, wirkt sich das Kosten-Nutzen-Verhältnis positiv auf die Verhaltensabsicht aus (VENKATESH et al., 2012, S. 161).

**Performance-Erwartung** Die Performance-Erwartung beschreibt die vom Akteur wahrgenommene Nützlichkeit des Systems und ist vergleichbar mit der Ergebniserwartung der Social Cognitive Theory und dem Task-Technology Fit der Technology-to-Performance Chain (VENKATESH et al., 2003, S. 447–450).

**Aufwandserwartung** Die Aufwandserwartung bildet die Komplexität und Benutzerfreundlichkeit des technischen Systems und die damit verbundene Herausforderung bei seiner Benutzung für den Akteur ab (VENKATESH et al., 2003, S. 450 f.).

**Hedonische Motivation** Die hedonische Motivation eines Akteurs hinsichtlich eines technischen System beschreibt den zu erwartenden Spaß oder Unterhaltungswert bei der Benutzung. Insbesondere bei der Betrachtung einzelner Konsumenten in der Rolle des systemnutzenden Akteurs spielt der individuelle Lustgewinn eine wesentliche Rolle (VENKATESH et al., 2012, S. 161).

**Sozialer Einfluss** Der soziale Einfluss umfasst die vom Akteur wahrgenommene Erwartungshaltung anderer Personen hinsichtlich der Nutzung des Systems. Vergleichbar mit dem sozialen Einfluss ist beispielsweise das Konstrukt der subjektiven Norm im Reasoned Action Approach (VENKATESH et al., 2003, S. 451–453).

**Ermöglichende Voraussetzungen** Die ermöglichenden Voraussetzungen beinhalten die weitere infrastrukturelle Umwelt, die vom Akteur bei der Nutzung des Systems als hilfreich oder unterstützend wahrgenommen wird. Sie sind eine von zwei Einflussgrößen, die nicht nur die Bildung der Verhaltensabsicht, sondern auch das Nutzungsverhalten direkt prägen, da diese nicht nur eine unscharfe Erwartungshaltung, sondern auch die verfügbaren, objektiven Hilfsmittel beschreiben (VENKATESH et al., 2003, S. 453–455).

**Gewohnheit** Die Gewohnheit eines Akteurs bei der Benutzung eines technischen Systems beschreibt die Routine, die er durch vorherige Benutzung des Systems erworben hat. Sie ist die zweite Einflussgröße, die nicht nur die Verhaltensabsicht, sondern auch unmittelbar das Nutzungsverhalten beeinflusst, da sie nicht nur die Erwartungshaltung an das technische System, sondern auch die tatsächliche geschehene, vergangene Nutzung des Systems durch den Akteur umfasst (VENKATESH et al., 2012, S. 161 f.).

Zusätzlich zu diesen sieben Einflussgrößen stellt die Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2 drei Eigenschaften eines Akteurs als zentrale Moderatoren für die Entstehung einer Verhaltensabsicht heraus, das Alter und das Geschlecht des Akteurs sowie seine Erfahrung mit dem technischen System. Die Erfahrung umfasst im Gegensatz zur Gewohnheit auch theoretisches Wissen über das System und ist daher nicht an eine vorherige Nutzung des Systems gebunden. Nicht jede dieser Eigenschaften eines Akteurs moderiert jeden Zusammenhang zwischen Einflussgrößen, Verhaltensabsicht und Nutzungsverhalten. Das Alter moderiert jeden Zusammenhang bis auf den Übergang von der Verhaltensabsicht zum Nutzungsverhalten, das Geschlecht ist darüber hinaus auch für den Einfluss der ermöglichenden Voraussetzungen auf das Nutzungsverhalten irrelevant. Die Erfahrung des Akteurs schließlich hat keinen Einfluss auf die Zusammenhänge zwischen dem Kosten-Nutzen-Verhältnis respektive der Performance-Erwartung und der Verhaltensabsicht (VENKATESH et al., 2003, S. 447–455; VENKATESH et al., 2012, S. 162–166).

#### 2.4.4 Wirtschaftswissenschaftliche Theorien und Modelle

Zentraler Gegenstand der Wirtschaftswissenschaft ist die Untersuchung des Entscheidungsverhalten von Menschen hinsichtlich Herstellung, Austausch und Nutzung von wertbehafteten Gütern und Dienstleistungen. Dieser Untersuchung liegt die Annahme zugrunde, dass jeder Entscheidung und Handlung eines Menschen das Interesse zugrunde liegt, seine gegebene Situation im Rahmen typischerweise begrenzter Einsatzmittel zu verbessern (KRUGMAN und WELLS, 2017, S. 1 f.; PIEKENBROCK und HENNIG, 2013, S. 15 f.). Diese Untersuchungen können sowohl auf Mikro- als auch auf Makroebene vorgenommen werden, um entweder primär individuelle Entscheidungen und Verhalten oder aggregierte Gesamtverhalten zu beobachten und zu erklären (KRUGMAN und WELLS, 2017, S. 646 f.; PIEKENBROCK und HENNIG, 2013, S. 16 f.).

### 2.4.4.1 Homo Oeconomicus und rationale Entscheidung

Der *Homo Oeconomicus* ist vereinfachtes Handlungsmodell zur Erklärung von Wirtschaftsentscheidungen (PIEKENBROCK und HENNIG, 2013, S. 23). Das grundlegende Verhaltensprinzip des Homo Oeconomicus als Akteur in einem Markt ist die *rationale Entscheidung* (Englisch: rational choice) beziehungsweise Nutzenmaximierung (STOUT, 2008, S. 158 f.; SAAM und GAUTSCHI, 2015, S. 31–33; BRAUN, 2009, S. 395, 399; BECK, 2014, S. 1 f.). Der Homo Oeconomicus weist damit Parallelen zum in Abschnitt 2.3 beschriebenen rationalen beziehungsweise nutzenmaximierenden Agenten auf.

Ziel der rationalen Entscheidung ist die möglichst optimale Befriedigung eines Bedürfnisses durch die Entscheidung für eine Handlung oder den Erwerb eines Guts mit dem bestmöglichen *Nutzen* (Englisch: utility). Der Nutzen einer Handlung oder eines Guts ist an dieser Stelle ein abstraktes Konzept zur Bewertung der zur Verfügung stehenden Handlungsoptionen oder Güter und wird durch die individuelle *Nutzenfunktion* des Homo Oeconomicus bestimmt (PIEKENBROCK und HENNIG, 2013, S. 5–7; KRUGMAN und WELLS, 2017, S. 298). Damit lässt sich der Nutzen auch als das Verhältnis von Kosten beziehungsweise Aufwand einerseits und Mehrwert beziehungsweise erwarteter Bedürfnisbefriedigung andererseits formulieren. Werden so mehrere verschiedene Zielgrößen in einer Nutzenfunktion zusammengefasst, besteht die Möglichkeit, dass mehr als eine optimale Lösung für den Bedarf des Homo Oeconomicus existiert (PIEKENBROCK und HENNIG, 2013, S. 92–95; KRUGMAN und WELLS, 2017, S. 299). Jede dieser hinsichtlich der individuellen Nutzenfunktion gleichermaßen effizienten Lösungen wird als *Pareto-optimal* bezeichnet (BARR, 2012, S. 43–46). Eine Pareto-optimale Lösung zeichnet sich dadurch aus, dass es keine alternative Lösung gibt, die hinsichtlich einer der Zielgrößen besser bewertet wird, ohne nicht wenigstens in einer anderen Zielgröße schlechter bewertet zu sein (PIEKENBROCK und HENNIG, 2013, S. 74).

### 2.4.4.2 Verhaltensökonomie

Die Verhaltensökonomie ist ein Teilbereich der Wirtschaftswissenschaft, die sich durch explizite Berücksichtigung psychologischer Erklärungsmodelle von rein rationalen Wirtschaftsmodellen wie dem in Abschnitt 2.4.4.1 beschriebenen Homo Oeconomicus abweicht. Wirtschaftliche Entscheidungen und Handlungen sind demnach in letzter Instanz immer von der imperfekten Wahrnehmung und den kognitiven Verzerrungen der menschlichen Entscheidungsträger abhängig (SHEFRIN, 2002, S. 3 f.; THALER und SUNSTEIN, 2008, S. 19 f.). SHEFRIN (2002) identifiziert drei zentrale Bereiche, in denen die Verhaltensökonomie von der neoklassischen Wirtschaftstheorie abweicht.

**Heuristiken** Finanzielle oder ökonomische Entscheidungen werden nicht immer durch perfektes Abwägen aller Handlungsoptionen getroffen. Häufig genügen einfache *Heuristiken* und Daumenregeln für ein ausreichend gutes Ergebnis, sodass eine tatsächliche, objektive Berechnung zum Vergleich der Handlungsoptionen nicht vorgenommen wird. Zu diesen Entscheidungsheuristiken gehören zum Beispiel das Überbewerten von erst zum Zeitpunkt einer Entscheidung verfügbaren Informationen oder das Vermeiden von

Entscheidungsoptionen mit ungewissem Ausgang zugunsten von verlässlicheren Entscheidungsoptionen. Eine heuristische getroffene Entscheidung ist damit nur begrenzt rational (SHEFRIN, 2002, S. 4, 13; THALER und SUNSTEIN, 2008, S. 22 f.; BECK, 2014, S. 2 f., 25–28).

**Framing** Finanzielle oder ökonomische Entscheidungen werden wesentlich von der Darstellung der Handlungsoptionen, also dem Rahmen (Englisch: frame), in dem sie präsentiert werden, beeinflusst. Verlustaversion ist nur ein Beispiel für *Framing*, diese besagt, dass Individuen Verluste beziehungsweise negative Konsequenzen stärker bei ihren Entscheidungen gewichten als Gewinne oder positive Auswirkungen in gleicher, absoluter Höhe. (SHEFRIN, 2002, S. 4, 23; THALER und SUNSTEIN, 2008, S. 36 f.; BECK, 2014, S. 10 f., 153).

**Unvollkommene Märkte** Finanzielle oder ökonomische Entscheidungsoptionen werden nicht nur vom jeweils handelnden Akteur inkorrekt wahrgenommen, ihr Verhalten beeinflusst auch die Bewertung und die damit verbundene Preisbildung am Markt. In der Folge ist auch der Markt selbst von fehlerhafter Preisbildung betroffen und entspricht nicht mehr dem angenommenen Idealtypus (SHEFRIN, 2002, S. 5, 33). Setzt sich dieser Effekt fort, können unreflektiertes Herdenverhalten und Handlungskonformität der Akteure damit zu rational nicht mehr erklärbaren Über- und Unterbewertungen führen (THALER und SUNSTEIN, 2008, S. 60 f.).

Aufbauend auf dem Wissen um diese Unzulänglichkeiten menschlicher Entscheidungsträger können unterschiedliche Strategien formuliert werden, um Akteure in ihrem Verhalten zu beeinflussen. THALER und SUNSTEIN (2008) formulieren dazu das Prinzip des Nudge (Deutsch: Stupser), also ein subtiler Anstoß eines Akteurs in die gewünschte Handlungsrichtung. Ein Nudge unterscheidet sich dahingehend von einem Incentive<sup>25</sup>, dass er prinzipiell keine Einschränkungen oder Veränderungen an den Handlungsoptionen des Akteurs sowie ihrem objektiven Nutzen vornimmt, sondern lediglich die Wahrnehmung eines Akteurs für einzelne Alternativen verändert (THALER und SUNSTEIN, 2008, S. 6).

---

<sup>25</sup>Ein Incentive (Deutsch: Anreiz) ist monetärer oder sachlicher Anreiz für einen wirtschaftlichen Akteur, ein gewünschtes Verhalten zu zeigen (THALER und SUNSTEIN, 2008, S. 97).

# Kapitel 3

## Verwandte Arbeiten

Ein wie in Abschnitt 1.4 beschriebenes Vorgehen nach ingenieurwissenschaftlicher Methodik beinhaltet stets die Frage, ob bereits geeignete Lösungen existieren, die erfolgreich zur Bewältigung der identifizierten Problemstellung genutzt werden können. Im Rahmen der Analyse verwandter Arbeiten wird daher in diesem Kapitel geprüft, ob wenigstens ein bereits entwickeltes Simulationssystem in Form einer thematisch verwandten Arbeit existiert, das die in Abschnitt 1.3 definierten Ziele dieser Arbeit erfüllt und somit zur Simulation von Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten herangezogen werden kann. Eine verwandte Arbeit wendet demnach ausgewählte beziehungsweise zu denen dieser Arbeit ähnliche Grundlagen und Methoden für eine vergleichbare Problemstellung und Zielsetzung an.

Die besondere Herausforderung liegt in der systematischen und methodischen Erhebung und Analyse dieser verwandten Arbeiten. Daher wird in Abschnitt 3.1 zunächst die Methode beschrieben, die zur Suche verwandter Arbeiten genutzt wird, die weiteren Abschnitte dieses Kapitels ergeben sich aus dieser Methode. In Abschnitt 3.2 werden der Umfang, die Einschränkungen und die zentralen Konzepte der Suche nach verwandten Arbeiten festgelegt, anschließend werden in Abschnitt 3.3 diejenigen verwandten Arbeiten genauer dargestellt, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Abschließend wird in Abschnitt 3.4 der Stand der Technik hinsichtlich der in Abschnitt 1.3 definierten Ziele dieser Arbeit bewertet und der weitere Handlungsbedarf identifiziert.

### 3.1 Methode zur Erhebung der verwandten Arbeiten

Zur Erfassung aller wesentlichen bereits existierenden Ansätze, die zur Erreichung der in Abschnitt 1.3 formulierten Ziele geeignet sein könnten, wird ein systematisches Vorgehen benötigt. Im Rahmen dieser Arbeit wird dazu auf die von VOM BROCKE et al. (2009) vorgeschlagene Methode für Literaturreviews und -analysen zurückgegriffen, da diese durch ihre Herkunft aus der Wirtschaftsinformatik beziehungsweise Informationswissenschaft einen besseren Bezug zur fachlichen Ausrichtung dieser Arbeit hat als Alternativen aus beispielsweise der Medizin oder den Sozialwissenschaften (MOHER et al., 2009; TRANFIELD et al., 2003). Die Methode besteht aus den im Folgenden beschriebenen fünf Schritten (VOM BROCKE et al., 2009).

- 1. Festlegung des Umfangs des Literaturreviews** Die Erfassung und Analyse bestehender Literatur oder relevanter Vorarbeiten zu einem ausgewählten Thema kann fundamental unterschiedlichen Zielsetzungen folgen, so kann ein Literaturreview beispielsweise nur den zum Zeitpunkt des Literaturreviews aktuellen Stand der Technik oder Forschung abbilden oder auch die historische Entwicklung zu ebenjenem Stand. Daher empfehlen VOM BROCKE et al. (2009) den Umfang einer Literaturanalyse gemäß der von COOPER (1988) aufgestellten, aus sechs Kriterien bestehenden Taxonomie zu bestimmen und einzugrenzen (COOPER, 1988, S. 107–112).
- 2. Konzeption des Themas** Zur konzeptionellen Durchdringung und Beschreibung des Themas müssen die zentralen Begriffe und Konzepte bekannt sein, um diese beispielsweise als Schlüsselwörter für die spätere Literatursuche nutzen zu können sowie um die Ergebnisse der Suche verstehen und einordnen zu können. Zur Erarbeitung dieser Konzepte empfehlen VOM BROCKE et al. (2009) die Erarbeitung der Grundlagen der für das Thema relevanten Forschungsdomänen.
- 3. Literatursuche** Die eigentliche Literatursuche beginnt mit der Identifikation geeigneter, wissenschaftlicher Journals und Datenbanken beziehungsweise Suchmaschinen, um diese mithilfe der in Schritt zwei bestimmten Schlüsselwörter zu durchsuchen. Relevante Ergebnisse müssen anhand von Titel, Schlüsselwörtern, Zusammenfassung und Inhalt als solche identifiziert werden. Anschließend kann bei Bedarf eine Rückwärts- oder Vorwärtssuche<sup>26</sup> auf Grundlage der so identifizierten Ergebnisse durchgeführt werden, um die Wahrscheinlichkeit der Identifikation aller wesentlichen Beiträge zum untersuchten Thema zu erhöhen (VOM BROCKE et al., 2009).
- 4. Literaturanalyse und -synthese** Im Rahmen der Literaturanalyse und -synthese werden die Ergebnisse der Literatursuche systematisch strukturiert und geeignet dargestellt. Ergebnisse können entweder autorzentriert beziehungsweise ergebniszentriert, das heißt in Form einzelner Zusammenfassungen der wesentlichen Konzepte und Ansätze innerhalb jedes Ergebnisses, oder konzeptzentriert, das heißt in Form einer Zuordnung von relevanten Konzepten einerseits und Ergebnissen andererseits, dargestellt werden. Während eine autorzentrierte Darstellung zur initialen Vorstellung der Ergebnisse geeignet ist, ist für die Synthese und ergebnisübergreifende Strukturierung eine konzeptzentrierte Darstellung erforderlich (WEBSTER und WATSON, 2002, S. xvi). Zur abschließenden Darstellung empfehlen VOM BROCKE et al. (2009) daher eine Konzeptmatrix nach WEBSTER und WATSON (2002), um die Ergebnisse der Literatursuche und die darin jeweils genutzten Konzepte in Zusammenhang zu bringen (VOM BROCKE et al., 2009).
- 5. Forschungsagenda** Ein Literaturreview dient nicht dem Selbstzweck, sondern ist sowohl bereits durch den im ersten Schritt festgelegten Umfang als auch durch die im vierten

---

<sup>26</sup>Bei einer Rückwärtssuche wird anhand der Quellenangaben eines Ergebnisses nach thematisch passenden Vorarbeiten gesucht, bei einer Vorwärtssuche wird mit speziellen Suchmaschinen überprüft, für welche neueren Arbeiten das gefundene Ergebnis als Vorarbeit dient.

Schritt durchgeführte Analyse und Synthese der Ergebnisse ein geeignetes Mittel, um Forschungslücken und Handlungsbedarfe in Form einer konkretisierten Forschungsagenda zu formulieren (VOM BROCKE et al., 2009).

## 3.2 Vorbereitung der Literatursuche

Gemäß der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Methode ist im Rahmen des ersten Schrittes zunächst der Umfang der Suche nach verwandten Arbeiten zu definieren. Dazu werden die sechs Kriterien nach COOPER (1988) herangezogen. Diese Kriterien sind der Fokus und der Zweck des Literaturreviews, die Perspektive, die Abdeckung der identifizierten Arbeiten und die Organisation in der Darstellung der Ergebnisse sowie die Zielgruppe des Literaturreviews (COOPER, 1988, S. 107–112).

Der Fokus dieser Literatursuche liegt auf verwandten Arbeiten, die ebenso wie diese Arbeit in einem wissenschaftlichen Kontext oder in nicht-kommerziellen Forschungsprojekten entstanden sind und dementsprechend in einschlägigen wissenschaftlichen Journals oder Konferenzen publiziert wurden. Kommerzielle Produkte, deren genaue Struktur und Funktionsweise typischerweise nicht öffentlich sind, werden bei dieser Literatursuche nicht einbezogen. Der erklärte Zweck dieser Literatursuche ist die Einordnung der zu identifizierenden verwandten Arbeiten und die Kritik hinsichtlich der in Abschnitt 1.3 beschriebenen Ziele dieser Arbeit. Die zentrale, dabei zu klärende Frage ist, ob wenigstens eine der verwandten Arbeiten die Ziele dieser Arbeit bereits umfänglich erfüllt. Sowohl für die Literatursuche als auch die anschließende Analyse ist eine Perspektive einzunehmen, bei der die verwandten Arbeiten neutral und wertungsfrei dargestellt werden. Da möglichst alle verwandten Arbeiten gefunden werden sollen, ist eine möglichst vollständige Abdeckung demzufolge unumgänglich. Die Schwierigkeit liegt dabei in der Vielzahl unterschiedlicher Kanäle für wissenschaftliche Veröffentlichungen, sodass an dieser Stelle dennoch unweigerlich eine Beschränkung auf die einschlägigen wissenschaftlichen Journals und Konferenzen sowie gängigen Suchmaschinen für wissenschaftliche Literatur erfolgen muss. Die durch die Literatursuche identifizierten verwandten Arbeiten werden zunächst chronologisch sortiert beschrieben, bevor sie anschließend konzeptorientiert hinsichtlich der Erfüllung der Ziele dieser Arbeit eingeordnet werden. Durch die Einbettung dieser Suche und Analyse verwandter Arbeiten in das in Abschnitt 1.4 beschriebene Vorgehen für diese wissenschaftliche Arbeit ist als Zielgruppe ebenso die Wissenschaft zu benennen.

Für den zweiten Schritt der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Methode ist die geplante Literatursuche inhaltlich anhand relevanter Schlüsselwörter genauer zu konzeptionieren. Die Schlüsselwörter werden auf Englisch festgelegt, um die Literatursuche auf internationale Veröffentlichungen auszurichten. Weiterhin werden keine konkreten Namen von Methoden, Theorien oder Modellen als Schlüsselwörter genutzt, um die Suche nicht übermäßig einzuschränken.

Vor dem Hintergrund von Teilfrage 3 dieser Arbeit und der damit verbundenen konkreten softwaretechnischen Gestaltung eines Simulationssystems zu Akzeptanz und Nutzung von

Mobilitätsangeboten müssen auch die verwandten Arbeiten eine technische Umsetzung eines Simulationssystems für Fragestellungen aus dem Bereich Verkehr oder Mobilität umfassen. Arbeiten, die lediglich parametrisierte Modelle ohne ausreichend beschriebene technische Umsetzung beinhalten, sind nicht hinreichend für eine potentiell relevante verwandte Arbeit. Aus Abschnitt 2.1 und Abschnitt 2.2 dieser Arbeit ergeben sich die folgenden vier Themenbereiche, aus denen jeweils ein Schlüsselwort zwingend in einer verwandten Arbeit gefunden werden sollte, um diese als thematisch grundsätzlich passend zu identifizieren.

- ‚mobility‘, ‚transportation‘, ‚traffic‘, ‚travel‘
- ‚modal split‘, ‚modal mix‘, ‚modal choice‘, ‚mode choice‘
- ‚trip-based‘, ‚4-step‘, ‚four-step‘, ‚activity-based‘, ‚tour-based‘
- ‚simulation‘, ‚simulator‘

Aus Abschnitt 2.3 und Abschnitt 2.4 können weiterhin optionale Schlüsselwörter aus den folgenden drei Themenbereichen abgeleitet werden, die zur weiteren Eingrenzung herangezogen werden können, aber nicht müssen.

- ‚agent‘, ‚multiagent‘
- ‚artificial intelligence‘, ‚computational intelligence‘
- ‚behavior‘, ‚behaviour‘, ‚reason‘, ‚reasoning‘, ‚decision‘, ‚action‘

Für den dritten Schritt der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Methode sind die für die Literatursuche zu nutzenden wissenschaftlichen Journals und Datenbanken festzulegen. Die folgenden themenbezogenen Journals wurden zusammen mit Google Scholar<sup>27</sup> zur Literatursuche genutzt.

- Transportation<sup>28</sup> (Springer)
- Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board<sup>29</sup> (SAGE Publications)
- Transportation Research Part A<sup>30</sup>, B<sup>31</sup>, C<sup>32</sup>, D<sup>33</sup>, E<sup>34</sup>, F<sup>35</sup> (Elsevier)
- ITE Journal<sup>36</sup> (Institute of Transportation Engineers)

Da es sich bei den verwandten Arbeiten um konkrete technische und dementsprechend umfangreiche und komplexe Simulationssysteme handeln wird, ist davon auszugehen, dass typischerweise mehr als eine Veröffentlichung zu einem solchen Simulationssystem entstanden

<sup>27</sup><https://scholar.google.com> (letzter Abruf: 27.02.2022).

<sup>28</sup><https://www.springer.com/journal/11116> (letzter Abruf: 27.02.2022).

<sup>29</sup><https://journals.sagepub.com/home/trr> (letzter Abruf: 27.02.2022).

<sup>30</sup><https://www.journals.elsevier.com/transportation-research-part-a-policy-and-practice> (letzter Abruf: 27.02.2022).

<sup>31</sup><https://www.journals.elsevier.com/transportation-research-part-b-methodological> (letzter Abruf: 27.02.2022).

<sup>32</sup><https://www.journals.elsevier.com/transportation-research-part-c-emerging-technologies> (letzter Abruf: 27.02.2022).

<sup>33</sup><https://www.journals.elsevier.com/transportation-research-part-d-transport-and-environment> (letzter Abruf: 27.02.2022).

<sup>34</sup><https://www.journals.elsevier.com/transportation-research-part-e-logistics-and-transportation-review> (letzter Abruf: 27.02.2022).

<sup>35</sup><https://www.journals.elsevier.com/transportation-research-part-f-traffic-psychology-and-behaviour> (letzter Abruf: 27.02.2022).

<sup>36</sup><https://www.ite.org/publications/ite-journal> (letzter Abruf: 27.02.2022).

ist. Daher wird, nachdem eine relevante verwandte Arbeit identifiziert wurde, zusätzlich eine Rückwärtssuche sowie eine Suche nach den Autoren dieser Arbeit durchgeführt, um möglichst alle Veröffentlichungen zu diesem Simulationssystem zu finden.

### 3.3 Stand der Technik

Nach Durchführung der Literatursuche mit dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen Umfang und den genannten Einschränkungen kann nun der Stand der Technik in der Vielzahl von Veröffentlichungen zu unterschiedlichen Simulationssystemen identifiziert werden. Der aktuelle Stand der Technik ist damit als Teilmenge aller verwandten Arbeiten zu verstehen. Es ist festzustellen, dass sich der Stand der Technik, im Gegensatz zu älteren Simulationssystemen wie beispielsweise STARCHILD (RECKER et al., 1986a; RECKER et al., 1986b), SMASH (ETTEMA et al., 1993; ETTEMA et al., 1996), SAMS (KITAMURA et al., 1996), SMART (STOPHER et al., 1996) sowie PCATS und AMOS (KITAMURA und FUJII, 1998), ungefähr seit der Jahrtausendwende durch die konsequente Nutzung aktivitätsbasierter und agentenbasierter Ansätze auszeichnet. Es ist davon auszugehen, dass diese Entwicklung neben der höheren Komplexität derartiger Ansätze auch durch die gestiegene Verfügbarkeit ausreichender Ressourcen zur Durchführung aktivitätsbasierter, agentenbasierter Simulationsexperimente ermöglicht wird (SHIFTAN und BEN-AKIVA, 2011, S. 518 f.).

In den folgenden acht Abschnitten werden die acht, dem aktuellen Stand der Technik entsprechenden Simulationssysteme zunächst einzeln inhaltlich vorgestellt, die dabei genutzte deutsche Terminologie orientiert sich möglichst dicht an den englischen Begriffen in den jeweiligen Veröffentlichungen. Diese rein inhaltliche Darstellung entspricht daher noch nicht der Literaturanalyse und -synthese gemäß dem vierten Schritt der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Methode. Sie erfolgt chronologisch nach Veröffentlichungsdaten.

#### 3.3.1 ALBATROSS

ALBATROSS (A Learning-based Transportation Oriented Simulation System) von ARENTZE und TIMMERMANS (2000) ist ein System zur Erzeugung, Simulation und Prädiktion von Aktivitätsmustern und Verkehrsnachfrage beziehungsweise -verhalten. Dem Simulator liegt ein aktivitätsbasiertes Verkehrsmodell zugrunde, das durch ein Multiagentensystem weiter ausgestaltet ist (ARENTZE et al., 2000, S. 138 f.).

Die Agenten des Systems repräsentieren einzelne Verkehrsteilnehmer und treffen langfristige Entscheidungen zu beispielsweise Wohnort und Arbeitsplatz, mittelfristige Entscheidungen wie das Planen von bevorstehenden Aktivitäten und Aufgaben hin zur kurzfristigen, operativen Ausführung dieser Pläne. Dazu werden vier wesentliche Einflussdimensionen bei der Entscheidungsfindung unterschieden. Erstens Charakteristika hinsichtlich der Person und des Haushalts eines Agenten wie zum Beispiel Alter oder Haushaltszusammensetzung, zweitens situationsbezogene Umstände und Einschränkungen wie Wochentag oder sonstige zeitliche und räumliche Einschränkungen, drittens die vom Agenten wahrgenommene

Umwelt wie Motivation oder Erfahrungen und viertens Systemeigenschaften wie die vorhandenen Transportsysteme (ARENTZE und TIMMERMANS, 2000, S. 76; ARENTZE et al., 2000, S. 137 f.).

Das grundsätzlich regelbasierte Entscheidungskonzept der Agenten von ALBATROSS fußt auf dem Prinzip der heuristischen Entscheidungen der Verhaltensökonomie, indem durch die Agenten versucht wird, mit den Entscheidungen verknüpfte Nebenbedingungen zu erfüllen oder diese wenn nötig zu relaxieren (ARENTZE und TIMMERMANS, 2000, S. 114 f.). Ausgestaltet ist dieses Konzept durch automatisch generierte Entscheidungsbäume und Entscheidungstabellen, anhand derer die Agenten die Eignung unterschiedlicher Verkehrsmittel für die gegebene Entscheidungssituation bewerten (ARENTZE et al., 1999, S. 61; ARENTZE et al., 2000, S. 138; ARENTZE und TIMMERMANS, 2004; ARENTZE und TIMMERMANS, 2000, S. 108 f.). Die Effizienz alternativer Entscheidungsmechanismen wie beispielsweise bayessche Netze ist ebenfalls untersucht worden (JANSSENS et al., 2004; JANSSENS et al., 2006). Die Datengrundlage für Entscheidungen der Agenten von ALBATROSS wurde in den Niederlanden auf Grundlage von Reisetagebüchern erhoben (ARENTZE und TIMMERMANS, 2000, S. 140–143, 406 f.).

Weitere Anwendung und Erweiterung findet ALBATROSS unter anderem innerhalb des Systems FEATHERS (Forecasting Evolutionary Activity-Travel of Households and Their Environmental Repercussions). Auf Grundlage von unterschiedlichen Informationsquellen wie GPS-Daten, Umfragen oder der Analyse von sozialen Netzwerken wurde im Rahmen von FEATHERS in der belgischen Region Flandern ein Simulations- und Prognosesystem für Fragestellungen des Mobilitätsmanagements entwickelt (ARENTZE et al., 2008; BELLEMANS et al., 2010).

### 3.3.2 CEMDAP

CEMDAP (Comprehensive Econometric Micro-simulator for Daily Activity-travel Patterns) von BHAT et al. (2004) ist ein aktivitätsbasiertes Simulationssystem zur dynamischen Vorhersage der täglichen Aktivitätsmuster einzelner Agenten.

Konzeptionell wird innerhalb von CEMDAP zwischen zwei Arten von Aktivitätsmustern unterschieden: Aktivitätsmuster von sogenannten Arbeitern beinhalten mindestens eine Aktivität, die nicht umgangen werden kann und deren Start- und Endzeiten festgelegt sind, während Aktivitätsmuster von sogenannten Nicht-Arbeitern ausschließlich aus flexiblen und nicht verbindlichen Aktivitäten bestehen. Unter dem Begriff Arbeit werden daher auch andere verpflichtende Aktivitäten, wie beispielsweise ein Schulbesuch, zusammengefasst. CEMDAP unterscheidet zwischen minderjährigen und erwachsenen Agenten und berücksichtigt bei der Erzeugung der Aktivitätsmuster insbesondere die Abhängigkeiten minderjähriger von erwachsenen Agenten. Minderjährige Agenten werden als vergleichsweise immobil angenommen, sodass ihre Schulbesuche beispielsweise durch Bring- und Holdienste eines erwachsenen Haushaltsmitglieds gewährleistet werden müssen. Die Entscheidungsfindung für ein Verkehrsmittel erfolgt in CEMDAP probabilistisch auf Grundlage einer multinomialen logistischen Regression (BHAT et al., 2004; BHAT, 2008).

Die Aktivitäten sowie die damit verbundenen Aktivitätsmuster der Agenten werden dynamisch erzeugt und sind während der Simulation veränderlich. Dazu werden unterschiedliche Klassen von Aktivitäten, wie beispielsweise Arbeit, Schulbesuch, Einkaufen oder Freizeitaktivitäten, unterschieden. Agenten können Aktivitätsmuster daher hinsichtlich der zeitlich flexiblen Aktivitäten verändern oder gänzlich auf derartige Aktivitäten verzichten (BHAT et al., 2004; BHAT, 2008).

Die ursprünglich zur Entwicklung und Evaluation des Systems herangezogene Datengrundlage stammt aus der Metropolregion Dallas-Fort Worth, USA (BHAT, 2008; BHAT et al., 2008). CEMDAP ist darüber hinaus eingesetzt worden, um die Übertragbarkeit bereits bestehender Aktivitätsmodelle in andere Verkehrssysteme und -kontexte zu untersuchen (ZIEMKE et al., 2015).

### 3.3.3 TASHA

TASHA (Travel Activity Scheduler for Household Agents) von MILLER und ROORDA (2003) ist ein Simulator zur Erzeugung von Aktivitäten und Simulation von Verkehrsnachfrage einzelner Agenten auf Haushaltsebene (MILLER et al., 2005; ROORDA und MILLER, 2005). Die ursprüngliche Bedeutung des Akronyms TASHA, Toronto Area Scheduling Model for Household Agents, zeigt den Bezug des Systems zur Greater Toronto Area, Kanada, der Modellregion für die Erprobung des Systems, aus der sich auch die Datengrundlage für das hinterlegte Modell ergibt (MILLER und ROORDA, 2003; MILLER et al., 2005).

Agenten der Simulation sind zu Haushalten zusammengefasst und teilen sich die dem Haushalt zur Verfügung stehenden Ressourcen. Konzeptionell geht in TASHA der Ausführung von einzelnen Trips durch die Agenten eine mehrstufige Planungsphase voraus. Aktivitäten werden mithilfe von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen auf Grundlage der hinterlegten Datengrundlage erzeugt. Anschließend werden sinnvolle Kombinationen von Wohn- und Aktivitätsorten gebildet und Episoden einzelner Aktivitäten plausibel verkettet. Die Entscheidung der Agenten für geeignete Verkehrsmittel erfolgt auf Haushaltsebene, eine optimale Entscheidung bezieht sich daher nicht auf einzelne Agenten, sondern auf ganze Haushalte, gegebenenfalls bestehend aus mehr als nur einem Agenten. Somit kann in TASHA zumindest auf Haushaltsebene Ridesharing-Mobilität durch Mitnehmen von Familienmitgliedern abgebildet und simuliert werden. Die Planung endet mit der Erzeugung der einzelnen Trips zur Ausführung der Tour sowie der damit verbundenen Zuweisung von konkreten Zeiten und Verkehrsmitteln (ROORDA und MILLER, 2005; ROORDA et al., 2008; MILLER et al., 2015).

Die Entscheidung für eines der unterschiedlichen, für eine beliebige Tour zwischen Aktivitäten zu Verfügung stehenden Verkehrsmittel erfolgt nutzenbasiert. Für jede Tour und gegebenenfalls dazugehörige Subtouren werden die verfügbaren Handlungsoptionen einzeln mit einer teilweise zufallsbasierten Nutzenfunktion bewertet und anschließend zu einem Gesamtnutzen hinsichtlich der Tour zusammenfasst (MILLER et al., 2005; MILLER et al., 2015).

Die Übertragbarkeit der mit TASHA umgesetzten Konzepte sowie die Parametrisierung mit anderen Datengrundlagen und -modellen ist ebenfalls möglich. So zeigen beispielsweise YASMIN et al. (2015), wie das ursprünglich für die Greater Toronto Area entwickelte, spatiale

Modell von TASHA mit einem Modell der Insel von Montreal, Kanada, ersetzt werden kann (YASMIN et al., 2015; YASMIN, 2016).

### 3.3.4 MATSim-T

MATSim-T (Multi-Agent Transport Simulation Toolkit) von RANEY (2005) und BALMER (2007) ist ein Simulationsframework zur Erzeugung von Aktivitäten für die einzelnen Agenten des Systems sowie zur zeitlichen Zuordnung und anschließenden Ausführung der Aktivitäten mithilfe von geeigneten Verkehrsmitteln (RANEY und NAGEL, 2006).

Eine Simulation mit MATSim-T beginnt mit der Erzeugung eines sogenannten Szenarios auf Grundlage von Informationen über Verkehrsnetz, Raumnutzung und Bevölkerungsverteilung für das zu modellierende geografische Gebiet. Erzeugt werden ein Modell des Verkehrsnetzes und dazugehörige relevante Punkte, Umfang und Zeitfenster für potenzielle Aktivitäten sowie eine synthetische Agentenbevölkerung. Weiterhin wird eine initiale Nachfrage der Agenten hinsichtlich der Aktivitäten erzeugt. Anschließend wird ein iteratives Relaxationsverfahren eingesetzt, bei dem die Agenten des Systems die variablen Elemente ihres Aktivitätsbedarfs wie beispielsweise Routenwahl, Abfahrtszeiten und Aktivitätsdauern optimieren, bis sich das Verhalten der Agentenbevölkerung als Ganzes einem Wardrop-Gleichgewicht<sup>37</sup> angenähert hat. Weiterhin bietet MATSim-T Hilfsmittel zur statistischen Analyse und Darstellung der Ergebnisse (BALMER et al., 2009; BALMER et al., 2008).

Die Verteilung und Nutzung der von den Agenten der Simulation genutzten Verkehrsmittel basiert in MATSim-T auf dem Modal Split der jeweils genutzten Datengrundlage der zu modellierenden Region. Details der Verkehrsmittelwahl, beispielsweise, ob statt des Autos lieber der öffentliche Verkehr genutzt werden sollte, erfolgen in jeder Iteration erneut, grundsätzliche Entscheidungen zur Verkehrsmittelwahl, beispielsweise, ob die Aktivität motorisierte oder unmotorisierte Verkehrsmittel erfordert, erfolgen nur zu Beginn der Simulation. Weiterhin ist es den Agenten nicht möglich, Verkehrsmittel im Sinne des intermodalen Verkehrs zu kombinieren oder Subtouren innerhalb ihres Tagesablaufs mit anderen Verkehrsmitteln durchzuführen (BALMER, 2007, S. 122 f.).

Als flexibles Simulationsframework wird für MATSim-T die Formalisierung und unkomplizierte Persistierung und Austauschbarkeit der Simulationsszenarien hervorgehoben, das Simulationssystem selbst ist als ereignisorientierte Simulation angelegt (RANEY und NAGEL, 2006, S. 31 f.). Szenarien, bestehend aus Agenten, ihren relevanten Attributen und den von ihnen durchzuführenden Aktivitäten, werden nach der Erzeugung als XML<sup>38</sup>-Dateien persistiert, sodass einzelne Szenarien wiederholbar und gezielt modifizierbar sind (BALMER et al., 2009; RANEY und NAGEL, 2006, S. 32).

Durch seinen Charakter als Simulationsframework findet MATSim-T darüber hinaus Anwendung als Plattform für die Entwicklung und Evaluation verschiedener Erweiterungen für

<sup>37</sup>Hat sich die Auslastung eines Straßennetzes einem Wardrop-Gleichgewicht angenähert, kann kein einzelner Verkehrsteilnehmer mehr auf eine schnellere als die bereits von ihm genutzte Route ausweichen (WARDROP, 1952). Es ist vergleichbar mit dem spieltheoretischen Nash-Gleichgewicht (NASH, 1950; NASH, 1951).

<sup>38</sup>Extensible Markup Language

das Verhalten der Simulationsagenten. Beispielweise sind sowohl Ansätze zur Umsetzung einer BDI-Agentenarchitektur als auch erweiterte, nutzenbasierte Ansätze zur Verkehrsmittelwahl auf Grundlage von MATSim-T erprobt worden (PADGHAM et al., 2014; GREYER et al., 2009).

### 3.3.5 SimMobility

SimMobility, ursprünglich vorgestellt von BASAK et al. (2013), ist ein Simulationsframework zur Integration unterschiedlicher makro- bis mikroskopischer Mobilitäts- und Verkehrsmodelle in einem einheitlichen Gesamtsystem für die Analyse der Abhängigkeiten zwischen Verkehrsnetzwerken, Landnutzung, Verkehrsnachfrage und Kommunikationsinteraktionen der Agenten und ihren Aktivitäten (ADNAN et al., 2016).

SimMobility besteht aus drei lose gekoppelten Simulationskomponenten. Ein langfristiger Simulator dient zur Modellierung und Ausführung von Wohnort- und Arbeitsplatzwahl der Agenten sowie zur Simulation der zu erwartenden Landnutzung. Ein mittelfristiger Simulator zur Tagesplanung umfasst alle Entscheidungen zur Erfüllung der Aktivitäten der Agenten, dies umfasst die Routen- und Verkehrsmittelwahl der Agenten sowie die möglicherweise während der Ausführung des Plans notwendige Umplanung dieser Entscheidungen. Ein kurzfristiger Simulator schließlich dient zur tatsächlichen Ausführung des Verkehrsverhaltens durch Bewegung der einzelnen Agenten und der damit verbundenen Aktionen wie Beschleunigung und Bremsen, Spurwechsel und gegebenenfalls notwendige Kommunikation mit anderen Agenten der Simulation. Die zeitliche Auflösung ist je nach Simulationskomponente unterschiedlich: Langfristige Entscheidungen erfolgen mit einer Auflösung von Tagen bis Jahren, während kurzfristige Verhalten in Sekundenbruchteilen aufgelöst sind (ADNAN et al., 2016).

Die Agenten in SimMobility können je nach Zweck der Simulation zum Beispiel auf Haushalts- oder Unternehmensebene zusammengefasst werden, um beispielsweise Synergien in der Erfüllung von Mobilitätsbedarfen durch Gruppenbildung zu untersuchen. Bei den in SimMobility repräsentierten Verkehrsmitteln handelt es sich sowohl um Optionen des Individualverkehrs wie das Auto als Fahrer oder Beifahrer, Motorräder oder Gehen zu Fuß als auch Angebote des öffentlichen Verkehrs wie Busse und Bahnen. Entscheidungen der Agenten erfolgen auf Grundlage ihrer Wahrnehmungen, so wird beispielsweise eine Taxifahrt dann in Erwägung gezogen, wenn zur Entscheidungszeit ein Taxi zugegen ist (ADNAN et al., 2016; LU et al., 2015). Die Datengrundlage für die Entscheidungen der Agenten hinsichtlich ihrer Verkehrsmittel- und Routenwahl beruht auf Haushaltsumfragen und Reisetagebüchern, die in den individuellen Eigenschaften der Agentenpopulation, wie die Ausprägung unterschiedlicher, sozioökonomischer Attribute oder dem Besitz eines eigenen Autos, aufgeht (LU et al., 2015). Die Routenwahl der Agenten erfolgt probabilistisch auf Grundlage der bereitgestellten Informationen, einige dynamische Verhaltensänderungen, wie beispielsweise spontane Routenänderungen bei auftretendem Stau, sind ebenfalls möglich (LIMA AZEVEDO et al., 2017, S. 16).

Aufgrund der potenziell sehr großen Agentenpopulation ist SimMobility auf technischer Ebene als ereignisorientierte Simulation angelegt, zwischen ihren jeweiligen Ereignissen ist der Zustand der Agenten unveränderlich. Die Wahrnehmungen der Agenten sind durch ein Beobachter-Entwurfsmuster (Englisch: observer pattern) zwischen Umwelt und Agenten umgesetzt (ADNAN et al., 2016). Für Ein- und Ausgaben sowie die von SimMobility genutzten internen und externen Datenquellen werden XML-Dateien verwendet, zur Datenpersistierung weiterhin eine Datenbank (LIMA AZEVEDO et al., 2017, S. 19).

In seiner Funktion als Simulationsframework kann SimMobility flexibel eingesetzt werden. Bisherige Anwendungsgebiete sind unter anderem der Einsatz als Testumgebung zur Potenzialanalyse von autonom agierenden Bring- und Holdienste zur Entlastung des Innenstadtbereichs sowie der Vergleich von Auswirkungen unterschiedlicher Bepreisungsstrategien für die Nutzung des öffentlichen Verkehrs in Singapur (MARCZUK et al., 2015; LIMA AZEVEDO et al., 2016; LOVRIĆ et al., 2016).

### 3.3.6 C-TAP

C-TAP (Continuous Target-based Activity Planning) von MÄRKI (2014) ist ein System zur Verhaltensbestimmung von Agenten hinsichtlich ihrer Aktivitätsmuster in einer Verkehrssimulation, das die Planung von Aktivitäten eines Agenten vollständig dynamisch zur Simulationszeit durchführt (MÄRKI et al., 2014).

Das ursprüngliche Konzept einer rein bedarfsorientierten Verfolgung und Erfüllung von Aktivitäten durch eine Nutzenfunktion ist in C-TAP in einem reglerartigen Ansatz aufgegangen (MÄRKI et al., 2011; MÄRKI et al., 2014). Agenten definieren Zielwerte an Häufigkeit oder Dauer unterschiedlicher Bedarfe und versuchen, diese Ziele möglichst genau zu erreichen. Die Differenz zwischen Ziel- und Ist-Werten bildet die Dringlichkeit der einzelnen Bedarfe ab. Aktivitätsoptionen werden anschließend mithilfe einer Heuristik zur Bestimmung der Effektivität der Bedarfserfüllung bewertet. Wie effektiv eine Aktivität in der Erfüllung unterschiedlicher Bedarfe ist beziehungsweise, ob diese überhaupt durchgeführt werden kann, hängt damit von unterschiedlichen dynamischen Parametern, wie beispielsweise der Öffnungs- und Arbeitszeiten beeinflussenden Simulationszeit oder den die Freizeitaktivitäten bestimmenden Jahreszeiten, ab (MÄRKI et al., 2014, S. 908 f.). Erprobt wurde C-TAP durch die Erzeugung einer Agentenbevölkerung auf Grundlage von Aktivitätstagebüchern 230 realer Probanden aus dem Kanton Thurgau, Schweiz. Das simulative Verhalten der Agenten wurde dazu mit dem realen Verhalten der Probanden hinsichtlich elf unterschiedlicher, typischer Aktivitätsarten sowie 22 verschiedener Zielwerte verglichen (MÄRKI et al., 2014).

Auf technischer Ebene bietet C-TAP keine Möglichkeiten zur Berücksichtigung unterschiedlicher verfügbarer Verkehrsmittel oder Routen bei der Bewertung von Aktivitätsoptionen. Konzeptionell macht MÄRKI (2014) jedoch Vorschläge, wie derartige Aspekte in C-TAP berücksichtigt werden könnten: Die Nutzung unterschiedlicher Verkehrsmittel zur Durchführung einer Aktivität könnten beispielsweise durch die Heuristik berücksichtigt werden, indem die Auswirkungen eines Verkehrsmittels wie Geschwindigkeit oder körperliche

Aktivität entsprechend positiv oder negativ bei der Bewertung einer Aktivität einbezogen werden (MÄRKI, 2014, S. 98).

Das ursprünglich für regelmäßige, häufig lokale Aktivitäten des Alltags entwickelte Konzept von C-TAP wurde darüber hinaus auch für weit entfernte, langfristige Aktivitäten adaptiert. Berücksichtigt wird hier auch der Einfluss unterschiedlicher Verkehrsmittel durch die Einbeziehung der Geschwindigkeit und des Preises pro Kilometer in Verbindung mit der angestrebten Aktivität (JANZEN et al., 2014; JANZEN und AXHAUSEN, 2017; JANZEN und AXHAUSEN, 2018).

### 3.3.7 InnoMind

InnoMind (Innovation Diffusion Through Changing Minds) von WOLF et al. (2015) ist ein System zur Simulation der Auswirkungen von sozialen Normen, subjektiven Gefühlen und sozialpolitischen Einflüssen auf die allgemeine Verkehrsmittelwahl innerhalb der sozialen Netzwerke einer synthetischen Agentenbevölkerung (WOLF et al., 2015).

Eine Simulation mit InnoMind wird mit der Erzeugung der Agentenpopulation initialisiert, indem jeder Agent mit individuellen Meinungsbildern, sozioökonomischen Attributen und seinen Verbindungen zu anderen Agenten erzeugt wird. Der eigentliche Simulationsablauf beginnt mit der Bestimmung des favorisierten Verkehrsmittels für jeden Agenten auf Grundlage ihrer zuvor erzeugten Eigenschaften. Anschließend wählt jeder Agent zufällig einen Agenten innerhalb seines unmittelbaren sozialen Netzwerks aus und tauscht mit diesem rationale und emotionale Informationen zur Verkehrsmittelwahl aus. Wie sehr dieser Austausch das Meinungsbild des Agenten verändert, hängt von der Ähnlichkeit der Meinungsbilder der beiden Agenten ab, ähnlichere Agenten beeinflussen sich stärker. Nach diesem stochastischen Austausch der Agenten untereinander folgt bei Bedarf eine weitere Anpassung der Meinungsbilder durch zusätzliche, auf alle Agenten gleichermaßen wirkende Information aus simulierten Medien oder sozialpolitischen Kampagnen. Dieser Simulationsablauf wird für eine zuvor festgelegte Anzahl an Iterationen durchgeführt (SCHRÖDER und WOLF, 2016, S. 142 f.).

Das Entscheidungsverhalten der Agenten von InnoMind basiert im Kern auf dem HOTCO<sup>39</sup>-Modell von THAGARD (2006). Agenten wählen ihre favorisierten Verkehrsmittel durch Maximierung ihrer einzelnen rationalen und emotionalen Beliefs zu einem möglichst konsonanten, kohärenten Meinungsbild. Umgesetzt ist dieses Meinungsbild eines Agenten in InnoMind als künstliches neuronales Netz. Die Neuronen der Eingabeschicht repräsentieren die objektiven oder subjektiven bei der Verkehrsmittelwahl relevanten Bedürfnisse wie Sicherheit oder Kosten und sind verbunden mit den die Verkehrsmittel repräsentierenden Neuronen der Ausgangsschicht. Um die Konsistenz dieses Meinungsbilds als Ganzes quantifizieren zu können, wird in einem weiteren Neuron die sogenannte Valenz des Netzwerks bestimmt (WOLF et al., 2015; SCHRÖDER und WOLF, 2016, S. 137–139; SCHRÖDER und WOLF, 2018).

---

<sup>39</sup>Hot Cognition

Erprobt wurde InnoMind zur Prognose der Wirksamkeit unterschiedlicher Medienkampagnen hinsichtlich der Verbreitung von Elektroautos in Berlin, Deutschland. Dazu wurden auf Grundlage einer 675 Teilnehmer umfassenden Umfrage vier repräsentative Agentenklassen gebildet. Zunächst wurde das Agentenverhalten in einem Basisszenario ohne Kampagne bestimmt, anschließend wurde die Wirksamkeit dreier unterschiedlicher Medienkampagnen evaluiert (WOLF et al., 2015; SCHRÖDER und WOLF, 2016).

### 3.3.8 TAPAS

TAPAS (Travel-Activity Pattern Simulation) von HEINRICHS et al. (2016) ist ein agentenbasiertes System zur Erzeugung und simulativen Ausführung der Verkehrsnachfrage der Agenten, bestehend aus Orten, Zeiten sowie genutzten Verkehrsmitteln für die jeweiligen Aktivitäten (HEINRICHS et al., 2016; HEINRICHS et al., 2017).

Einer Simulation mit TAPAS geht die Erzeugung der Agentenbevölkerung durch eine separate Komponente zur Populationssynthese voraus. Der eigentliche Simulationsablauf beginnt mit einer ersten Erzeugung plausibler Aktivitätsbedarfe für die Agenten auf Grundlage hinterlegter, empirischer Daten zu den unterschiedlichen Aktivitätsarten einerseits sowie den Attributen der Agenten andererseits. Anschließend werden geeignete Orte zur Erfüllung der Aktivitäten sowie dazu geeignete Verkehrsmittel bestimmt. Die Wahl des Aktivitätsorts und des dazu genutzten Verkehrsmittels beeinflussen sich gegenseitig und werden auf Grundlage von Reisezeiten und -distanzen sowie den für jeweilige Aktivitäten geeigneten Orten bestimmt. Neben den üblichen Verkehrsmitteln des Individualverkehrs und öffentlichen Verkehrs berücksichtigt TAPAS auch zur Verfügung stehende Carsharing-Angebote. Die tatsächliche Durchführbarkeit eines so entstandenen Plans wird abschließend vom jeweiligen Agenten durch Vergleich von finanziellen und zeitlichen Nebenbedingungen bewertet. Ist ein Plan nicht durchführbar, muss der gesamte Prozess neu durchlaufen werden (HEINRICHS et al., 2016, S. 156–158; HEINRICHS et al., 2017, S. 1056–1058).

Das Entscheidungsverhalten der Agenten hinsichtlich ihrer Verkehrsmittelwahl erfolgt probabilistisch auf Grundlage einer multinomialen logistischen Regression aus empirischen Daten. Entscheidungen können sowohl durch lineare als auch durch binäre Abhängigkeiten zwischen Stärke des Entscheidungsfaktors und Verkehrsmittelwahl abgebildet werden. Berücksichtigt werden Faktoren wie beispielsweise verkehrsmittelspezifische Reisezeiten, das Alter des Agenten sowie der Besitz von Monatstickets. Die unterschiedlichen Aktivitätsarten müssen in TAPAS priorisiert werden, sodass wichtige Aktivitäten wie Arbeit oder Schulbesuch vor Freizeitaktivitäten geplant werden können. Dies hat zur Folge, dass die Planung unwichtiger Aktivitäten an die bereits beschlossenen, wichtigeren Aktivitäten angepasst werden muss (HEINRICHS et al., 2017, S. 1057–1059).

TAPAS ist ursprünglich zur simulativen Untersuchung von Carsharing-Nutzung in Berlin, Deutschland, konzipiert und angewendet worden. Die benötigte empirische Datengrundlage zu Bevölkerungsverteilung und Verkehrsmittelwahl ist dazu aus unterschiedlichen soziodemografischen Studien aggregiert worden (HEINRICHS et al., 2016; HEINRICHS et al., 2017). Weitere Anwendung findet das System auch im Rahmen der Untersuchung von Elektromo-

bilität und der damit verbundenen Positionierung von Ladeinfrastruktur sowie der Analyse unterschiedlicher Vergabestrategien von Autos innerhalb einzelner Haushalte (KRAJZEWICZ et al., 2017; BEIGE et al., 2017).

### 3.4 Handlungsbedarf

Für den vierten Schritt der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Methode erfolgt nun die Analyse und Synthese der acht, in Abschnitt 3.3.1 bis 3.3.8 beschriebenen, dem Stand der Technik entsprechenden Simulationssysteme. Diese erfolgt konzeptzentriert, indem die fünf, in Abschnitt 1.3 aufgestellten Ziele der Arbeit herangezogen werden und die Erfüllung dieser Ziele durch die acht Simulationssysteme untersucht wird.

**Erfüllung von Ziel 1: Interdisziplinäre Modellbildung** Zwei der verwandten Arbeiten, ALBATROSS und InnoMind, beschreiben konkret, wie geeignete sozialwissenschaftliche Theorien und Modelle bei der Modellbildung und der Entscheidungsfindung der Simulationsagenten für Mobilitätsangebote herangezogen und konzeptionell fundiert umgesetzt wurden.

ALBATROSS bezieht sich auf die aus der Verhaltensökonomie bekannten Prinzipien der heuristischen Entscheidung und setzt dieses Konzept für das Entscheidungsverhalten der Agenten durch Nebenbedingungen und Klassenbildung in Entscheidungsbäumen und Entscheidungstabellen um. Solange die entscheidungsrelevanten Nebenbedingungen grundsätzlich erfüllt sind, werden die Anspruchsniveaus hinsichtlich der weiteren Entscheidungsparameter in Klassen zusammengefasst, die binär entweder erreicht werden oder nicht (ARENTZE und TIMMERMANS, 2004, S. 613; ARENTZE und TIMMERMANS, 2000, S. 108 f.).

Das Entscheidungsverhalten der Agenten in InnoMind basiert auf dem HOTCO-Modell von THAGARD (2006), einer technischen Umsetzung zur Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung sozialpsychologisch relevanter Einflüsse wie subjektiver Einstellungen und Gefühlen, das bei einer Entscheidung auch die Integrität beziehungsweise Kohärenz der Handlungsoption hinsichtlich des Weltbildes des Entscheiders berücksichtigt. Diese Kohärenz wird in InnoMind als Valenz bezeichnet und bei der Entscheidungsfindung separat bestimmt (SCHRÖDER und WOLF, 2016, S. 137–139).

Teilweise erfüllt ist das Ziel der interdisziplinären Modellbildung weiterhin durch C-TAP, dessen Fokus jedoch weniger auf der Entscheidung für einzelne Mobilitätsangebote liegt, sondern auf der Erzeugung alternativer Aktivitäten für die Simulationsagenten. Zwar werden in diesem Fall keine konkreten sozialwissenschaftlichen Theorien oder Modelle benannt, die als konzeptionelle Grundlage für die Erzeugung der Aktivitäten genutzt werden, jedoch wird in C-TAP ein möglichst naturanaloger Mechanismus zur Entscheidungsfindung für die Agenten angestrebt. Kern der Umsetzung ist die Modellierung der Dringlichkeit unterschiedlicher Aktivitäten, die sich

daraus ergibt, seit wann eine Aktivität bereits nicht mehr durchgeführt wurde, für wie effektiv eine Durchführung der Aktivität zum aktuellen Zeitpunkt zur Bedarfsbefriedigung eingeschätzt wird und wann die Aktivität in der Zukunft ansonsten frühestens wieder durchgeführt werden kann (MÄRKI et al., 2014, S. 905).

Die restlichen fünf Arbeiten, CEMDAP, TASHA, MATSim-T, SimMobility und TAPAS, beschreiben keine konkreten, sozialwissenschaftlichen Theorien oder Modelle, die als Grundlage für das umgesetzte Entscheidungsverhalten der Simulationsagenten herangezogen wurden.

**Erfüllung von Ziel 2: Dynamische Mobilitätsangebote** Vier der verwandten Arbeiten, CEMDAP, TASHA, SimMobility und TAPAS, ermöglichen die Modellierung von dynamisch verfügbaren und begrenzten Mobilitätsangeboten wie Ride- oder Carsharing verschiedener Art sowie von Taxifahrten.

Sowohl CEMDAP als auch TASHA bieten Ridesharing beziehungsweise Mitfahrgelegenheiten zwischen den innerhalb eines Haushaltes zusammengefassten Agenten an (BHAT, 2008; ROORDA und MILLER, 2005). Für beide Arbeiten gilt jedoch, dass potenzielle Koordinationsprobleme zwischen den Agenten bereits durch eine wesentliche Modelleinschränkung reduziert werden: Alle Agenten streben eine für ihre jeweiligen Haushalte bestmögliche Gesamtlösung aller bestehenden Mobilitätsbedarfe an. Die damit sehr begrenzte Menge aller möglichen Fahrer- und Mitfahrerkombinationen und ihrer jeweiligen Aktivitäten innerhalb der einzelnen Haushalte kann dementsprechend systematisch evaluiert werden und eine möglichst optimale Entscheidung hinsichtlich der Allokation von begrenzt verfügbaren Ressourcen wie zum Beispiel Autos getroffen werden. Alle Möglichkeiten hinsichtlich der potenziellen Verfügbarkeit von Mobilitätsangeboten auf Grundlage von Ridesharing können daher bereits in der Planung vollständig und abschließend untersucht werden.

SimMobility berücksichtigt demgegenüber dynamisch verfügbare Mobilitätsangebote wie Taxifahrten (ADNAN et al., 2016; MARCZUK et al., 2015). Eine Taxifahrt kann dann von den Simulationsagenten als mögliches Mobilitätsangebot in Erwägung gezogen werden, wenn ein Taxi in Sichtweite des Agenten ist, eine gezielte, vorherige Buchung eines Taxis zu einem vereinbarten Abholort ist jedoch nicht vorgesehen. Taxifahrten repräsentieren damit spontan verfügbare Mobilitätsangebote in der unmittelbaren Umgebung eines Agenten. Zur Abbildung der Taxirouten wird eine Datenbasis auf Grundlage von GPS-Tracks eingesetzt.

Wesentliches Merkmal von TAPAS ist die Abbildung stationsunabhängiger Carsharing-Angebote zur Nutzung durch die Simulationsagenten (HEINRICHS et al., 2017). In diesem Fall ist die Wechselwirkung mit der Umwelt der Agenten deutlich, da Carsharing-Fahrzeuge nicht unbegrenzt verfügbar sind, sondern durch Agenten belegt werden können und somit anderen Agenten während der Dauer der Nutzung nicht zur Verfügung stehen. Ebenso gilt jedoch, dass das Bewegen von Carsharing-Fahrzeugen auch anderen Agenten den Zugang zu Carsharing ermöglichen kann, wenn die Fahr-

zeuge an neuen Orten abgestellt werden. Somit besteht ein zur Laufzeit der Simulation dynamischer Zusammenhang zwischen den Verhalten der einzelnen Agenten.

Die restlichen vier Arbeiten, ALBATROSS, MATSim-T, C-TAP und InnoMind, berücksichtigen die Kontextabhängigkeit der verfügbaren Mobilitätsangebote nicht maßgeblich. Es muss zwar bemerkt werden, dass ALBATROSS grundsätzlich Mitfahren als Verkehrsmittel benennt, es wird allerdings nicht spezifiziert, wie und zwischen welchen Agenten dies stattfindet oder ob es sich dabei lediglich um eine statistisch bekannte Größe handelt.

**Erfüllung von Ziel 3: Subjektive Einstellungen** Nur zwei der hier betrachteten verwandten Arbeiten, ALBATROSS und InnoMind, thematisieren und berücksichtigen explizit die Rolle individueller und subjektiver Einstellungen der Simulationsagenten bei ihrer Entscheidungsfindung für das bestmögliche Mobilitätsangebot.

In ALBATROSS werden unscharfe und schwer quantifizierbare Einflussfaktoren wie Bekanntheit, Motivation, Erfahrung und Einstellungen unter dem Begriff der kognitiven Umwelt bei der Entscheidungsfindung der Agenten berücksichtigt (ARENTZE et al., 2000, S. 137 f.). Allerdings müssen auch diese unscharfen Faktoren analog zu den restlichen Entscheidungsfaktoren parametrisiert werden können, um anschließend mit der regelbasierten Inferenz auf Entscheidungsbäumen zur Entscheidungsfindung der Agenten herangezogen werden zu können (ARENTZE und TIMMERMANS, 2000, S. 108 f.).

Im Rahmen von InnoMind werden individuelle Einstellungen ebenfalls explizit berücksichtigt. Im Modell vorgesehene Entscheidungsfaktoren sind hier unter anderem das mit einem Mobilitätsangebot assoziierte Sicherheitsgefühl, der Komfort, das Image des Angebots oder die mit dem Angebot einhergehende Unabhängigkeit (SCHRÖDER und WOLF, 2016, S. 137–139). Zur Entscheidungsfindung der Agenten wird die Stärke der negativen oder positiven Faktoren miteinander verrechnet, um zusammen mit der Valenz des künstlichen neuronalen Netzes als Ganzes die Aktivierungsstärke der einzelnen Handlungsoptionen zu bestimmen (WOLF et al., 2015).

Zumindest teilweise erfüllt wird dieses Ziel weiterhin von C-TAP. Zwar liegt der Schwerpunkt von C-TAP deutlich auf der dynamischen Aktivitätserzeugung und nicht auf der Entscheidungsfindung für Mobilitätsangebote, allerdings erlaubt es dessen zielbasiertes Entscheidungssystem, auch subjektive Faktoren wie soziale Normen oder den Bedarf nach sozialen Kontakten zu berücksichtigen (MÄRKI et al., 2014, S. 907–909, 911).

Die restlichen fünf Arbeiten, CEMDAP, TASHA, MATSim-T, SimMobility und TAPAS, berücksichtigen die Rolle individueller, subjektiver Einstellungen nicht maßgeblich.

**Erfüllung von Ziel 4: Reproduzierbare Simulationsexperimente** Nur zwei der verwandten Arbeiten, ALBATROSS und C-TAP, sind so gestaltet, dass auch einzelne Mobi-

litätsentscheidungen der Simulationsagenten nachvollziehbar und unter gleichen Umständen reproduzierbar sind.

In ALBATROSS erfolgen die Entscheidungen der Simulationsagenten deterministisch anhand einer Regelbasis, vollständig abgebildet in Entscheidungstabellen. Die Werte der unterschiedlichen, entscheidungsrelevanten Parameter in einer Entscheidungssituation werden dazu zunächst in genau eine von mehreren Klassen eingeordnet, die diesen Eingabeparameter kategorisieren. Die Entscheidungstabelle verweist dann für jede mögliche Kombination von Eingabewerten auf genau ein Verkehrsmittel, das dementsprechend gewählt wird (ARENZTE und TIMMERMANS, 2000, S. 108 f.). Die Gestaltung der Entscheidungstabellen muss dazu allerdings drei wesentlichen Regeln folgen: Die Entscheidungstabelle muss konsistent allen Eingabewerten nur genau eine Klasse zuweisen, sie muss vollständig sein und damit allen möglichen Eingabewerten eine Klasse zuweisen und sie muss unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten aller Klassen gegenseitig ausschließen, damit die Entscheidung eindeutig auf genau ein Verkehrsmittel fällt.

C-TAP sieht ebenfalls ein deterministisches Entscheidungsverhalten für die Simulationsagenten vor (MÄRKI et al., 2014, S. 912 f.). Die Möglichkeiten zur Erfüllung der Bedürfnisse der Agenten und die damit einhergehenden Mobilitätsbedarfe werden kontinuierlich mit einer Nutzenfunktion bewertet, sodass gleiche Eingaben stets zu gleichem Agenten- und damit auch Simulationsverhalten führen (MÄRKI et al., 2014, S. 907 f.). Zwar wird eine Methode zur Verkehrsmittelwahl der Agenten nur konzeptionell thematisiert, da diese jedoch ebenfalls auf dieses deterministische, nutzenbasierte Entscheidungsverhalten zurückgreift, kann das Entscheidungsverhalten einzelner Agenten reproduzierbar umgesetzt werden. Dazu müssen lediglich die verfügbaren Mobilitätsangebote sowie ihre kontextabhängigen und individuellen Vor- und Nachteile mit den zu verfolgenden Aktivitäten assoziiert werden, sodass die Nutzenfunktion nicht nur bestimmt, welchen Aktivitäten nachgegangen werden soll, sondern gleichzeitig auch, wie diese idealerweise erreicht werden sollen (MÄRKI, 2014, S. 98).

Die restlichen sechs Arbeiten, CEMDAP, TASHA, MATSim-T, SimMobility, InnoMind und TAPAS, nutzen überwiegend probabilistische Verfahren und Wahrscheinlichkeitsverteilungen auf Grundlage multinomialer logistischer Regressionen für das Entscheidungsverhalten der Simulationsagenten, sodass das Ergebnis einzelner Mobilitätsentscheidungen nicht ohne Weiteres nachträglich erklärt und nachvollzogen werden kann. Weiterhin wird der Erkenntnisgewinn beeinträchtigt, wenn die Verkehrsmittelentscheidungen der Agenten, wie im Fall von MATSim-T, zum Teil auf dem makroskopisch gemessenen, realen Modal Split der modellierten Region basieren, denn somit wird das Simulationsverhalten nicht nur durch Eingaben, sondern auch durch die gewünschten, bereits vor der Simulation bekannten Ausgaben beeinflusst.

**Erfüllung von Ziel 5: Flexibles Simulationssystem** Nur zwei der verwandten Arbeiten, MATSim-T und SimMobility, stellen die Flexibilität und Austauschbarkeit einzelner

Simulationskomponenten als einen zentralen Mehrwert heraus. Im Gegensatz zu den restlichen hier betrachteten Arbeiten beschreiben sich MATSim-T und SimMobility explizit als ereignisorientierte Simulationsframeworks (RANEY und NAGEL, 2006, S. 31 f.; ADNAN et al., 2016). Darüber hinaus steht für MATSim-T Software und Dokumentation frei zum Download<sup>40</sup> für potenzielle Nutzer zur Verfügung.

Für MATSim-T existieren detaillierte Beschreibungen und exemplarische Darstellungen, wie unterschiedliche Simulationsszenarien persistiert und für Simulationsläufe geladen werden können. Im Rahmen von MATSim-T wird dazu konsequent als Datei- und Austauschformat genutzt. Definiert werden darin unter Zuweisung individueller Identifikatoren, zum Beispiel die Agenten der Simulation und ihre relevanten Attribute, Koordinaten für Aktivitäten der Agenten sowie Mobilitätsverhalten anhand von Routen- und Verkehrsmittelwahl und Reisezeiten (RANEY und NAGEL, 2006, S. 32; BALMER, 2007, S. 139–141; BALMER et al., 2009, S. 59 f.). Auch die zeitliche Ausführung der Agenten innerhalb der Simulation wird exemplarisch dargestellt (RANEY und NAGEL, 2006, S. 26 f.).

SimMobility bietet ebenfalls Schnittstellen für XML-Dateien zur Ein- und Ausgabe von Szenariodaten. Alternativ können darüber hinaus jedoch auch CSV<sup>41</sup>-Dateien als Austauschformat genutzt oder das Laden und Persistieren der Ein- und Ausgabedaten über eine Datenbank ermöglicht werden (LIMA AZEVEDO et al., 2017, S. 19). Zusammen mit der losen Kopplung der Simulationskomponenten von SimMobility ermöglichen diese flexiblen Datei- und Austauschoptionen eine gute Anpassbarkeit der einzelnen Teilsysteme. Darüber hinaus werden weitere technische Maßnahmen, wie das für die Wahrnehmungen der Agenten verwendete Beobachter-Entwurfsmuster, beschrieben, um die Performance des Simulationssystems zu optimieren (ADNAN et al., 2016).

Teilweise adressiert wird das Thema der Flexibilität und Austauschbarkeit weiterhin durch einige praktische Anwendungsbeispiele von ALBATROSS, CEMDAP, TASHA, C-TAP und TAPAS. Unterschiedliche Anwendungsbeispiele signalisieren implizit, dass der teilweise oder vollständige Austausch von Simulationsszenarien prinzipiell möglich ist, es bleibt allerdings unklar, wie das dazu genutzte Datenmodell gestaltet ist und inwieweit auch das ausführende Simulationssystem selbst verändert und gegebenenfalls neu kompiliert werden muss.

Nicht maßgeblich berücksichtigt werden die Flexibilität und Übertragbarkeit des entstandenen Systems von InnoMind.

Die Ergebnisse dieser Literaturanalyse und -synthese hinsichtlich der Ziele dieser Arbeit sind in Tabelle 3.1 in einer Konzeptmatrix nach WEBSTER und WATSON (2002) abschließend zusammengefasst (WEBSTER und WATSON, 2002, S. xvi).

<sup>40</sup><https://www.matsim.org> (letzter Abruf: 27. 02. 2022).

<sup>41</sup>Comma-Separated Values

**Tabelle 3.1:** Zusammenfassende Konzeptmatrix der Erfüllung der Ziele dieser Arbeit durch den Stand der Technik. Die Zielerfüllung ist dargestellt in drei Abstufungen: erfüllt ( $\checkmark$ ), teilweise erfüllt ( $\sim$ ) oder nicht erfüllt ( $\times$ ).

	Ziel 1	Ziel 2	Ziel 3	Ziel 4	Ziel 5
ALBATROSS	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\sim$
CEMDAP	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\sim$
TASHA	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\sim$
MATSim-T	$\times$	$\times$	$\times$	$\times$	$\checkmark$
SimMobility	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\checkmark$
C-TAP	$\sim$	$\times$	$\sim$	$\checkmark$	$\sim$
InnoMind	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$
TAPAS	$\times$	$\checkmark$	$\times$	$\times$	$\sim$

Für den fünften Schritt der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Methode bleibt festzustellen, dass keines der als Stand der Technik identifizierten Simulationssysteme alle fünf Ziele dieser Arbeit ausreichend erfüllt. Als weitere Forschungsagenda ist daher die Neuentwicklung eines Simulationssystems für Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten erforderlich, um die in Abschnitt 1.1 beschriebene Problemstellung zu lösen.

# Kapitel 4

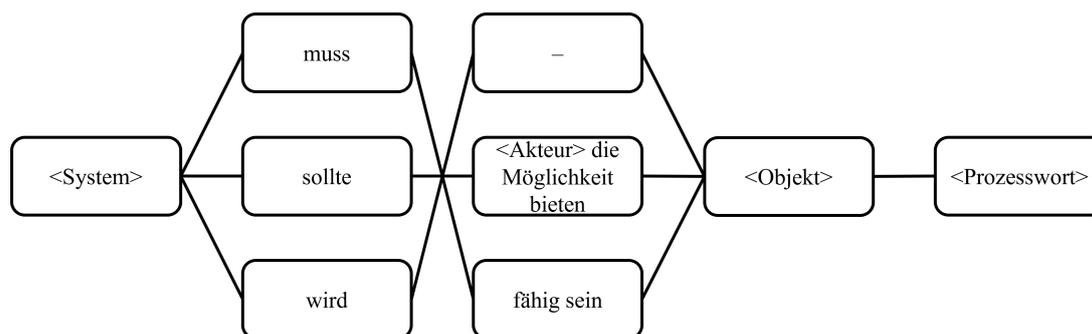
## Anforderungsanalyse

Nachdem in Abschnitt 3.4 festgestellt wurde, dass keines der in Abschnitt 3.3 als Stand der Technik identifizierten Simulationssysteme zur Erfüllung der in Abschnitt 1.3 festgelegten Ziele dieser Arbeit geeignet ist, sind in diesem Kapitel die genauen Anforderungen an die erforderliche Neuentwicklung eines Simulationssystems für Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten zu spezifizieren. Diese Neuentwicklung wird im weiteren Verlauf der Arbeit als das *zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem* bezeichnet. Darüber hinaus werden auch innerhalb der einzelnen Anforderungen gegebenenfalls neue Begriffe und Terminologie festgelegt, die ab der Einführung im weiteren Verlauf der Arbeit konsequent genutzt werden.

Diese Anforderungsanalyse umfasst den ersten Teil der in Abschnitt 1.4 nach BALZERT (2011) beschriebenen Spezifikationsphase im Software-Lebenszyklus und bildet damit die Grundlage für alle folgenden Phasen typischer Softwareentwicklung (BALZERT, 2011, S. 1 f.). In Abschnitt 4.1 werden dazu die Anforderungen an das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem erhoben und mit den Zielen dieser Arbeit verknüpft. Dabei werden Erkenntnisse aus dem in Abschnitt 3.3 identifizierten Stand der Technik, den in Kapitel 2 beschriebenen Grundlagen der involvierten Forschungsdisziplinen sowie zu den Bedürfnissen der in Abschnitt 1.2 genannten Stakeholdern, unter anderem aus dem Kontext des NEMo Projekts, berücksichtigt. Anschließend wird in Abschnitt 4.2 der Zusammenhang zwischen Forschungsfragen, Zielen und Anforderungen dieser Arbeit für das weitere Vorgehen und die spätere Evaluation des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems zusammengefasst.

### 4.1 Anforderungserhebung

Zur Formulierung der funktionalen Anforderungen an das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem wird die Anforderungsschablone für funktionale Anforderungen ohne zusätzliche Bedingung nach RUPP und JOPPICH (2014) genutzt. Diese beschreibt eine einheitliche Struktur, nach der jeder Anforderungssatz formuliert wird (RUPP und JOPPICH, 2014, S. 117–220; PARTSCH, 2010, S. 73). Die Anforderungsschablone ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Begriffe in spitzen Klammern sind Platzhalter und für die jeweilige Anforderung entsprechend auszufüllen.



**Abbildung 4.1:** Anforderungsschablone für funktionale Anforderungen ohne zusätzliche Bedingung (RUPP und JOPPICH, 2014, S. 220). Zwischen der zweiten und dritten Gruppe von Formulierungen sind alle neun Kombinationen zulässig, zur vereinfachten Darstellung sind jedoch nicht alle Verbindungen dargestellt.

In den folgenden drei Abschnitten werden die Anforderungen an das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem spezifiziert. Dazu wird in umgekehrter Reihenfolge zu den vorherigen drei Kapiteln vorgegangen. Zunächst werden Anforderungen aus dem Stand der Technik abgeleitet, anschließend aus den Grundlagen der involvierten Forschungsdisziplinen und zuletzt aus den Bedürfnissen der Stakeholder. Weiterhin werden alle Anforderungen mit den entsprechenden, in Abschnitt 1.3 beschriebenen Zielen der Arbeit verknüpft, um jene dadurch weiter zu konkretisieren.

#### 4.1.1 Anforderungen aus dem Stand der Technik

Die Erhebungsmethode der Anforderungen aus dem Stand der Technik entspricht einer Domänenanalyse (PARTSCH, 2010, S. 40). Dazu werden sowohl allgemeine Erkenntnisse zum Stand der Technik aus Abschnitt 3.3 als auch konkrete Gestaltungsentscheidungen aus den acht in Abschnitt 3.3.1 bis 3.3.8 beschriebenen Simulationssystemen berücksichtigt. Die folgenden drei Anforderungen können aus dem Stand der Technik abgeleitet werden:

##### **A01 Das Mobilitätssimulationssystem muss als agentenbasierte Mikrosimulation umgesetzt werden.**

Die in Kapitel 3 durchgeführte Analyse verwandter Arbeiten zeigt, dass die dem Stand der Technik entsprechenden Simulationssysteme im Gegensatz zu früheren Ansätzen ausschließlich auf agentenbasierten Modellen und Multiagentensystemen basiert. Hinsichtlich Ziel 1 dieser Arbeit ist es sinnvoll, für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem ebenfalls einen agentenbasierten Ansatz zu verfolgen, um die Mikrosimulation einzelner Mobilitätsentscheidungen auf individueller Akteurebene zu ermöglichen (MILLER, 2018). Zur Konzeption des agentenbasierten Modells und Umsetzung als Multiagentensystem kann auf die in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Gestaltungsmöglichkeiten für intelligente Agenten und ihre Umwelt unter Berücksichtigung der in Abschnitt 2.4 dargestellten sozialwissenschaftlichen Theorien und Modelle zu Entscheidungsverhalten und Handeln zurückgegriffen werden. Unabhängig vom gegeb-

nen Hintergrund dieser Arbeit rät auch WOOLDRIDGE (2002) im Allgemeinen dann zu agentenbasierten Ansätzen, wenn eine Zerlegung des zu modellierenden Systems in einzelne, handlungsfähige Entitäten die naheliegende, naturanaloge Darstellung ist (WOOLDRIDGE, 2002, S. 225 f.).

#### **A02 Das Mobilitätssimulationssystem muss als aktivitätsbasiertes Verkehrsmodell umgesetzt werden.**

Die aus Anforderung A01 hervorgehende Agentenbasierung ist sehr gut vereinbar mit der Umsetzung eines in Abschnitt 2.1.3 beschriebenen, aktivitätsbasierten Verkehrsmodells, ein Umstand, der sich auch in der konsequenten Nutzung aktivitätsbasierter Simulationssysteme in dem in Kapitel 3 dargestellten Stand der Technik zeigt. In Kombination mit einem agentenbasierten Mobilitätssimulationssystem ist ein aktivitätsbasiertes Verkehrsmodell daher gut geeignet, um Ziel 1 dieser Arbeit zu adressieren. Ein solches Modell bietet nach SHIFTAN und BEN-AKIVA (2011) im Vergleich zu Alternativen wie tripbasierten Modellen oder idealem Verhaltensrealismus das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis zwischen Erfüllung eines gewünschten Realismusgrads einerseits und der konzeptionellen und technischen Komplexität von Entwicklung und Umsetzung des Modells und der Simulation andererseits (SHIFTAN und BEN-AKIVA, 2011, S. 518 f.).

#### **A03 Das Mobilitätssimulationssystem muss auf einem szenariobasierten Simulationsansatz basieren.**

Die in Kapitel 3 dargestellten, dem Stand der Technik entsprechenden Simulationssysteme verfolgen zur Beschreibung und Ausführung unterschiedlicher Simulationskonfigurationen und -parameter einen szenariobasierten Ansatz. Hinsichtlich der in Ziel 5 dieser Arbeit geforderten Flexibilität des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems erscheinen szenariobasierte Simulationen ebenfalls als geeignetes Mittel. Da die genaue Bedeutung des Begriffs *Szenario* nicht eindeutig ist und daher nicht immer einheitlich genutzt wird, folgt das Verständnis für den Begriff Szenario in dieser Arbeit der Definition von ULBRICH et al. (2015). Ein Szenario bezeichnet damit die zeitliche Entwicklung aller abgebildeten, simulationsrelevanten Elemente anhand von spezifizierten Aktionen und Ereignissen sowie festgelegten Ziele und Werte über einen Simulationsverlauf hinweg (ULBRICH et al., 2015, S. 114). Szenarien sind damit gut geeignet, um unterschiedliche Fragestellungen zu Mobilitätsverhalten effizient untersuchen zu können.

### **4.1.2 Anforderungen aus den Forschungsdisziplinen**

Die Erhebungsmethode der Anforderungen aus den involvierten Forschungsdisziplinen entspricht im Wesentlichen einer Dokumentenanalyse (PARTSCH, 2010, S. 40). Dazu werden Erkenntnisse und domänenspezifische Eigenschaften aus den in Kapitel 2 beschriebenen

Grundlagen berücksichtigt. Die folgenden sechs Anforderungen können aus den Grundlagen zu den involvierten Forschungsdisziplinen abgeleitet werden:

**A04 Die Entscheidungsfindung für eine Mobilitätsoption muss den subjektiven Kontext der Entscheidungssituation einbeziehen können.**

Viele der in Abschnitt 2.4 vorgestellten allgemeinen sozialwissenschaftlichen Theorien und Modelle zu menschlichem Entscheidungsverhalten und Handeln thematisieren explizit oder implizit die Rolle der Umwelt sowie die zu einer Entscheidungssituation wahrgenommenen, ermöglichenden Voraussetzungen für Handlungen beziehungsweise Handlungsalternativen. Um Ziel 3 dieser Arbeit entsprechend zu adressieren, müssen Agenten bei der *Entscheidungsfindung* für ein Verkehrsmittel die konkrete *Situation* berücksichtigen, in der sie sich momentan befinden. Auch hier bezieht sich diese Arbeit bei der Definition des Situationsbegriffs auf ULBRICH et al. (2015) und versteht eine Situation als die von einem Agenten durch einen Vorgang der Informationsauswahl subjektiv wahrgenommene Gesamtheit aller relevanten Bedingungen, Handlungsoptionen und Determinanten (ULBRICH et al., 2015, S. 110). Diese Einzigartigkeit der Entscheidungssituation lässt sich auch auf die darin verfügbaren Handlungsoptionen übertragen, sodass im weiteren Verlauf dieser Arbeit der Begriff *Mobilitätsoption* genutzt wird, um eine einzigartige, zu einem konkreten Zeitpunkt für einen konkreten Agenten verfügbare Handlungsoption bei der Verkehrsmittelwahl zu referenzieren. Stehen einem Agenten mehrere gleiche Verkehrsmittel, zum Beispiel zwei Autos, zur Verfügung, können diese dementsprechend dennoch als zwei unterschiedliche Mobilitätsoptionen unterschieden werden. Zur technischen Ausgestaltung dieser Wechselwirkungen zwischen Agenten und Umwelt kann auf die in Abschnitt 2.3.1.1 beschriebenen Aufgabenumgebungen für intelligente Agenten zurückgegriffen werden.

**A05 Das Simulationsmodell muss individuelle und normative Entscheidungseinflüsse abbilden können.**

Aus dem in Abschnitt 2.1.2.2 beschriebenen domänenspezifischen Mehrebenen-Modell der Mobilitätssozialisation sowie den in Abschnitt 2.4 vorgestellten sozialwissenschaftlichen Theorien und Modellen geht hervor, dass menschliches Entscheidungsverhalten und Handeln sowohl von persönlichen Einstellungen, Erfahrungen und Fähigkeiten individueller Akteure als auch von normativen Regeln innerhalb makrosozialer Strukturen geprägt ist. In Bezug zu Ziel 1 dieser Arbeit gilt es, eine weitestgehend generische, gemeinsame Struktur zur Abbildung derartiger intrinsischer und extrinsischer Einflüsse zur Entscheidung bei der Verkehrsmittelwahl zu entwickeln. Ein solcher Einfluss muss dazu sowohl individuelle Überzeugungen und Prinzipien einzelner Agenten als auch soziale Normen innerhalb unterschiedlicher sozialer Strukturen und Netzwerke abbilden können.

**A06 Das Simulationsmodell muss sowohl Individualverkehr als auch intermodale Verkehrsketten abbilden können.**

Wie in Abschnitt 2.1.1 dargestellt, muss zukünftiger, nachhaltiger Personenverkehr zunehmend durch intermodale Verkehrsketten mit mehreren, gegebenenfalls öffentlichen Verkehrsmitteln zwischen Start und Ziel erfolgen. Zur Erreichung von Ziel 2 dieser Arbeit ist es notwendig, dass unterschiedliche Mobilitätsoptionen des intermodalen Personenverkehrs ebenso wie die des Individualverkehrs abgebildet werden können, damit diese im Rahmen der Entscheidungsfindung bei der Verkehrsmittelwahl durch die Simulationsagenten verglichen werden können.

**A07 Das Simulationsmodell muss sowohl öffentlichen Personenverkehr als auch durch Privatpersonen angebotene Ridesharing-Angebote abbilden können.**

Wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, beinhaltet zukünftiger, nachhaltiger Personenverkehr neben den bereits etablierten Verkehrsmitteln des öffentlichen Personenverkehrs, wie beispielsweise Bus und Bahn, auch die potenzielle Nutzung von durch Privatpersonen in der Rolle eines Prosumers angebotenen Ridesharing-Angeboten. Zur Erfüllung von Ziel 2 dieser Arbeit müssen diese unterschiedlichen Mobilitätsoptionen innerhalb des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems abgebildet und durch die Agenten bei der Verkehrsmittelwahl genutzt werden können.

**A08 Das Simulationsmodell muss zweckgebundene Mobilitätsbedarfe abbilden können.**

In Abschnitt 2.1.2.1 wird die von BARTZ (2015) formulierte Unterscheidung zwischen intrinsisch motivierten Mobilitätsbedürfnissen und zweckgebundenen Mobilitätsbedarfen dargestellt (BARTZ, 2015, S. 33 f.). Für Ziel 2 dieser Arbeit muss daher zunächst überhaupt ein zweckgebundener Mobilitätsbedarf für die Simulationsagenten vorliegen, um die Entscheidungssituation und die damit verbundenen Entscheidungsgründe zu erfordern. Hedonistische Motivation für eine bestimmte Mobilitätsoption kann dabei ein Entscheidungsgrund sein, eine rein auf intrinsische Mobilitätsbedürfnisse ausgerichtete Entscheidungsfindung ist allerdings für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem nicht erforderlich, da in diesem Fall eine Mobilitätsoption selbst unmittelbarer Zweck der Mobilität ist.

**A09 Die Entscheidungsfindung für eine Mobilitätsoption muss deterministisch erfolgen.**

In Abschnitt 2.2 und insbesondere Abschnitt 2.2.1 sowie in Abschnitt 2.3.1.1 wird dargestellt, dass sowohl ein Simulationsmodell als auch die Aufgabenumgebung eines Agenten nach deterministischen oder stochastischen Aspekten gestaltet werden kann. Hinsichtlich Ziel 4 dieser Arbeit erscheint es notwendig, das grundsätzliche Verfahren zur Entscheidungsfindung der Agenten deterministisch zu gestalten, damit gleiche Simulationsszenarien zu gleichen Simulationsergebnissen führen und somit eine Reproduzierbarkeit des Simulationsverhaltens erreicht werden kann. Dieser für

die Entscheidungsfindung geforderte Determinismus ist gut vereinbar mit den in Abschnitt 2.4 vorgestellten sozialwissenschaftlichen Theorien und Modellen. Diese sehen ebenfalls keine probabilistischen Erklärungen für menschliches Entscheidungsverhalten und Handeln vor, denn auch wenn statistische Verteilungen wie der in Abschnitt 2.1.1 beschriebene Modal Split hilfreich sind, um die Auswirkungen einzelner Handlungen makroskopisch zu aggregieren, erfolgen die zugrundeliegenden Handlungen selbst nicht probabilistisch.

### 4.1.3 Anforderungen der Stakeholder

Zur Erhebung der Anforderungen der vier in Abschnitt 1.2 definierten Stakeholder werden deren Nutzungsbedürfnisse zunächst durch einzelne Anwendungsfälle genauer spezifiziert. Diese Anforderungen der Stakeholder wurden unter anderem im Kontext des NEMo Projekts aus regelmäßigen Projekttreffen und dedizierten Workshops in Zusammenarbeit mit den im Projekt tätigen Soziologen und Wirtschaftswissenschaftlern, den Entwicklern des Fahrkreis-Systems sowie dem übrigen Projektkonsortium gesammelt und abgeleitet. Diese unterschiedlichen Personen und Arbeitsgruppen erfüllen damit die Rollen der vier identifizierten Stakeholder. In Abbildung 4.2 ist dazu ein UML<sup>42</sup>-Anwendungsfalldiagramm mit den unmittelbaren Anwendungsfällen aller Stakeholder dargestellt.

Die aus Anforderung A03 hervorgehende Szenariobasierung des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems wird an dieser Stelle bereits genutzt, um Szenarioerstellung und Szenariosimulation inhaltlich zu trennen. Die Definition eines Szenarios erfolgt gemeinsam durch den Anwender und den Entscheidungsträger, dabei wird ein durch den Sozialwissenschaftler bereitgestelltes Modell einbezogen. Anschließend kann das Szenario durch den Anwender ausgeführt werden. Bei der Ausführung wird auf durch den Mobilitätsdienstleister bereitgestellte Mobilitätsoptionen zurückgegriffen, die generierten Simulationsergebnisse werden dem Entscheidungsträger zugänglich gemacht.

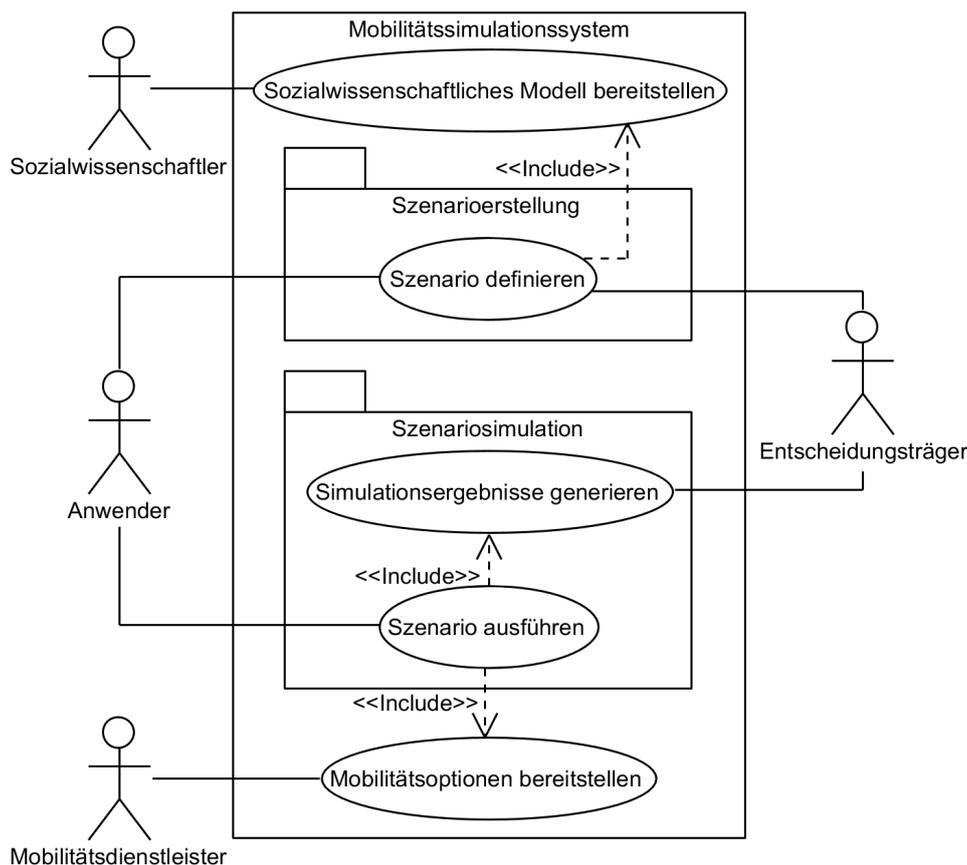
Die so spezifizierten Anwendungsfälle können zur weiteren Anforderungserhebung genutzt werden. Die folgenden sechs Anforderungen können aus den Anwendungsfällen der Stakeholder abgeleitet werden:

#### **A10 Das Mobilitätssimulationssystem muss die Erstellung und Ausführung von einzelnen Simulationsszenarien trennen.**

Aus den in Abbildung 4.2 dargestellten, nicht unmittelbar zusammenhängenden Anwendungsfällen innerhalb der Szenarioerstellung und der Ausführung der Szenarien innerhalb der Szenariosimulation ergibt sich eine logische Trennung von Szenarioerstellung und -ausführung. Diese Trennung adressiert Ziel 5 dieser Arbeit und teilt die Kernfunktionen des Mobilitätssimulationssystems in zwei voneinander unabhängige Komponenten: Zunächst werden die durch das Mobilitätssimulationssystem zu untersuchenden Fragestellungen zu Mobilitätsverhalten in der Szenarioerstellung unter Einbeziehung existierender Entscheidungsmodelle aus den Sozialwissenschaften in

---

<sup>42</sup>Unified Modeling Language



**Abbildung 4.2:** UML-Anwendungsfalldiagramm zur Darstellung der Stakeholder und ihrer Anwendungsfälle innerhalb des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems.

geeigneten Szenarien für eine spätere Ausführung definiert. Anschließend können die Szenarien ohne unmittelbare zeitliche Abhängigkeit in der Szenariosimulation unter Einbeziehung verfügbarer Mobilitätsoptionen ausgeführt und die Simulationsergebnisse generiert werden. Die Szenariosimulation stellt damit die benötigte Umgebung und die erforderlichen Funktionen für die Ausführung unterschiedlicher Simulationsszenarien bereit und muss unabhängig von einzelnen, konkreten Szenarien sein.

**A11 Das Mobilitätssimulationssystem muss Schnittstellen für die durch die Stakeholder bereitgestellten und benötigten Inhalte und Funktionen definieren.**

Abbildung 4.2 zeigt die Stakeholder, die mit dem zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem interagieren und dabei Inhalte für das System bereitstellen und Funktionen davon in Anspruch nehmen. Hinsichtlich der in Ziel 5 dieser Arbeit geforderten Flexibilität des Mobilitätssimulationssystems müssen insbesondere diese *Schnittstellen* so gestaltet sein, dass Erstellung und Ausführung unterschiedlicher Simulationsszenarien durch die dabei involvierten Stakeholder zielführend möglich sind. Konkret umfasst dies die Definition eines Simulationsszenarios durch einen Anwender und einen Entscheidungsträger unter Bereitstellung eines sozialwissenschaftlichen Modells durch einen Sozialwissenschaftler, die Ausführung eines Szenarios durch einen Anwender, der

Abruf der dabei in Anspruch genommenen, von einem Mobilitätsdienstleister bereitgestellten Mobilitätsoptionen sowie die Ausgabe der Simulationsergebnisse an einen Entscheidungsträger.

**A12 Die Entscheidungsfindung muss auf einem geeigneten generischen Inferenzmodell zur Abbildung unterschiedlicher sozialwissenschaftlicher Modelle basieren.**

Aus dem in Abbildung 4.2 dargestellten Anwendungsfall zur Definition eines Szenarios geht hervor, dass dazu die Bereitstellung eines sozialwissenschaftlichen Modells zur Erklärung von Mobilitätsverhalten durch einen Sozialwissenschaftler erforderlich ist. Um Ziel 3 dieser Arbeit zu adressieren, ist es notwendig, ein generisches *Inferenzmodell* für unterschiedliche Entscheidungsgründe aus unterschiedlichen, sowohl qualitativen als auch quantitativen, sozialwissenschaftlichen Modellen zu definieren, das in der Szenarioerstellung genutzt werden kann, um die Berechnung der Entscheidung für eine Mobilitätsoption in der Szenariosimulation zu gestatten. Zur Entwicklung dieses generischen Inferenzmodells können die in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Verfahren der Computational Intelligence herangezogen werden.

**A13 Die Entscheidungsfindung für eine Mobilitätsoption muss gemäß eines Discrete Choice-Entscheidungsproblems gestaltet sein.**

In Abbildung 4.2 ist dargestellt, dass die bei der Ausführung eines Szenarios benötigten Mobilitätsoptionen von Mobilitätsdienstleistern bereitgestellt werden, damit Simulationsagenten ihre im auszuführenden Szenario definierten Aktivitäten erreichen können. Um die Entscheidungsfindung für eine Mobilitätsoption der Agenten für Ziel 4 dieser Arbeit in ihrem Entscheidungskontext reproduzierbar zu gestalten, ist es notwendig, dass die Entscheidungssituation sowie die wahrgenommenen Handlungsmöglichkeiten für die jeweiligen Agenten gemäß eines *Discrete Choice-Entscheidungsproblems* (Deutsch: Diskretes Entscheidungsproblem) gestaltet sind. Für eine Discrete Choice-Entscheidung gilt, dass die Menge aller Handlungsoptionen endlich und vollständig sein muss und dass sich die Handlungsoptionen gegenseitig ausschließen, sodass genau eine Handlungsoption gewählt werden muss (TRAIN, 2003, S. 15). Insbesondere zur Modellierung und Simulation von Mobilitäts- und Verkehrsentscheidungen wird häufig auf Discrete Choice-Modelle zurückgegriffen (TRAIN, 2003, S. 1; TRAIN, 1978; TRAIN und WINSTON, 2007). Für die Entscheidungsfindung bedeutet dies, dass zunächst stets die vollständige Menge der bereitgestellten Mobilitätsoptionen einbezogen wird. Die Entscheidung für eine Mobilitätsoptionen erfolgt anschließend auf Grundlage des bereitgestellten sozialwissenschaftlichen Modells.

**A14 Das Mobilitätssimulationssystem muss in Verhalten und Ergebnissen beobachtbar und analysierbar sein.**

Aus der Darstellung in Abbildung 4.2 geht hervor, dass die bei der Ausführung eines Szenarios generierten Ergebnisse für Entscheidungsträger verfügbar gemacht werden müssen. Für Ziel 4 dieser Arbeit ergibt sich daraus, dass unterschiedliche Si-

mulationsszenarien reproduzierbar wiederholt, systematisch erprobt und untersucht werden können müssen, damit die Auswirkungen von technischen und gesellschaftlichen Gestaltungsalternativen verstanden und verglichen werden können. Verhalten und Ergebnisse des Mobilitätssimulationssystems müssen daher den von BRINKMANN (2018) formulierten Anforderungen zur *Beobachtbarkeit* einer Testumgebung genügen, um plausibel für die Gestaltungsmöglichkeiten zukünftigen, nachhaltigen Personenverkehrs herangezogen werden zu können (BRINKMANN, 2018, S. 38–40). Wie darüber hinaus bereits in Abschnitt 2.2.2 dargestellt, dient eine Simulation keinem Selbstzweck, sondern Simulationsverlauf und -ergebnisse sollen herangezogen werden können, um zu untersuchende Fragestellungen zu beantworten (BUNGARTZ et al., 2013, S. 3).

#### **A15 Das Mobilitätssimulationssystem muss robust gegenüber unterschiedlichen Mobilitätsoptionen und bereitgestellten sozialwissenschaftlichen Modellen sein.**

Die Darstellung in Abbildung 4.2 zeigt, dass sozialwissenschaftliche Modelle und Mobilitätsoptionen jeweils durch vom Mobilitätssimulationssystem unabhängige Sozialwissenschaftler respektive Mobilitätsdienstleister bereitgestellt werden. Zur Erfüllung von Ziel 5 dieser Arbeit muss das Mobilitätssimulationssystem in der Lage sein, robust mit sozialwissenschaftlichen Modellen und Mobilitätsoptionen umzugehen, die den Funktionsumfang der durch das Mobilitätssimulationssystem bereitgestellten Umgebung und Funktionen übersteigen. Die verfügbaren Mobilitätsoptionen können potenziell weniger oder andere Informationen zur Verfügung stellen, als durch das sozialwissenschaftliche Modell erforderlich sind. Das Mobilitätssimulationssystem muss diese Informationsunterschiede bei der Ausführung eines Szenarios in geeigneter Form ausgleichen.

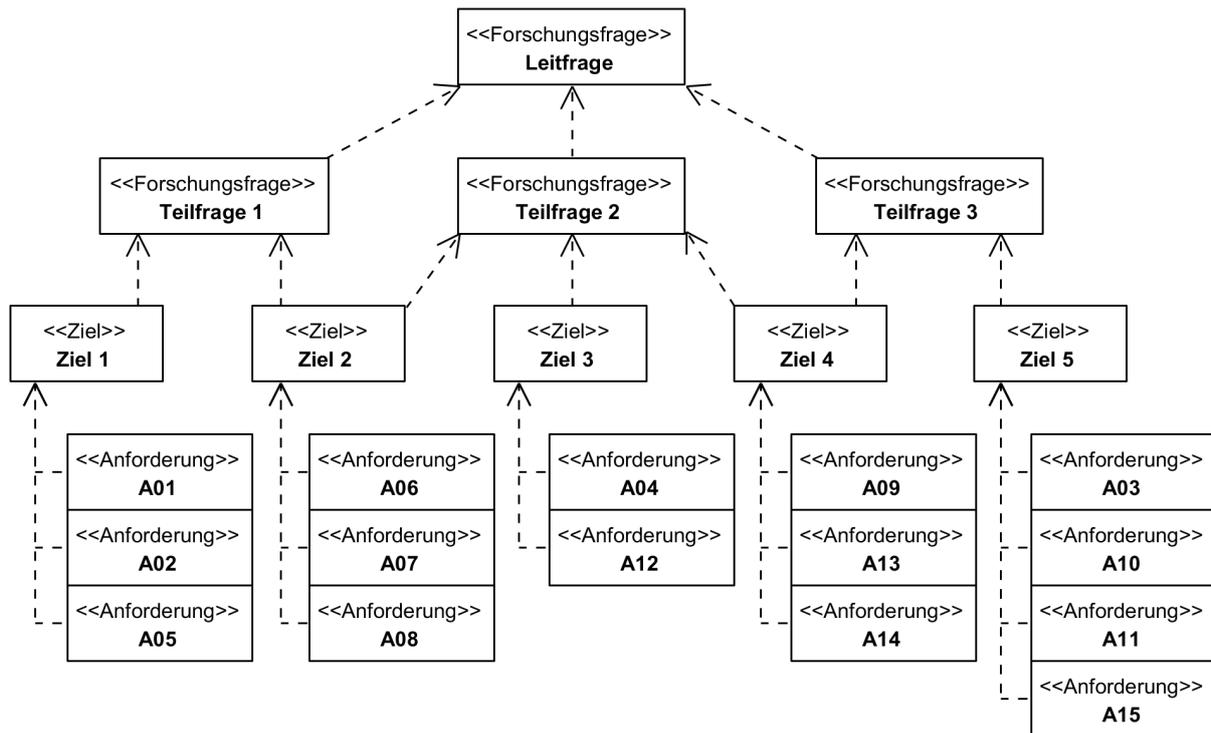
## **4.2 Erfüllbarkeit von Zielen und Forschungsfragen**

Die in den Abschnitten 4.1.1 bis 4.1.3 erhobenen Anforderungen an das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem entsprechen den kleinsten einzeln überprüfbaren Einheiten, deren Erfüllung im Rahmen einer späteren Evaluation untersucht werden kann. In Abbildung 4.3 ist daher zusammenfassend der Zusammenhang zwischen den in Abschnitt 1.2 identifizierten Forschungsfragen, den in Abschnitt 1.3 formulierten Zielen der Arbeit sowie den in diesem Kapitel erhobenen Anforderungen in einem SysML<sup>43</sup>-Anforderungsdiagramm grafisch zusammengefasst.

Durch die konsequent hierarchische Struktur der Forschungsfragen, Ziele und Anforderungen können in einer späteren Evaluation der Anforderungen auch Aussagen über die Erreichung der Ziele sowie über die angemessene Untersuchung der Forschungsfragen ermöglicht werden. Aus der Erfüllung aller zu einem Ziel gehörigen Anforderungen kann die Erreichung dieses Ziels deduziert werden. Mit der Erreichung der Ziele kann im Gegenzug

---

<sup>43</sup>Systems Modeling Language



**Abbildung 4.3:** SysML-Anforderungsdiagramm zur Darstellung der hierarchischen Abhängigkeiten zwischen Forschungsfragen, Zielen und Anforderungen des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems. Alle Abhängigkeiten sind als Konkretisierungen der übergeordneten Elemente zu verstehen.

die erfolgreiche Untersuchung aller drei Teilfragen dieser Arbeit begründet werden, die sich aus der Leitfrage ergeben.

# Kapitel 5

## Konzeptentwicklung

Auf Grundlage der in Kapitel 4 durchgeführten Anforderungsanalyse wird in diesem Kapitel ein allgemeines Konzept für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem bestimmt. Vor dem Hintergrund der Entwicklung dieses allgemeinen Konzepts adressiert dieses Kapitel insbesondere Teilfrage 1 und Teilfrage 2 dieser Arbeit. Das Kapitel bildet damit den zweiten Teil der in Abschnitt 1.4 beschriebenen Spezifikationsphase im Software-Lebenszyklus nach BALZERT (2011), den ersten Teil bildet das vorherige Kapitel zur Anforderungsanalyse (BALZERT, 2011, S. 1 f.). Weiterhin adressiert dieses Kapitel damit den als Modellierung bezeichneten ersten Schritt der in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen und in Abbildung 2.3 dargestellten Simulationspipeline nach BUNGARTZ et al. (2013).

Die besondere Herausforderung bei der Konzeptentwicklung liegt in der Verbindung von zwei der vier in Abschnitt 2.3 beschriebenen grundsätzlichen Sichten auf künstliche Intelligenz. Einerseits muss das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem im Sinne der in Anforderung A01 geforderten Agentenbasierung zur Nachbildung von rationalem Handeln in reproduzierbaren Szenarien in der Lage sein, andererseits müssen Simulationsmodell und Entscheidungsfindung insbesondere im Sinne von Anforderung A04 zur Berücksichtigung des subjektiven Kontexts einer Entscheidungssituation sowie von Anforderung A05 zur Abbildung individueller und normativer Entscheidungseinflüsse zur Nachbildung von möglichst menschlichem Denken geeignet sein. Das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem soll sich also nicht nur im beobachtbaren Verhalten der Simulationsagenten erwartungsgemäß verhalten, sondern auch einen möglichst naturanalogen internen Entscheidungsprozess der Agenten beschreiben.

In Abschnitt 5.1 wird zunächst die strukturelle Modellbildung vorgenommen, die in der Definition einer Agentenarchitektur mündet. Anschließend wird in Abschnitt 5.2 nach der Verortung des vorliegenden Entscheidungsproblems der Simulationsagenten in der Entscheidungstheorie und der Betrachtung alternativer Verfahren der Computational Intelligence ein geeignetes, auf Fuzzyinferenz basierendes, generisches Inferenzmodell zur Entscheidungsfindung ausgearbeitet und durch eine Methode zur Erstellung eines Fuzzyinferenzsystems weiter unterstützt. In Abschnitt 5.3 wird zum Abschluss dieses Kapitels die Struktur ei-

---

Teile von Kapitel 5 Konzeptentwicklung sind im Rahmen dieser Arbeit von DÄHLMANN und SAUER in den Jahren 2018 und 2019 veröffentlicht worden.

nes Simulationsszenarios festgelegt, die den Rahmen für jedes mit dem zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem durchzuführende Simulationsexperiment darstellt.

## 5.1 Modellbildung

Zur Modellbildung und strukturellen Beschreibung des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems ist zunächst der grundsätzliche Umfang des benötigten Simulationsmodells zu definieren. Das Simulationsmodell kann dazu hinsichtlich der in Abschnitt 2.2 vorgestellten Merkmale eines Modells nach STACHOWIAK (1973) eingeordnet werden (STACHOWIAK, 1973, S. 131–133; BUNGARTZ et al., 2013, S. 5).

Das pragmatische Merkmal des zu entwickelnden Modells ergibt sich in dieser Arbeit unmittelbar aus den in Kapitel 1 aufgestellten Forschungsfragen und Zielen beziehungsweise ihrer Konkretisierung durch die Anforderungserhebung in Kapitel 4. Zweck und Nutzen des Mobilitätssimulationssystems soll die Simulation von Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten sein, um sozialwissenschaftliche Primärforschung in diesem Bereich zu unterstützen, indem derartige Modelle und Studienergebnisse zu Mobilitätsverhalten systematisch und reproduzierbar ausgeführt und untersucht werden können.

Das Abbildungsmerkmal ergibt sich für diese Arbeit aus dem pragmatischen Merkmal und ist dementsprechend das tatsächliche Mobilitätsverhalten realer Menschen und Gruppen, das mit dem zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem modelliert und simuliert werden soll. Ursprung des Simulationsmodells ist daher ein natürliches Originalsystem, ebenjenes durch Menschen hervorgebrachte Mobilitätsverhalten, und kein synthetisches Original.

Das Verkürzungsmerkmal hingegen ist im Rahmen dieses Kapitels weiter zu konkretisieren. Dazu wird auf die Inhalte zur Mobilitätsforschung aus Abschnitt 2.1 sowie zu sozialwissenschaftlichen Theorien und Modellen zu menschlichem Entscheidungsverhalten und Handeln aus 2.4 zurückgegriffen, um nicht nur den Umfang, sondern auch die Grenzen des erforderlichen Simulationsmodells eindeutig festzulegen. Anschließend kann mit den in Abschnitt 2.2 und 2.3 dargestellten Gestaltungsalternativen für Simulationssysteme und Systeme künstlicher Intelligenz ein geeignetes Agentenmodell gemäß Anforderung A01 formuliert werden.

### 5.1.1 Aktivitäten als Ursache für Mobilitätsbedarfe und Verkehr

Die fundamentale Ausrichtung des im zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem umzusetzenden Modells muss gemäß Anforderung A02 ein aktivitätsbasiertes Verkehrsmodell sein. Diese Anforderung ist durch den in Abschnitt 3.3 dargestellten Stand der Technik begründet und wird an dieser Stelle weiterhin von den in Abschnitt 2.1.3 eingeführten alternativen Verkehrsmodellen unterschieden.

Die in Abschnitt 2.1.3 vorgestellten Planskizzen und strategischen Planungsmodelle sind als Modellierungsansätze für das beabsichtigte System ungeeignet, da diese nicht sinnvoll für die Abbildung und Simulation von individuellen Mobilitätsentscheidungen bei der Ver-

kehrsmittelwahl eingesetzt werden können, vielmehr dienen Planskizzen und strategische Planungsmodelle zur makroskopischen und aggregierten Abschätzung des zu erwartenden Verkehrsaufkommens innerhalb eines Verkehrssystems. Als Grundlage für diese Abschätzung genügen prinzipiell vorliegende Statistiken über beispielsweise die Anzahl zugelassener Fahrzeuge oder die an täglichen Fahrten im zu modellierenden Verkehrssystem. Fahrten können somit anteilig auf die verfügbaren Routen verteilt werden, um die Auslastung bestehender oder neuer Straßen abzuschätzen.

Um den Umfang des Modells für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem genau zu formulieren, ist es also nötig, die in Abschnitt 2.1.2 eingeführte Unterscheidung zwischen räumlicher Mobilität und Verkehr zu berücksichtigen. Das Modell muss die Verkehrsmittelwahl einzelner Personen beziehungsweise das Verkehrsaufkommen als Ganzes auf Grundlage seiner Ursachen, nicht seiner Ausprägung, abbilden. Ein aktivitätsbasiertes Verkehrsmodell tut genau dies, es ordnet einzelnen Individuen Aktivitäten zu, aus denen sich ihr grundsätzlicher Mobilitätsbedarf ergibt. Erst die Art und Weise der Erfüllung dieser Mobilitätsbedarfe, die individuelle Verkehrsmittelwahl, ergibt den modellierten Verkehr. In einem aktivitätsbasierten Modell ergibt sich das Verkehrsaufkommen also nicht unmittelbar aus dem Modal Split.

Tripbasierte Verkehrsmodelle liegen in ihrem Erklärungsumfang zwischen Planskizzen und strategischen Planungsmodellen einerseits und aktivitätsbasierten Modellen andererseits. Da tripbasierte Modelle für einen bestimmten Zeitpunkt formuliert werden, können einige Annahmen über die Ursachen des modellierten Verkehrs bei der Erstellung des Modells getroffen und berücksichtigt werden. Wenn ein bereits existierendes Verkehrssystem modelliert werden soll, kann dazu der reale Modal Split genutzt werden, sofern dieser gemessen, beobachtet oder anderweitig erfasst werden kann. Kann der reale Modal Split nicht gemessen werden oder handelt es sich bei dem zu modellierenden Verkehrssystem lediglich um ein hypothetisches Modell, so müssen geeignete Annahmen über den zu erwartenden Modal Split getroffen werden. Ein aktivitätsbasiertes Modell beschreibt demgegenüber Eins-zu-Eins-Beziehungen zwischen einzelnen Individuen und ihren Aktivitäten mitsamt jeder einzelnen dazu erforderlichen Hin- und Rückfahrt, sodass Entscheidungen für Verkehrsmittel und Routen für jede Aktivität individuell begründet und einzigartig sind.

Wie bereits in Abschnitt 2.1.3 genannt, werden für komplexere Verkehrs- und Mobilitätssimulationen nahezu ausschließlich tripbasierte oder aktivitätsbasierte Verkehrsmodelle genutzt. Ein weiterer, plausibler Grund für ein aktivitätsbasiertes und gegen ein tripbasiertes Modell ist an dieser Stelle die Tatsache, dass tripbasierte Modelle in aktivitätsbasierte Modelle überführt werden können, aktivitätsbasierte Modelle also prinzipiell abwärtskompatibel sind. So zeigen beispielsweise NEUMANN et al. (2012), dass die für tripbasierte Modelle benötigten, je nach gewünschtem Detailgrad makro- bis mesoskopischen Origin-Destination-Matrizen mit geeigneten Methoden in mikroskopische, aktivitätsbasierte Modelle überführt werden können (NEUMANN et al., 2012). Es bietet sich daher an, für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem einen aktivitätsbasierten Ansatz zu verfolgen, um zunächst

grundsätzlich sowohl aktivitätsbasierte Simulationsmodelle als auch tripbasierte Modelle, wengleich mit gewissem Mehraufwand für die Konvertierung, abbilden zu können.

In Tabelle 5.1 sind die Ausprägungen der vier hier diskutierten Arten von Verkehrsmodellen zusammenfassend dargestellt. Es wird deutlich, dass nur aktivitätsbasierte Modelle sinnvoll eingesetzt werden können, um die individuellen Entscheidungen einzelner Agenten für eine Mobilitätsoption umzusetzen, da nur diese den notwendigen Detailgrad und den gewünschten Kontext gepaart mit einer auf Mobilitätsbedarfen beruhenden Datengrundlage ermöglichen.

**Tabelle 5.1:** Ausprägung von Detailgrad, Kontext und Datengrundlage der vier diskutierten Arten von Verkehrsmodellen.

Verkehrsmodell	Detailgrad	Kontext	Datengrundlage
Planskizzen	makroskopisch	statisch	aggregierte Verkehrsdaten
Strategische Planungsmodelle	makroskopisch	statisch	aggregierte Verkehrsdaten
Tripbasierte Modelle	makro- bis mesoskopisch	statisch für unterschiedliche Zeitpunkte	Modal Split
Aktivitätsbasierte Modelle	mikroskopisch	dynamisch	Mobilitätsbedarfe

### 5.1.2 Modellelemente für das Simulationsmodell

Zusammen mit der in Anforderung A01 geforderten Agentenbasierung für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem bedeutet die Entscheidung für ein aktivitätsbasiertes Modell, dass jeder Simulationsagent mit individuellen Aktivitäten ausgestattet werden muss. Diese Aktivitäten bilden über den Simulationsverlauf hinweg die Grundlage für alle seine Mobilitätsbedarfe. Erst mit einer Entscheidung für eine konkrete verfügbare Mobilitätsoption wird der Mobilitätsbedarf des Agenten in Form von Personenverkehr tatsächlich umgesetzt. Dazu werden in Abschnitt 2.1.1 vier aus Sicht der Verkehrsplanung und Mobilitätsforschung wesentliche objektive Dimensionen, nämlich Zweck, Zugang, Verkehrsmittel und Entfernung, zur Erklärung und Unterteilung von Personenverkehr dargestellt. In Abschnitt 2.1.2.2 werden darüber hinaus die drei für das Mobilitätsverhalten wesentlichen subjektiven Dimensionen des Mehrebenen-Modells der Mobilitätssozialisation nach TULLY und BAIER (2018), nämlich gesellschaftliche, mesosoziale und persönliche Bedingungen, vorgestellt. Diese für das Mobilitätsverhalten relevanten Dimensionen können an dieser Stelle herangezogen werden, um genauer einzugrenzen, wie und wo Mobilitätsoptionen durch die Simulationsagenten bezogen werden können müssen und mit welcher Begründung eine Entscheidung für eine Mobilitätsoption getroffen werden kann. Weiterhin werden die in Abschnitt 2.4 vorgestellten Theorien und Modelle aus unterschiedlichen Bereichen der So-

zialwissenschaften herangezogen, um die zur Entscheidungsfindung der Simulationsagenten benötigten Eigenschaften und Begründungen sozialwissenschaftlich plausibel zu erklären. So kann bereits während der Modellbildung eine Konformität der für den Einsatz im zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem vorgesehenen, mobilitätsspezifischen Agenten mit den allgemeineren sozialwissenschaftlichen Theorien und Modellen gewährleistet werden.

### 5.1.2.1 Modellelemente aus der Verkehrsplanung

Der in Abschnitt 2.1.1 genannte Zweck des mit dem zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem zu simulierenden Mobilitätsverhaltens ergibt sich unmittelbar aus den Aktivitäten der Simulationsagenten. Die Aktivitäten eines Agenten müssen demnach neben Zeit und Ort um zusätzliche Eigenschaften erweitert werden können, die den Zweck der Aktivität genauer beschreiben und damit eine möglichst differenzierte Entscheidung für eine Mobilitätsoption vom Agenten ermöglichen. Eine typische Einschränkung durch den Zweck ist beispielsweise die Notwendigkeit von ausreichendem Stauraum für einen Großeinkauf.

Der in Abschnitt 2.1.1 beschriebene Zugang zum Personenverkehr muss auch im zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem in Individualverkehr und öffentlichen Verkehr unterschieden werden. Mobilitätsoptionen des Individualverkehrs müssen durch die Simulationsagenten in Eigenleistung erzeugt und durchgeführt werden, während die Verfügbarkeit von Mobilitätsoptionen des öffentlichen Verkehrs aus der Umwelt des Agenten bezogen werden. Auch die durch andere Simulationsagenten angebotenen Ridesharing-Angebote werden an dieser Stelle den aus der Umwelt bezogenen Mobilitätsoptionen zugeordnet, da auch deren Verfügbarkeit erst nach Prüfung der Umwelt durch den Agenten erkannt werden kann.

Die Rolle der in Abschnitt 2.1.1 genannten und bei der Durchführung von Personenverkehr genutzten Verkehrsmittel ist in wesentlichem Maße mit dem Zugang assoziiert. Agenten müssen sich bei der Nutzung von Angeboten des öffentlichen Verkehrs nach deren Taktung richten und ihre Trips und Touren so planen, dass sie die gewünschten Verkehrsmittel rechtzeitig erreichen. Demgegenüber ist der Zugang zu Fahrrädern und Autos flexibler. Als typische Vertreter des nicht-motorisierten beziehungsweise motorisierten Individualverkehrs können sie von einzelnen Agenten selbstständig zur Erbringung von Mobilitätsbedarfen eingesetzt werden. Außer bei der Nutzung von Angeboten des intermodalen Personenverkehrs mit wenigstens einem öffentlichen Verkehrsmittel muss in diesen Fällen keinerlei Taktung berücksichtigt werden, der Agent kann Trips und Touren prinzipiell beliebig durchführen. Besitzt ein Agent ein eigenes Fahrrad oder Auto an seinem Wohnort, kann er dieses unmittelbar für geplante Aktivitäten einsetzen, solange es anschließend für zukünftige Aktivitäten zum Wohnort zurück bewegt wird.

Fahrräder und Autos sowie prinzipiell beliebige andere, typischerweise für den Individualverkehr genutzte Fahrzeuge können jedoch auch im Rahmen von Sharing-Angeboten wie Bike- beziehungsweise Carsharing durch dedizierte Mobilitätsdienstleister bereitgestellt werden. Unabhängig davon, ob es sich um stationsgebundene oder stationslose (Englisch: free-floating) Angebote handelt, hat der Agent in diesen Fällen jedoch kein eigenes Fahrzeug, sondern teilt es sich mit anderen Nutzern. Der jeweilige Mobilitätsdienstleister des

Angebots bestimmt dabei über die Art und Weise der Buchung, Nutzung und Rückgabe eines Fahrzeuges. Fahrzeuge oder Stationen können, je nach Dienstleister, beispielsweise bereits vorzeitig über die entsprechende Bike- oder Carsharing-Plattform des Dienstleisters für den gewünschten Zeitpunkt gesucht und gebucht werden oder auch kurzfristig aus der unmittelbaren Umgebung bezogen werden. In allen Fällen benötigen die Agenten des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems einen Zugang zur Bike- oder Carsharing-Plattform des zu nutzenden Mobilitätsdienstleisters, um die verfügbaren Mobilitätsangebote nutzen zu können. Damit ähneln Bike- und Carsharing-Angebote insofern den klassischen Angeboten des öffentlichen Verkehrs, als sie nicht durch Besitz des Fahrzeuges in Eigenleistung erbracht, sondern aus der Umwelt des Agenten bezogen werden. Ob und wann Angebote zur Verfügung stehen, kann dabei nicht maßgeblich von Agenten beeinflusst werden.

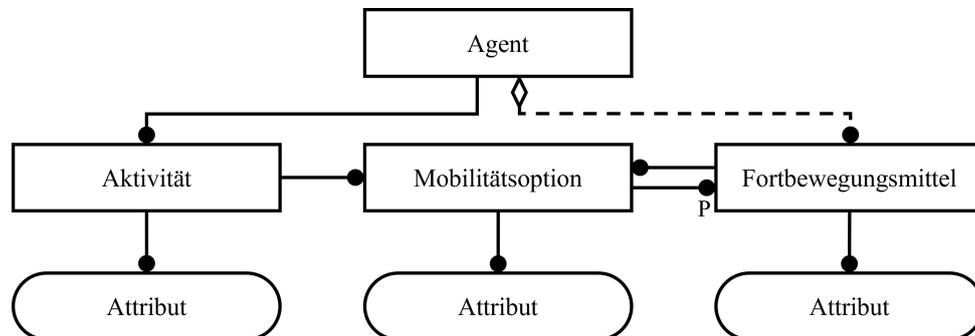
Eine weitere Sonderrolle nehmen prosumerbasierte Peer-to-Peer-Ridesharing-Angebote für die Agenten ein. Derartige Mobilitätsoptionen erscheinen für den anbietenden und den abnehmenden Agenten unterschiedlich. Als Anbieter kommen dazu prinzipiell alle Agenten mit eigenem Auto in Betracht. Für den anbietenden Agenten handelt es sich zunächst um die Entscheidung für die Nutzung des eigenen Autos in Sinne des motorisierten Individualverkehrs, anschließend wird der Trip über eine Ridesharing-Plattform unter Angabe von Informationen wie Start- und Zielort sowie -zeiten ausgeschrieben. Das Angebot abnehmende Agenten können die Mobilitätsoption anschließend über eine Schnittstelle zur Ridesharing-Plattform des entsprechenden Mobilitätsdienstleisters aus ihrer Umwelt beziehen, indem sie für die gesuchten Start- und Zielorte sowie -zeiten die Verfügbarkeit von Ridesharing-Angeboten prüfen. Bei Ridesharing handelt es sich zunächst also um gewöhnlichen motorisierten Individualverkehr für den anbietenden Agenten, der erst bei tatsächlicher Abnahme des Angebots durch einen anderen Agenten an die veränderte Situation angepasst wird. Diese Anpassung beinhaltet unter anderem die Vereinbarung eines Abhol- und Bringortes für den Mitfahrer und die gegebenenfalls notwendige Veränderung von Start- und Zielzeiten. Diese Anpassung kann je nach Mobilitätsdienstleister technisch und automatisiert bei der Buchung auf der Ridesharing-Plattform oder im direkten Dialog zwischen Anbieter und Abnehmer durchgeführt werden.

Das letzte für die Agenten des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems zu berücksichtigende Verkehrsmittel ist das Gehen zu Fuß. Wenngleich Gehen zu Fuß kein Verkehrsmittel im eigentlichen Sinne ist, spielt es dennoch eine wesentliche Rolle als Mobilitätsoption bei der Überwindung sehr kurzer Distanzen sowie als Teil einer intermodalen Verkehrskette. Einem Agenten steht das Gehen zu Fuß damit prinzipiell als weiteres Verkehrsmittel des Individualverkehrs zu Verfügung. Einen Randfall bilden jedoch Gehbehinderungen, die das Gehen zu Fuß beeinträchtigen oder vollständig unmöglich machen. Soll einem Agenten, unabhängig von den Gründen, kein Gehen zu Fuß möglich sein, kann es ihm daher als Verkehrsmittel entzogen werden. Als Ersatz für das Gehen zu Fuß können einem Agenten Hilfsmittel zur selbstständigen Fortbewegung wie Gehhilfen und Rollstühle als Verkehrsmittel zugewiesen werden, der limitierende Faktor ist in diesen Fällen jedoch die Barrierefreiheit der Wege und übrigen genutzten Verkehrsmittel. Für die Modellbildung spielt das Vorhan-

densein einer Gehbehinderung daher nur eine untergeordnete Rolle, die Barrierefreiheit einer Mobilitätsoption ist jedoch gegebenenfalls zu berücksichtigen.

Weiterhin muss gemäß Abschnitt 2.1.1 auch die Entfernung als maßgebliches Kriterium bei der Entscheidung für eine Mobilitätsoption durch einen Agenten berücksichtigt werden. Im zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem muss dazu die Entfernung zwischen Start- und Zielort eines Agenten aus den zur Verfügung stehenden Mobilitätsoptionen bestimmt werden. Jede Entfernung jeder Mobilitätsoption muss dabei durch die Simulationsagenten individuell betrachtet werden, da unterschiedliche Verkehrsmittel und intermodale Verkehrsketten gegebenenfalls unterschiedliche Streckenführung haben können. Insbesondere hinsichtlich intermodaler Verkehrsketten ist es weiterhin notwendig, dass die Gesamtdistanz einer Mobilitätsoption anteilig auf die genutzten Verkehrsmittel aufgeteilt werden kann, damit beispielsweise zu lange Laufwege innerhalb einer Mobilitätsoption erkannt werden können. Insbesondere das oben genannte Gehen zu Fuß spielt hier eine wesentliche Rolle, da es in intermodalen Verkehrsketten für den Umstieg eines Agenten häufig zwingend erforderlich ist. Die Distanz einer Mobilitätsoption muss daher also mit den genutzten Verkehrsmitteln assoziiert werden.

Zusammenfassend ergeben sich damit auf Grundlage von Abschnitt 2.1.1 die in Abbildung 5.1 in Anlehnung an die IDEF1X<sup>44</sup>-Notation als ER<sup>45</sup>-Diagramm dargestellten Zusammenhänge und Kardinalitäten zwischen den als Entitätstypen abgebildeten, relevanten Modellelementen für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem.



**Abbildung 5.1:** An IDEF1X-Notation angelehntes ER-Diagramm der als Entitätstypen abgebildeten Modellelemente aus der Verkehrsplanung.

Ein Agent kann beliebig viele einzelne Aktivitäten verfolgen und beliebig viele konkrete *Fortbewegungsmittel* besitzen. Der Begriff *Fortbewegungsmittel* umfasst in dieser Arbeit die typischen, in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Verkehrsmittel, das Gehen zu Fuß sowie Hilfsmittel wie beispielsweise Rollstühle. Ein *Fortbewegungsmittel* muss sich allerdings nicht zwangsweise im Besitz eines Agenten befinden, beispielsweise wenn es im Rahmen eines Mobilitätsangebots des öffentlichen Verkehrs zum Einsatz kommt. Weiterhin wird im Rahmen dieser Arbeit mit dem Begriff *Fortbewegungsmittel* auch der Zugang zum dahinterstehenden Verkehrsmittels unterschieden, sodass beispielsweise ein Auto im Besitz eines Agenten, ein

<sup>44</sup>Integration Definition for Information Modeling

<sup>45</sup>Entity Relationship

Taxi oder ein durch Carsharing bezogenes Auto unterschiedliche Fortbewegungsmittel sind, obwohl das Verkehrsmittel, ein Auto, das gleiche ist.

Um eine Aktivität zu erreichen, können prinzipiell beliebig viele Mobilitätsoptionen in Frage kommen. Jede Mobilitätsoption bedient sich dazu mindestens eines Fortbewegungsmittels, sie kann allerdings auch aus einer Mobilitätskette mit mehreren Fortbewegungsmitteln bestehen. Weiterhin kann es sich dabei sowohl um eine Option des Individualverkehrs als auch um ein Angebot des öffentlichen Verkehrs oder eines Mobilitätsdienstleisters handeln. Aktivitäten, Fortbewegungsmittel und Mobilitätsoptionen können mit beliebigen *entscheidungsrelevanten Attributen* ausgestattet sein, die beispielsweise Zweck, Ort und Zeit einer Aktivität, das Verkehrsmittel und Höchstgeschwindigkeit eines Fortbewegungsmittels oder die Strecke und Dauer einer Mobilitätsoption abbilden. Der Begriff des entscheidungsrelevanten Attributs umfasst damit beliebige ausschlaggebende Eigenschaften, Merkmale oder Größen. In der Darstellung sind die Attribute von Aktivitäten, Fortbewegungsmitteln und Mobilitätsoptionen als separate Modellelemente dargestellt.

### 5.1.2.2 Modellelemente aus der Mobilitätsforschung

In Abschnitt 2.1.2.2 wurde das Mehrebenen-Modell der Mobilitätssozialisation nach TULLY und BAIER (2018) vorgestellt. Im Gegensatz zu den in Abschnitt 5.1.2.1 herausgearbeiteten und in Abbildung 5.1 zusammengefassten objektiven Dimensionen erklärt die Mobilitätskultur im Allgemeinen und das Mehrebenen-Modell im Speziellen das Mobilitätsverhalten von Personen insbesondere anhand ihrer gesellschaftlichen, mesosozialen und persönlichen Bedingungen.

Agenten des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems müssen mit individuellen entscheidungsrelevanten Attributen ausgestattet werden können, um dementsprechend individuelle, persönliche Bedingungen gemäß dem Mehrebenen-Modell der Mobilitätssozialisation abbilden und damit die Entscheidung für eine Mobilitätsoption beeinflussen zu können. Dies könnten beispielsweise Kapitalausstattung, Alter oder Geschlecht sein, jedoch müssen auch aus den gesellschaftlichen und mesosozialen Dimensionen bezogene, subjektive Faktoren abgebildet werden können. Anzahl und Art der Attribute eines Agenten sind also zunächst prinzipiell beliebig, es kann sich dabei um nominale, ordinale oder kardinale Attribute handeln. Das oben genannte Geschlecht eines Agenten könnte beispielsweise mit einem nominalen Attribut abgebildet werden, während Kapitalausstattung und Alter mit kardinalen Attributen abgebildet werden sollten.

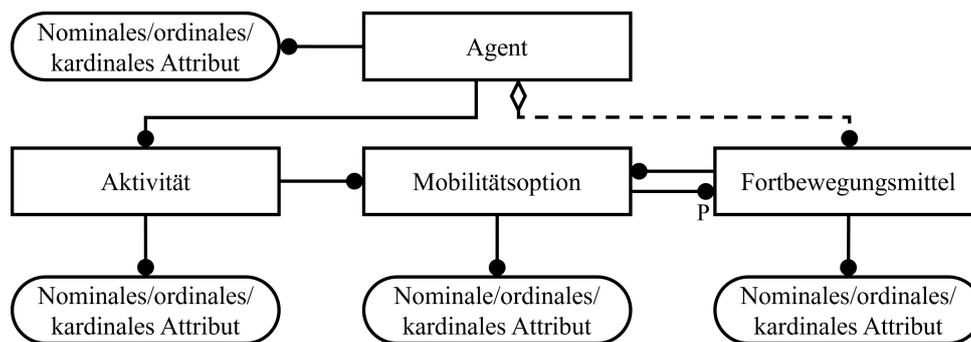
Die in Abschnitt 2.1.2.2 genannten Beispiele aufgreifend, können gesellschaftliche Bedingungen wie die Eigenheiten der geografischen Region oder mesosoziale Bedingungen wie der Bildungsstand der eigenen Familie sinnvoll mit einem ordinalen Attribut abgebildet werden. Die Ländlichkeit des Wohnumfeldes des Agenten oder der Bildungsstand der Familie ließen sich dazu anhand der üblichen Klassifizierungen für Siedlungsgrößen<sup>46</sup> oder schulische beziehungsweise akademische Abschlüsse<sup>47</sup> ordinal darstellen. Insgesamt gestattet dies eine

<sup>46</sup>Z. B. von Landgemeinde bis Großstadt (BBSR, 2017).

<sup>47</sup>Z. B. von keinem Schulabschluss bis Promotion (STBA, 2021, S. 119, 123).

Individualisierung der Agenten des Mobilitätssimulationssystems, um damit die Erzeugung heterogener Agentenbevölkerungen zu ermöglichen.

Die an die IDEF1X-Notation angelehnte Darstellung als ER-Diagramm in Abbildung 5.2 erweitert das in Abbildung 5.1 formulierte Modell damit insbesondere um die agentenindividuellen entscheidungsrelevanten Attribute. Weiterhin wird die Notwendigkeit nominaler, ordinaler und kardinaler Attribute auch auf die bereits bestehenden entscheidungsrelevanten Attribute der Aktivitäten, Fortbewegungsmittel und Mobilitätsoptionen ausgeweitet.



**Abbildung 5.2:** An IDEF1X-Notation angelehntes ER-Diagramm mit Erweiterung des in Abbildung 5.1 dargestellten Modells um die als Entitätstypen abgebildeten Modellelemente aus der Mobilitätsforschung.

Im erweiterten Modell wird das bereits in Abschnitt 5.1.2.1 formulierte Verständnis eines generischen Attributs auf die Agenten des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems ausgedehnt, um damit eine beliebige Anzahl persönlicher, mesosozialer oder gesellschaftlicher Eigenschaften abbilden zu können. In diesem Zusammenhang wird das Prinzip nominaler, ordinaler oder kardinaler Attribute auch auf die bereits in Abbildung 5.1 dargestellten Modellelemente ausgeweitet.

### 5.1.2.3 Modellelemente aus den Sozialwissenschaften

Die in Abschnitt 2.4 vorgestellten Theorien und Modelle zu menschlichem Entscheidungsverhalten und Handeln aus verschiedenen Disziplinen der Sozialwissenschaften sind generische Ansätze, die nicht im dedizierten Zusammenhang mit der Verkehrsmittelwahl stehen. Typischerweise bilden derartige Theorien und Modelle jedoch die Grundlage für die Konzeption, Durchführung und Interpretation sozialwissenschaftlicher Primärforschung, die mit dieser Arbeit simulativ unterstützt werden soll. Aus diesem Grund ist es an dieser Stelle notwendig, diese Theorien und Modelle in die Modellbildung mit einzubeziehen und das in Abschnitt 5.1.2.1 und 5.1.2.2 formulierte Modell für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem um bisher nicht berücksichtigte Eigenschaften zu erweitern.

Im Vergleich zu den bisher thematisierten, für die Simulationsagenten entscheidungsrelevanten Attributen von Aktivitäten, Verkehrsmitteln, Trips und Agenten selbst stellen die in Abschnitt 2.4 vorgestellten Theorien und Modelle aus den Sozialwissenschaften zusätzlich insbesondere die Rolle der in dieser Arbeit als *Entscheidungsgründe* bezeichneten Einflüsse

heraus. Ein Simulationsagent muss demnach mit Entscheidungsgründen ausgestattet werden können, die zur Entscheidungsfindung anhand der Ausprägung eines oder mehrerer Attribute herangezogen werden können.

Die prominenteste Eigenschaft hinsichtlich der Entscheidungsgründe ist die von fast allen Theorien und Modellen thematisierte Unterscheidung zwischen normativen Entscheidungsgründen einerseits und individuellen Entscheidungsgründen beziehungsweise Gründen aus eigener Erfahrung andererseits. Individuelle Gründe müssen demnach für jeden Simulationsagenten im zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem einzeln festgelegt werden können, während normative Gründe kollektiv für alle oder wenigstens eine Teilmenge der Agentenbevölkerung gelten. Deutlich wird diese Unterscheidung im sozialen Kapital, dem Habitus und den sozialen Feldern nach BOURDIEU (1984) (Abschnitt 2.4.1.1), im Prinzip der Dualität der Struktur in der Structuration Theory (Abschnitt 2.4.1.2), im ersten und zweiten Schritt des Makro-Mikro-Makro-Modells (Abschnitt 2.4.1.3), in den persönlichen Determinanten und Umweltdeterminanten in der Social Cognitive Theory (Abschnitt 2.4.2.1), in den verschiedenen Beliefs im Reasoned Action Approach (Abschnitt 2.4.2.2), in den Wegbereitern der Nutzung und indirekt im Task-Technology Fit in der Technology-to-Performance Chain (Abschnitt 2.4.3.1) und in den sieben Einflussgrößen in der Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2 (Abschnitt 2.4.3.3).

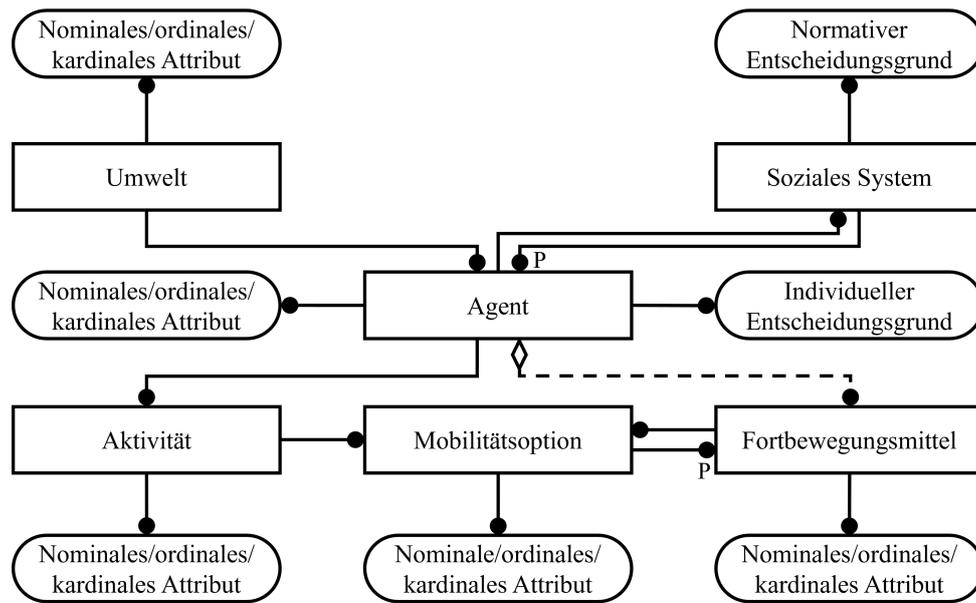
Weiterhin müssen für die Agenten des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems ermöglichende und hemmende Entscheidungsgründe unterschieden werden. Herausgestellt wird dies insbesondere in den Regeln und Ressourcen in der Structuration Theory (Abschnitt 2.4.1.2), in der Selbstwirksamkeitserwartung und der Ergebniserwartung in der Social Cognitive Theory (Abschnitt 2.4.2.1), in den verschiedenen Beliefs im Reasoned Action Approach (Abschnitt 2.4.2.2) und in den sieben Einflussgrößen in der Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2 (Abschnitt 2.4.3.3).

Darüber hinaus müssen im zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem sowohl rationale als auch bei objektiver Betrachtung der Entscheidungssituation irrationale beziehungsweise für einen Dritten unplausible oder unsinnige Entscheidungsgründe von den Agenten zur Entscheidungsfindung herangezogen werden können. Die Irrationalität eines Entscheidungsgrundes stellt sich daher im Rahmen dieser Arbeit so dar, dass das mit dem Entscheidungsgrund verknüpfte, entscheidungsrelevante Attribut nicht typischerweise mit der Verkehrsmittelwahl assoziiert ist und dass ein Simulationsagent widersprüchliche Gründe zur Entscheidung heranziehen können muss. Weiterhin müssen Entscheidungsgründe bei Bedarf so formuliert werden können, dass unterschiedliche Ausprägungen ordinaler oder kardinaler entscheidungsrelevanter Attribute nicht zwangsweise unterschiedlich durch einen Entscheidungsgrund berücksichtigt werden. Die Lazy User Theory (Abschnitt 2.4.3.2) und das Modell des Homo Oeconomicus (Abschnitt 2.4.4.1) bieten in dieser Hinsicht mit den Konzepten von Aufwand beziehungsweise Nutzen eine vorrangig rationale Erklärung für Entscheidung und Verhalten, während die Verhaltensökonomie (Abschnitt 2.4.4.2) insbesondere die Irrationalität und Unvollkommenheit von Entscheidungssituationen aufgreift.

Neben den Entscheidungsgründen wird weiterhin die Rolle sozialer Strukturen sowie anderer Personen in den in Abschnitt 2.4 vorgestellten Theorien und Modellen aus den Sozialwissenschaften besonders detailliert. Diese Annahme ist eng verbunden mit dem Einfluss normativer Entscheidungsgründe, die durch Zugehörigkeit zu beziehungsweise Interaktion mit diesen sozialen Strukturen, Systemen und anderen Personen produziert und reproduziert werden. Das Verhalten eines Einzelnen ist teilweise geprägt durch die normativen Erwartungen und Regeln, die sich aus der Zugehörigkeit zu derartigen makro- oder mesoskopischen, sozialen Strukturen oder Systemen ergeben. Für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem bedeutet dies, dass für Agenten bei Bedarf ebenso eine Zugehörigkeit zu abstrakten sozialen Systemen wie auch eine Beziehung zu einzelnen, anderen Agenten abgebildet werden können muss. Ein *soziales System* repräsentiert in dieser Arbeit eine nicht näher definierte Gruppierung, die ihrerseits bestimmte normative Entscheidungsgründe an das Verhalten der zugehörigen Agenten stellt. Durch eine Beziehung eines Simulationsagenten zu einem einzelnen anderen Agenten müssen weiterhin die Entscheidungsgründe dieser Agenten für den jeweils anderen als normative Entscheidungsgründe zur Entscheidungsfindung herangezogen werden können. Der Einfluss sozialer Systeme und Strukturen auf das Verhalten einzelner wird insbesondere in der Rolle des sozialen Kapitals und der sozialen Felder nach BOURDIEU (1984) (Abschnitt 2.4.1.1), im Prinzip der Dualität der Struktur und den Regeln und Ressourcen in der Structuration Theory (Abschnitt 2.4.1.2), im ersten Schritt des Makro-Mikro-Makro-Modells (Abschnitt 2.4.1.3), aus den stellvertretenden Erfahrungen und der verbalen Überredung sowie den Umweltdeterminanten der Social Cognitive Theory (Abschnitt 2.4.2.1), in den normativen Beliefs im Reasoned Action Approach (Abschnitt 2.4.2.2), in den sozialen Normen in den Wegbereitern der Nutzung in der Technology-to-Performance Chain (Abschnitt 2.4.3.1) und im sozialen Einfluss in der Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2 (Abschnitt 2.4.3.3) deutlich.

Weiterhin wird in Abschnitt 2.4 mehrfach der Einfluss von Eigenschaften der Umwelt einbezogen, die somit ebenfalls den Kontext einer Entscheidungssituation und damit das jeweilige Verhalten einer Person beeinflussen können. Das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem muss demnach eine abstrakte Umwelt bereitstellen, deren Attribute allgemeingültige Rahmenbedingungen und Eigenschaften, wie beispielsweise das vorherrschende Wetter, abbilden können und die für alle Simulationsagenten gleichermaßen gelten. Die Rolle von Eigenschaften der Umwelt in der Beeinflussung von Verhalten wird besonders in den Umweltfaktoren im Reasoned Action Approach (Abschnitt 2.4.2.2), in den Umweltdeterminanten in der Social Cognitive Theory (Abschnitt 2.4.2.1), in den ermöglichenden Voraussetzungen in der Technology-to-Performance Chain (Abschnitt 2.4.3.1) und in der Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2 (Abschnitt 2.4.3.3) deutlich.

Die an die IDEF1X-Notation angelehnte Darstellung als ER-Diagramm in Abbildung 5.3 vervollständigt das in Abbildung 5.1 initial formulierte und in Abbildung 5.2 erweiterte Modell für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem um die relevanten Eigenschaften aus den in Abschnitt 2.4 vorgestellten Theorien und Modellen aus den Sozialwissenschaften.



**Abbildung 5.3:** An IDEF1X-Notation angelehntes ER-Diagramm mit Erweiterung des in Abbildung 5.2 dargestellten Modells um die als Entitätstypen abgebildeten Modellelemente aus den Sozialwissenschaften.

Das vollständige Modell umfasst im Gegensatz zur Darstellung in Abbildung 5.2 zusätzlich genau eine Umwelt, die allgemeingültige nominale, ordinale und kardinale Attribute für alle Agenten bereitstellen kann. Die beliebige Anzahl individueller Entscheidungsgründe eines Simulationsagenten ist direkt mit dem jeweiligen Agenten assoziiert, normative Entscheidungsgründe hingegen sind mit einem sozialen System assoziiert. Über die Zugehörigkeit zu verschiedenen sozialen Systemen kann ein Agent auch auf die normativen Entscheidungsgründe des jeweiligen sozialen Systems zugreifen. Die direkte Beziehung zwischen beliebig vielen Agenten ist einheitlich über soziale Systeme abgebildet. Es handelt sich damit also um einen Hypergraphen<sup>48</sup>, bei dem Agenten als Knoten und soziale Systeme als Kanten verstanden werden können.

### 5.1.3 Agentenmodell

Auf Grundlage der in Abschnitt 5.1.2 herausgearbeiteten und in Abbildung 5.3 festgelegten Modellelemente für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem kann nun das dazu erforderliche Agentenmodell formuliert werden. Ergebnis dieses Abschnitts ist die konzeptionelle Antwort auf die in Abschnitt 1.2 aufgeworfene Teilfrage 1 nach einem geeigneten, sozialwissenschaftlich konformen Architekturmodell für die Simulation von Mobilitätsverhalten.

<sup>48</sup>Ein Hypergraph ist eine graphentheoretische Struktur, dessen Kanten mehr als zwei Knoten gleichzeitig verbinden können (BRETTI, 2013, S. 1 f.).

### 5.1.3.1 Definition der Agentenfunktion und -umgebung

Vor dem konkreten Anwendungshintergrund des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems muss zunächst die abstrakte Agentenfunktion genauer spezifiziert werden. Um diese einzugrenzen, kann zunächst mithilfe der in Abschnitt 2.3.1.1 vorgestellten PEAS-Beschreibung nach RUSSELL und NORVIG (2010) bestimmt werden, welche Perzepte ein Simulationsagent mit welchen Sensoren wahrnehmen und welche Aktionen er mit welchen Aktuatoren ausführen können muss, welche wesentlichen Aspekte in seiner Umwelt zu erwarten sind und anhand welcher Leistungsbewertungen seine Güte erfasst werden kann. In Tabelle 5.2 ist die für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem zweckorientierte PEAS-Beschreibung eines Simulationsagenten dargestellt.

**Tabelle 5.2:** PEAS-Beschreibung eines Simulationsagenten für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem.

Leistungsbewertung	Umwelt	Aktuatoren	Sensoren
Das Mobilitätsverhalten des Agenten ist realistisch	Räumliche Umgebung und Straßen- und Wegenetz Datum und Uhrzeit Mobilitätsangebote des öffentlichen Verkehrs Verfügbare Ride-, Bike- und Carsharing-Angebote Andere Agenten und soziale Systeme	Nutzung von Fortbewegungsmitteln Bereitstellung von Ridesharing-Angeboten für andere Agenten	Wahrnehmung des eigenen Standorts Wahrnehmung von Datum und Uhrzeit Wahrnehmung der verfügbaren Mobilitätsangebote Wahrnehmung normativer Entscheidungsgründe

Die einzige relevante Leistungsbewertung eines Simulationsagenten ist der Anspruch, dass sich dieser in seinem Mobilitätsverhalten möglichst realistisch verhalten soll, damit das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem seinem Zweck gemäß der Leitfrage dieser Arbeit gerecht werden kann, wie Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten simuliert werden können, um sozialwissenschaftliche Primärforschung zu unterstützen.

Die Umwelt eines Agenten ist demgegenüber vielschichtiger und besteht aus mehreren Aspekten. Die physische Umwelt muss sowohl die wesentlichen geospatialen<sup>49</sup> Strukturen, wie beispielsweise das vorhandene Straßen- und Wegenetz, als auch die notwendigen temporalen Informationen, wie beispielsweise Wochentag und Tageszeit, bereitstellen. Dies ist

<sup>49</sup>Geospatiale Daten sind raumbezogene Informationen zur Abbildung eines geografischen Gebiets.

zwingend notwendig, da sonst keine spatiotemporalen<sup>50</sup> Zusammenhänge wie Ort und Zeit einer durchzuführenden Aktivität durch den Simulationsagenten verarbeitet werden können. Weiterhin muss der Agent Zugriff auf real existierende oder ebenfalls simulative Mobilitätsangebote des öffentlichen Verkehrs oder von anderen simulationsrelevanten Mobilitätsdienstleistern, wie beispielsweise Ride-, Bike- oder Carsharing-Anbietern, zur Verfügung stehen, damit Akzeptanz und Nutzung dieser Mobilitätsoptionen simuliert werden können. Die soziale Umwelt des Simulationsagenten umfasst demgegenüber die einzelnen Agenten und sozialen Systeme mit den durch sie repräsentierten normativen Entscheidungsgründen, die das Verhalten des Agenten potenziell beeinflussen.

Die Aktuatoren eines Agenten für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem bestimmen, welche Aktionen dieser innerhalb seiner Umwelt durchführen kann. Die zwingend notwendige Aktion ist die Fähigkeit zur Fortbewegung innerhalb der physischen Umwelt mit einem Fortbewegungsmittel. Dies können sowohl die der Umwelt zugeordneten Mobilitätsangebote des öffentlichen Verkehrs sowie Ridesharing-, Bike- oder Carsharing-Angebote als auch die persönlichen Fortbewegungsmittel des Individualverkehrs im Besitz des Agenten sein. Die zweite wesentliche Aktion ist das Bereitstellen von Ridesharing-Angeboten für andere Agenten der Simulation. Zwar muss dieser Aktuator nicht zwangsweise in jeder Simulation genutzt werden, sollen jedoch die Akzeptanz und Nutzung von Ridesharing-Angeboten simuliert werden, so ist es notwendig, dass die Simulationsagenten die Möglichkeit haben, derartige Mitfahrangebote den anderen Agenten der Simulation anbieten zu können.

Die Sensoren eines Simulationsagenten sind eng verbunden mit der relevanten Umwelt, da diese im Sinne des in Abschnitt 2.2 beschriebenen Verkürzungsmerkmals eines Modells genau die Aspekte umfasst, die als Perzepte eines Agenten zur Wahrnehmung der Entscheidungssituation relevant sind. Der Agent muss in der Lage sein, seinen räumlichen Standort sowie die Simulationszeit aus seiner physischen Umwelt wahrzunehmen, um erkennen zu können, ob und wann ein Trip zu oder von einer Aktivität notwendig wird. Weiterhin muss der Agent die verfügbaren Mobilitätsangebote in seiner physischen Umwelt erkennen können, um diese für seine Verkehrsmittelwahl in Erwägung ziehen zu können. Aus seiner sozialen Umwelt muss ein Simulationsagent darüber hinaus die potenziell verfügbaren, normativen Entscheidungsgründe für seine eigene Entscheidungsfindung wahrnehmen können.

Neben der PEAS-Beschreibung wird auf Grundlage der in Abschnitt 2.3.1.1 vorgestellten Systematik eine weitere Eingrenzung der Aufgabenumgebung eines Agenten für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem durchgeführt.

Aus der Tatsache, dass andere Agenten aufgrund ihrer normativen Entscheidungsgründe und der gegebenenfalls von ihnen angebotenen Ridesharing-Angebote eine wesentliche Rolle für die Entscheidung anderer Agenten spielen können, geht hervor, dass die Aufgabenumgebung als Multiagentenumgebung mit mehreren autonom entscheidenden und handelnden Agenten auszulegen ist.

Darüber hinaus kann für diese Arbeit, begründet in Anforderung A09, festgestellt werden, dass eine einerseits rein deterministische und andererseits vollständig bekannte Aufga-

---

<sup>50</sup>Spatiotemporale Daten vereinen räumliche und zeitliche Informationen.

benumgebung dem Zweck des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems genügt. Dies bedeutet, dass identische Entscheidungssituationen, die sich weder in den Perzepten noch in den verfügbaren Handlungsoptionen unterscheiden, stets zum identischen Resultat führen und dass die aus den Entscheidungen eines Agenten resultierenden Handlungen wie die Nutzung eines Fortbewegungsmittels oder die Bereitstellung von Ridesharing-Angeboten ohne unerwartete Abweichungen während der Aktion ausgeführt werden können.

Aus dem durch Anforderung A13 vorliegenden Discrete Choice-Problem kann eine diskrete Aufgabenumgebung abgeleitet werden. Da die Anzahl der verfügbaren, den Perzepten eines Agenten entsprechenden Mobilitätsoptionen demnach endlich ist, ist auch die Anzahl der sich daraus ergebenden möglichen Aktion grundsätzlich endlich.

Weiterhin kann aus den Eigenschaften der in Abschnitt 5.1.2 bestimmten, zur Entscheidungsfindung heranzuziehenden Attribute eine im Zweifelsfall nicht vollständige Beobachtbarkeit der Aufgabenumgebung abgeleitet werden. Diese ergibt sich aus der Tatsache, dass ein Agent aufgrund nicht wahrnehmbarer oder nicht in der Simulation existierender Attribute potenziell eine Entscheidung mit reduzierter Informationslage treffen muss. Der Umgang mit einer derartigen Entscheidungssituation hängt von konkreten Verfahren zur Entscheidungsfindung ab. So könnte ein Entscheidungsgrund bei fehlenden Attributen beispielsweise entweder ignoriert werden oder auf einen Standardfall für fehlende Informationen verweisen. Liegen jedoch in einer Entscheidungsfindung sämtliche entscheidungsrelevanten Attribute vor, so handelt es sich um eine vollständig beobachtbare Aufgabenumgebung.

Ferner ist die erforderliche Aufgabenumgebung insofern zunächst als prinzipiell statisch anzusehen, als ein Agent auf Grundlage seiner verfolgten Aktivitäten und seiner Perzepte aus der Umwelt eine Mobilitätsentscheidung treffen muss. Diese Entscheidung soll der Agent so schnell wie möglich treffen, eine erhebliche Bedenkzeit im menschlichen Sinne, während der sich die Entscheidungssituation verändern könnte, ist nicht notwendig. Ob die Umgebung in der praktischen Umsetzung jedoch tatsächlich statisch ist, hängt von der jeweiligen Implementierung ab. Es bestünde beispielsweise die Möglichkeit, das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem so umzusetzen, dass die Entscheidungsprozesse verschiedener Simulationsagenten parallel ablaufen. In diesem Fall wäre es denkbar, dass begrenzte Mobilitätsangebote, wie zum Beispiel ein Ridesharing-Angebot, während der technisch bedingten Berechnungszeit für die Entscheidung eines Agenten durch einen anderen Agenten vergriffen würden. In diesem Fall müsste der Agent die Entscheidungsfindung aufgrund der während der Entscheidungszeit ungültig gewordenen Entscheidung wiederholen.

Auch die Frage, ob es sich um eine episodische oder sequenzielle Aufgabenumgebung handelt, ist im Wesentlichen von der konkreten Umsetzung des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems und dem Zeithorizont der Vorausplanung eines Simulationsagenten abhängig. Entscheidet ein Agent stets gleichzeitig über Hin- und Rückfahrt einer Tour zu und von einer Aktivität, handelt es sich um eine episodische Umgebung, in der Entscheidungen voneinander unabhängig sind. Werden die einzelnen Trips zu und von einer Aktivität jedoch aufgrund eines erheblich verkürzten Zeithorizonts der Vorausplanung oder aus anderen Gründen einzeln entschieden, so muss der Agent beispielsweise bei der Rückfahrt

berücksichtigen, ob er zur Anreise ein eigenes Fortbewegungsmittel genutzt hat. In diesem Fall würde das Entscheidungsverhalten im Sinne einer sequenziellen Aufgabenumgebung von einer vorherigen Entscheidung abhängen.

Zusammenfassend lässt sich nun die abstrakte Agentenfunktion genauer definieren. Kernfunktion der Agenten für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem ist die Entscheidung für die beste, zum Zeitpunkt der Entscheidung verfügbare Mobilitätsoption zur Verfolgung ihrer Aktivitäten. Zur Bestimmung der Güte einer Mobilitätsoption in einer Entscheidungssituation muss ein Agent die entscheidungsrelevanten Attribute aus seinem eigenen Zustand, der verfolgten Aktivität, der zu nutzenden Fortbewegungsmittel und den Perzepten aus seiner physischen Umwelt zusammen mit den Entscheidungsgründen aus seinem Zustand und den Perzepten aus seiner sozialen Umwelt einsetzen. Resultierende Aktionen der Entscheidung sind die Nutzung der gewählten Mobilitätsoption und das etwaige Anbieten eines Ridesharing-Angebots für andere Agenten.

Damit erfüllen die Agenten darüber hinaus die in Abschnitt 2.3.1 dargestellten, von WOOLDRIDGE (2002) formulierten Kriterien an einen intelligenten Agenten (WOOLDRIDGE, 2002, S. 23). Die Simulationsagenten müssen proaktiv ihre durchzuführenden Aktivitäten planen und reaktiv mit den spezifischen Perzepten zum Zeitpunkt der Entscheidung umgehen. Weiterhin müssen sie sozial auf Mobilitätsangebote anderer Agenten reagieren können und ihre Entscheidung autonom treffen.

### 5.1.3.2 Bestimmung der Agentenklasse und -architektur

Auf Grundlage der am Ende von Abschnitt 5.1.3.1 definierten Agentenfunktion kann nun eine genauere Agentenarchitektur für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem bestimmt werden. Die fünf in Abschnitt 2.3.1.2 vorgestellten Agentenklassen nach RUSSELL und NORVIG (2010) können an dieser Stelle herangezogen werden, um die Komplexität und die Mächtigkeit der zu entwickelnden Agenten einzugrenzen.

Eine Modellierung als einfacher oder modellbasierter Reflexagent kann aus mehreren Gründen ausgeschlossen werden. Das Verhalten eines Reflexagenten basiert auf Konditionalregeln, die allen möglichen Perzepten die jeweils durchzuführende Aktion zuweist. Dazu muss die Umwelt vollständig beobachtbar sein, da sonst gegebenenfalls entscheidende Perzepte nicht wahrgenommen werden könnten und der Agent entscheidungsunfähig wäre (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 48 f.). Da die vollständige Beobachtbarkeit der Umwelt der Simulationsagenten, wie in Abschnitt 5.1.3.1 beschrieben, nicht garantiert werden kann, erscheint diese Agentenklasse ungeeignet. Weiterhin muss sichergestellt sein, dass die gemäß den Konditionalregeln durchzuführende Aktion überhaupt verfügbar ist. Auch dieser Umstand kann für die Simulationsagenten nicht gewährleistet werden, da zum Beispiel begrenzte Mobilitätsoptionen wie Ridesharing-Angebote nicht zuverlässig für alle Agenten verfügbar sind. Insgesamt sind Reflexagenten damit zu unflexibel für die Dynamik der im zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem zu erwartenden Entscheidungssituationen.

Ebenso ist eine Modellierung als zielorientierter Agent nicht ausreichend für die Agenten des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems. Ein zielorientierter Agent ist zwar in der

Lage, Handlungsoptionen zur Erreichung eines Ziel zu identifizieren, kann diese Optionen jedoch nicht in ihrer Güte unterscheiden (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 52 f.). Ein Agent des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems könnte somit zwar Mobilitätsoptionen identifizieren, mit denen die Hin- oder Rückfahrt zu oder von einer Aktivität durchgeführt werden könnte, besitzt jedoch nicht die in Abschnitt 5.1.3.1 geforderte Fähigkeit, in einer Entscheidungssituation stets die bestmögliche Mobilitätsoption zu wählen.

Eine Modellierung als lernender Agent hingegen übersteigt die erforderliche Komplexität und Mächtigkeit der Simulationsagenten und ist im Rahmen dieser Arbeit nicht zielführend. Gemäß der Leitfrage dieser Arbeit sollen mit dem zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem sozialwissenschaftliche Modelle und Studienergebnisse zu Mobilitätsverhalten systematisch und reproduzierbar ausgeführt und untersucht werden können. Ein Simulationsagent, der beispielsweise seine Entscheidungsgründe während der Simulation dynamisch anpasst, verfälscht die Aussagekraft der Simulation hinsichtlich des konkreten hinterlegten Modells.

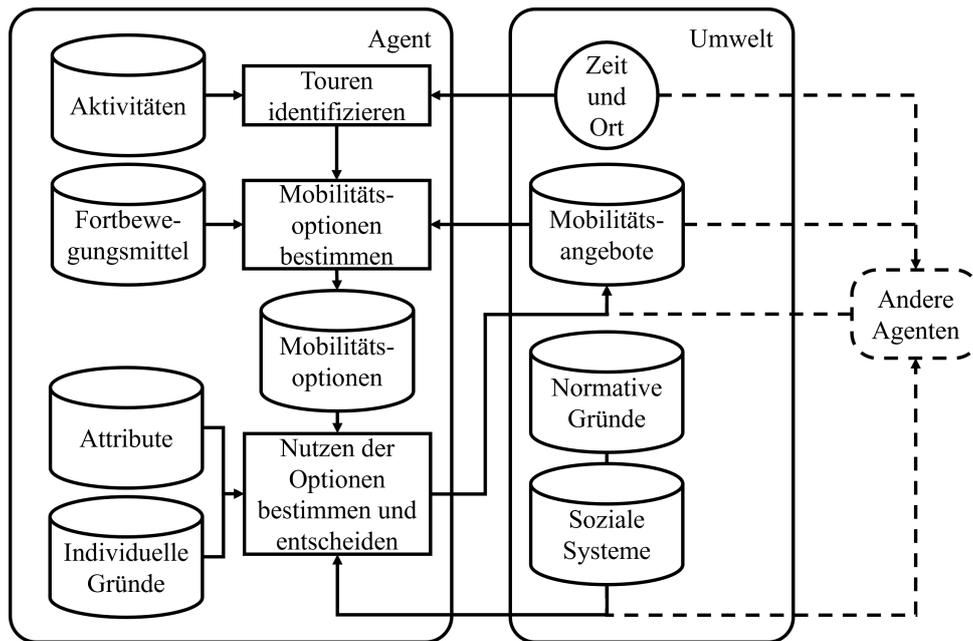
Die Simulationsagenten müssen daher als nutzenmaximierende Agenten umgesetzt werden. Nach der Identifikation von verfügbaren Mobilitätsoptionen für die Hin- oder Rückfahrt zu oder von einer Aktivität kann ein Agent anhand des subjektiven Nutzens jeder Mobilitätsoption entscheiden, welche in der jeweiligen Entscheidungssituation die bestgeeignete ist. Der Nutzen jeder Mobilitätsoption muss dazu aus den entscheidungsrelevanten Attributen der Perzepte eines Agenten unter Zuhilfenahme seiner Entscheidungsgründe bestimmt werden. Darüber hinaus ermöglicht eine Modellierung als nutzenmaximierender Agent, den in Abschnitt 5.1.3.1 aufgezeigten Zeithorizont der Vorausplanung des Simulationsagenten sinnvoll auszunutzen. Ermittelt ein Agent beispielsweise für die selbe Aktivität mehrfach und zu unterschiedlichen Simulationszeitpunkten die verfügbaren Mobilitätsoptionen, so kann er seine Entscheidung gegebenenfalls zugunsten später erkannter, besserer Optionen ändern.

In Abbildung 5.4 ist die nutzenmaximierende Agentenarchitektur grafisch dargestellt. Die Agentenarchitektur greift die in Abschnitt 5.1.2 herausgearbeiteten und in Abbildung 5.3 dargestellten benötigten Modellelemente des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems auf und zeigt schematisch dessen zentrale Vorgänge und Abhängigkeiten.

Ausgangspunkt der Agentenarchitektur ist die Identifikation von Touren mit den dazugehörigen Trips zur Hin- und Rückfahrt auf Grundlage der vom Agenten zu verfolgenden Aktivitäten sowie seiner Perzepte zu Zeit und Ort in der Simulationsumwelt. Liegt eine Aktivität damit im Zeithorizont der Vorausplanung des Agenten, wird die Erreichung dieser Aktivität als Ziel formuliert.

Anschließend bestimmt der Agent alle grundsätzlich denkbaren Mobilitätsoptionen, um die jeweilige Tour zu durchzuführen. Dazu werden einerseits seine eigenen Fortbewegungsmittel für den Individualverkehr und andererseits seine Perzepte zu den Mobilitätsangeboten des öffentlichen Verkehrs und anderer Mobilitätsdienstleister herangezogen.

Nachdem dem Agenten alle potenziellen Mobilitätsoptionen vorliegen, kann er den subjektiven Nutzen jeder Mobilitätsoptionen einzeln bestimmen. Die unterschiedlichen, in Abschnitt 5.1.2 konkretisierten, entscheidungsrelevanten Attribute werden dazu zusammen mit



**Abbildung 5.4:** Nutzenmaximierende Agentenarchitektur für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem. Vorgänge sind als Rechtecke dargestellt, initial benötigte Informationen zu Zeit und Ort als Kreis. In Zylindern dargestellt sind die weiteren in Abschnitt 5.1.2 identifizierten Modellelemente gemäß Abbildung 5.3. Die Architektur konkretisiert die allgemeine, in Abbildung 2.4 dargestellte, wechselseitige Abhängigkeit zwischen Agent und Umwelt.

den individuellen Entscheidungsgründen und den aus den Perzepten seiner sozialen Systeme erkannten normativen Entscheidungsgründen genutzt, um den subjektiven Nutzen jeder Mobilitätsoption zu bestimmen. Die Mobilitätsoption mit dem höchsten Nutzen wird als durchzuführende Aktion durch den Agenten ausgewählt.

Andere Agenten des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem interagieren ebenfalls mit der Umwelt. Sollte sich ein Agent für sein Auto als Mobilitätsoption entschieden haben, kann er dieses anderen Agenten als Ridesharing-Angebot zu Verfügung stellen, womit jene mit einem veränderten Mobilitätsangebot konfrontiert sind.

Hinsichtlich der in Abschnitt 2.3.1.3 vorgestellten Agentenarchitekturen entspricht die in Abbildung 5.4 dargestellte Agentenarchitektur damit einer, wenngleich vereinfachten, BDI-Agentenarchitektur. Analog zu den Annahmen, Zielen und Handlungsabsichten einer BDI-Agentenarchitektur identifizieren die Simulationsagenten des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem zunächst ihre Ziele durch ihre Annahmen über den Zustand ihrer Umwelt aus ihren Perzepten. Diese Ziele entsprechen den Aktivitäten beziehungsweise den dazu erforderlichen Touren der Agenten. Auf Grundlage der Ziele werden mögliche Handlungsabsichten geplant, um die gesetzten Ziele zu erreichen. Diese Handlungsabsichten der Simulationsagenten sind in den von ihnen zu bestimmenden Mobilitätsoptionen abgebildet. Die erwähnte Vereinfachung liegt vor allem in der Tatsache, dass im Rahmen dieser Arbeit keine konkurrierenden Aktivitäten und Ziele berücksichtigt werden. Die Agenten des zu ent-

wickelnden Mobilitätssimulationssysteme müssen daher nicht in der Lage sein, Kompromisse bei der gleichzeitigen Verfolgung mehrerer Ziele bilden zu können.

## 5.2 Entscheidungsfindung

Aufbauend auf den in Abschnitt 5.1.3 herausgearbeiteten Eigenschaften eines Agenten und der in Abbildung 5.4 dargestellten Agentenarchitektur für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem kann ein Verfahren zur Bestimmung des Nutzens einer Mobilitätsoption durch einen Agenten entwickelt und formalisiert werden. Die einzelnen Mobilitätsoptionen bilden damit die in Anforderung A13 geforderte Grundlage für das abzubildende Discrete Choice-Entscheidungsproblem.

Zu diesem Zweck muss im Folgenden gemäß Anforderung A12 ein generisches Inferenzmodell entwickelt werden, das für unterschiedliche sozialwissenschaftliche Modelle innerhalb des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems genutzt werden kann. Zusammen mit einem konkreten sozialwissenschaftlichen Modell wird das Verfahren als Nutzenfunktion für die Simulationsagenten eingesetzt, um den subjektiven Nutzen jeder verfügbaren Mobilitätsoption zu bestimmen. Insbesondere muss das generische Inferenzmodell gemäß Anforderung A09 eine deterministische Entscheidungsfindung ermöglichen und gemäß Anforderung A04 in der Lage sein, auch subjektive und zwischen einzelnen Mobilitätsoptionen uneinheitliche entscheidungsrelevante Attribute und Entscheidungsgründe abbilden zu können.

### 5.2.1 Einordnung in die Entscheidungstheorie

Innerhalb der Domäne der Entscheidungstheorie existieren verschiedene generische Methoden zum systematischen Entscheiden zwischen verschiedenen Handlungsoptionen, wie beispielsweise die GOFER<sup>51</sup>- oder die DECIDE<sup>52</sup>-Methode (MANN et al., 1991; GUO, 2008). Beide Methoden beschreiben einzelne Schritte, die GOFER-Methode fünf und die DECIDE-Methode sechs, die in einer Entscheidungssituation durchlaufen werden sollten, um zu einem annehmbaren, begründeten Ergebnis zu kommen. Die ersten drei Schritte beider Methoden dienen der Zieldefinition, der Erkennung der Rahmenbedingungen und der Erhebung von Handlungsoptionen. Diese Vorgänge sind durch die Aktivitäten eines Simulationsagenten sowie die sich daraus ergebenden Mobilitätsoptionen und der vorherrschenden, entscheidungsrelevanten Attribute bereits in Abschnitt 5.1 dargestellt. Der vierte Schritt beider Ansätze dient der eigentlichen Bewertung der Handlungsoptionen, bevor die Entscheidung in den nachfolgenden Schritten umgesetzt wird. Insbesondere die GOFER-Methode benennt zur Entscheidungsfindung explizit, dass die Entscheidung anhand der zu erwartenden positiven und negativen Effekte jeder Handlungsoption zu treffen ist (MANN et al., 1991, S. 66 f.).

Aus entscheidungstheoretischer Sicht im Allgemeinen beziehungsweise des Bereichs der *multikriteriellen Entscheidungsfindung* (Englisch unter anderem: multi-criteria decision making, multi-attribute decision making, multi-criteria decision analysis) im Speziellen han-

<sup>51</sup>Goals, Options, Facts, Effects, Review

<sup>52</sup>Define, Establish, Consider, Identify, Develop, Evaluate

delt es sich bei dem vorliegenden Entscheidungsproblem der Simulationsagenten für eine Mobilitätsoption um ein multikriterielles Discrete Choice-Entscheidungsproblem. Ein solches Entscheidungsproblem erweitert die bereits in Anforderung A13 nach TRAIN (2003) beschriebenen Eigenschaften eines Discrete Choice-Problems um die Eigenschaft, dass mehr als ein Kriterium über die Güte beziehungsweise den Nutzen einer Handlungsoption entscheiden kann (TRIANTAPHYLLOU, 2000, S. 1; KAHRAMAN, 2008, S. 1 f.). Im Falle des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems sind diese Kriterien die unterschiedlichen entscheidungsrelevanten Attribute insbesondere einer Mobilitätsoption, die im Rahmen der Entscheidungsfindung eines Agenten durch diesen individuell zu bewerten sind.

Je nach Informationslage können unterschiedliche Verfahren zur multikriteriellen Entscheidungsfindung eingesetzt werden (CHEN und HWANG, 1992, S. 21, 23).

Liegen vorab keinerlei Informationen zu den Handlungsoptionen oder ihren Kriterien vor, können die Handlungsoptionen mit der Dominanz-Methode wenigstens auf die in Abschnitt 2.4.4.1 beschriebene Pareto-optimale Menge reduziert werden. Dazu werden initial zwei Handlungsoptionen verglichen, sollte dabei eine von der anderen dominiert werden, wird diese verworfen und die dominante der Pareto-optimalen Menge hinzugefügt. Anschließend werden die restlichen Handlungsoptionen nacheinander mit der Pareto-optimalen Menge verglichen, wobei jedes mal alle dominierten Optionen verworfen und alle dominanten hinzugefügt werden, bis am Ende nur Pareto-optimale Lösungen verbleiben. Zur Auswahl einer einzelnen Handlungsoption ist die Methode daher nicht geeignet (CHEN und HWANG, 1992, S. 25, 27). Eine konkrete Entscheidung kann in einer Situation ohne zusätzliche Informationen nur getroffen werden, wenn sich die Kriterien aller Handlungsoptionen auf der gleichen Skala abbilden lassen, sodass nach der MaxiMin-Methode eine Handlungsoption anhand ihres schlechtesten Kriteriums oder gemäß der MaxiMax-Methode anhand ihres besten gewählt wird (CHEN und HWANG, 1992, S. 25, 27 f.).

Liegen wenigstens Informationen zu den Handlungsoptionen als Ganzes vor, kann eine Entscheidung vergleichsweise einfach mithilfe eines paarweisen Vergleichs zwischen den Handlungsoptionen erfolgen. Dazu ist jedoch bereits eine Präferenz zwischen den einzelnen Optionen notwendig, die Entscheidung ist damit nicht ausschließlich auf die Kriterien zurückzuführen (CHEN und HWANG, 1992, S. 21 f.).

Liegen jedoch Informationen zu den einzelnen Kriterien vor, kann auf eine Vielzahl von Methoden zurückgegriffen werden, um Handlungsoptionen zu bewerten (CHEN und HWANG, 1992, S. 23). Zur Entscheidung für eine einzelne Handlungsoption ungeeignet sind einfache, konjunktive oder disjunktive Methoden, bei denen lediglich Schwellwerte für jedes Kriterium bestimmt werden, da in diesen Fällen auch nach Anwendung der Methode gegebenenfalls noch mehr als eine Option oder auch gar keine verbleiben kann (CHEN und HWANG, 1992, S. 25, 31 f.). Zu unterscheiden sind weiterhin Methoden für ordinal sortierbare und kardinal messbare Kriterien (CHEN und HWANG, 1992, S. 23). Für lediglich ordinale Kriterien sind insbesondere Methoden zur lexikografischen Ordnung geeignet. Die Kriterien werden dazu in ihrer Ordnung sortiert und die Handlungsoptionen zunächst nur anhand des wichtigsten Kriteriums verglichen. Sollten mehrere Handlungsoptionen die gleiche Bewertung erhalten,

wird der Vergleich anhand des zweiten Kriteriums fortgesetzt, bis eine Option verbleibt oder alle Kriterien untersucht wurden. Grundsätzlich notwendig ist dazu jedoch eine Hierarchie zwischen den unterschiedlichen Kriterien. Die Methode kann abgeschwächt werden, indem während eines Vergleichs auch Handlungsoptionen erhalten werden, die hinsichtlich des verglichenen Kriteriums nicht unwesentlich schlechter als die beste Option sind (CHEN und HWANG, 1992, S. 32 f.). Für kardinale Kriterien kann in der Regel die genaue Güte einer Handlungsoption bestimmt werden, wenn die Skalen der Kriterien normalisiert und damit vergleichbar gemacht werden können. Sind optimale Werte für jedes Kriterium bekannt, so kann der Abstand einer Handlungsoption zu diesem optimalen und möglicherweise utopischen Ziel mithilfe einer geeigneten Abstandsfunktion, wie beispielsweise dem euklidischen Abstand, berechnet werden (CHEN und HWANG, 1992, S. 41). Liegen keine Zielwerte vor, so können alternativ eine gewichtete Summe oder ein gewichtetes Produkt bestimmt werden, um die Güte einer Handlungsoption zu quantifizieren. Bei einem gewichteten Produkt wirken sich auch geringe Unterschiede zwischen den Kriterien deutlicher in der Güte aus. Notwendig für diese beiden Verfahren ist jedoch eine numerische Gewichtung der Kriterien (CHEN und HWANG, 1992, S. 36, 40; TRIANTAPHYLLOU, 2000, S. 6–9).

Dieser zuletzt beschriebenen Kategorie multikriterieller Entscheidungsmethoden für kardinale Kriterien ist auch das vorliegende Discrete Choice-Entscheidungsproblem der Agenten des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems zuzuordnen, da diese eine Entscheidung für eine ihrer vorliegenden Mobilitätsoptionen anhand der vorhandenen, gegebenenfalls kardinalen, entscheidungsrelevanten Attribute treffen müssen.

### 5.2.2 Verfahren zur Entscheidungsfindung

Wie bereits aus Abschnitt 5.2.1 ersichtlich wird, ist prinzipiell eine Vielzahl von Entscheidungsverfahren denkbar, die zur Bewertung von Handlungsoptionen durch einen rationalen Agenten genutzt werden können. Vor dem Hintergrund der in Anforderung A01 genannten Naturanalogie beschränken sich die in Erwägung gezogenen Entscheidungsverfahren in dieser Arbeit auf die in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Verfahren aus dem Bereich der Computational Intelligence. Angenommen wird an dieser Stelle, dass diese Verfahren durch ihre Nähe zu menschlichem Denken und Handeln zur Entscheidungsfindung eines Agenten des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems für eine Mobilitätsoption besonders geeignet sind. Daher muss im Folgenden ein geeignetes Verfahren der Computational Intelligence identifiziert und adaptiert werden, um gemäß Anforderung A12 als generisches Inferenzmodell für unterschiedliche sozialwissenschaftliche Modelle genutzt werden zu können. Parametrisiert durch ein konkretes sozialwissenschaftliches Modell wird das Verfahren von den Simulationsagenten eingesetzt, um eine Entscheidung für eine der verfügbaren Mobilitätsoptionen zu treffen.

### 5.2.2.1 Kriterien an das Entscheidungsverfahren

Das auszuwählende Entscheidungsverfahren der Computational Intelligence muss insgesamt in der Lage sein, die folgenden fünf Kriterien zu erfüllen, um von einem Simulationsagenten zur Bewertung von Mobilitätsoptionen genutzt werden zu können. Die Kriterien ergeben sich sowohl unmittelbar aus den in Kapitel 4 aufgestellten Anforderungen an die Entscheidungsfindung als auch aus den bereits in Abschnitt 5.1 getroffenen Gestaltungsentscheidungen hinsichtlich des dem zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems zugrunde liegenden Modells.

**Nominale, ordinale und kardinale Attribute** Aus Abschnitt 5.1.2 gehen unterschiedliche Arten entscheidungsrelevanter Attribute hervor, die in die Entscheidungsfindung für eine Mobilitätsoption durch einen Simulationsagenten einbezogen werden können müssen. Diese sind, wie in Abbildung 5.3 gezeigt, verschiedenen Modellelementen zuzuordnen und können nominaler, ordinaler und kardinaler Art sein. Diese unterschiedlichen Arten von entscheidungsrelevanten Attributen fungieren als Eingaben in das Entscheidungsverfahren eines Agenten. Das auszuwählende Verfahren der Computational Intelligence muss daher, abhängig vom jeweilig hinterlegten sozialwissenschaftlichen Modell, in der Lage sein, eine prinzipiell beliebige Anzahl nominaler, ordinaler und kardinaler Attribute gleichzeitig verarbeiten zu können.

**Entscheidungsgründe** Neben den oben genannten nominalen, ordinalen und kardinalen Attributen definieren Abschnitt 5.1.2 und insbesondere Abbildung 5.3 normative und individuelle Entscheidungsgründe, die zur Entscheidungsfindung durch die Simulationsagenten herangezogen werden können müssen. Diese Entscheidungsgründe werden zusammen mit den verfügbaren entscheidungsrelevanten Attributen bei der Entscheidungsfindung genutzt, um eine Entscheidung für eine verfügbare Mobilitätsoption treffen zu können. Es muss daher mit dem ausgewählten Verfahren möglich sein, Entscheidungsgründe je nach hinterlegtem sozialwissenschaftlichen Modell und in geeigneter Form, beispielsweise regelbasiert oder auf Grundlage mathematischer Funktionen, abbilden zu können, um den Zusammenhang zwischen den Eingaben und Ausgaben des Entscheidungsverfahrens beschreiben zu können.

**Abstrakte Nutzenfunktion** Wie in Abschnitt 5.1.3.2 beschrieben, handelt es sich bei den Simulationsagenten um nutzenmaximierende Agenten, die ihre Entscheidungen für eine Mobilitätsoption anhand des wahrgenommenen Nutzens der verfügbaren Mobilitätsoptionen treffen sollen. Dieser Nutzen muss auf einer abstrakten Skala abgebildet werden, damit unterschiedliche Mobilitätsoptionen vergleichbar gemacht werden können. Weiterhin sollte die Nutzenfunktion auf einen stetigen Wertebereich abbilden können, damit im Gegensatz zu diskreten Kategorien auch prinzipiell beliebig feine Unterschiede im Nutzen zwischen Mobilitätsoptionen erkannt werden können. Ob der Wertebereich links- oder rechtsseitig beschränkt oder unbeschränkt ist, beeinflusst insbesondere die Interpretierbarkeit der berechneten Nutzen. Würde die Nutzenfunk-

tion beispielsweise auf das abgeschlossene Intervall  $[-1, 1]$  abbilden, könnte damit ein Nutzen symmetrisch von schlecht bis gut und mit dem Wert 0 als neutralem Nutzen dargestellt werden, während eine Abbildung auf das Intervall  $[0, \infty)$  zwar in der Abbildung von Zustimmung unbegrenzt ist, allerdings keine Interpretierbarkeit hinsichtlich des Verhältnisses von Akzeptanz und Ablehnung einer Mobilitätsoptionen ermöglicht. Unabhängig vom konkreten Wertebereich der Nutzenfunktion muss das auszuwählende Entscheidungsverfahren jedoch grundsätzlich als abstrakte Nutzenfunktion zur stetigen Quantifizierung von Mobilitätsoptionen genutzt werden können.

**Operationalisierung latenter Variablen** Anforderung A04 verdeutlicht die Notwendigkeit der Abbildung der subjektiven Wahrnehmung der Entscheidungssituation durch die Simulationsagenten. Diese subjektiven Wahrnehmungen sind typischerweise keine objektiven und unmittelbar quantifizierbaren Faktoren wie die in Abschnitt 5.1.2 herausgearbeiteten entscheidungsrelevanten Attribute, sondern vage und aggregierte Wahrnehmungen hinsichtlich des Kontexts der Entscheidungssituation. Welche dieser subjektiven Wahrnehmungen für eine Entscheidung von Bedeutung sind, hängt wesentlich von der Art der Mobilitätsoption ab. Beispielsweise kann für Ridesharing-Angebote erkannt werden, dass das wahrgenommene Sicherheitsgefühl von Nutzern derartiger Angebote gegenüber ihnen unbekanntem Fahrern oder ihr Vertrauen in die Betreiber von Ridesharing-Plattformen und Mitfahrzentralen eine wesentliche Rolle bei der Entscheidung für oder gegen ein solches Angebot spielen (AMEY et al., 2011, S. 8; WIND et al., 2012, S. 7; FURUHATA et al., 2013, S. 40 f.). Im Rahmen dieser Arbeit werden diese subjektiven, nicht unmittelbar als entscheidungsrelevante Attribute abbildbaren Faktoren als *latente Variablen* bezeichnet, analog zu den in den Sozialwissenschaften gängigen Begriffen der latenten Variable beziehungsweise des Konstrukts für eine nicht beobachtbare Variable (BORTZ und DÖRING, 2006, S. 4; BRANDT, 2020, S. 577 f.). Das Messbarmachen einer latenten Variable aus beobachtbaren wird als *Operationalisierung* bezeichnet (BORTZ und DÖRING, 2006, S. 62–65; MOOSBRUGGER und KELAVA, 2020, S. 15). Es ist daher für das auszuwählende Entscheidungsverfahren notwendig, dass latente Variablen, falls im jeweiligen sozialwissenschaftlichen Modell vorgesehen, bei Bedarf abgebildet und aus den entscheidungsrelevanten Attributen operationalisiert werden können.

**Determinismus** Aus Anforderung A09 ergibt sich unmittelbar die Notwendigkeit für ein deterministisches Entscheidungsverfahren. Einzelne Entscheidungen sollen reproduzierbar sein, um bei Bedarf auch Rückschlüsse vom beobachtbaren Verhalten eines Simulationsagenten auf die Ausprägungen der entscheidungsrelevanten Attribute unter den zur Entscheidung genutzten Entscheidungsgründen zulassen zu können. Zwar können Mikrosimulationen prinzipiell auch mit probabilistischen Verfahren durchgeführt werden, das emergente Verhalten und Ergebnisse einer solchen Simulation können unter solchen Bedingungen jedoch nur auf makroskopischer Ebene beurteilt werden. Eine Nachvollziehbarkeit und Erklärung einzelner Verhalten ist nicht mehr möglich. Aus

diesem Grund darf das auszuwählende Verfahren kein inhärent probabilistisches Verfahren sein. Eine grundsätzliche Erweiterbarkeit des Verfahrens um probabilistische Aspekte muss jedoch nicht ausgeschlossen werden.

### 5.2.2.2 Auswahl eines Entscheidungsverfahrens

In Tabelle 5.3 ist die Eignung der in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Verfahren der Computational Intelligence als Entscheidungsverfahren für die Simulationsagenten bei der Entscheidung für eine Mobilitätsoption hinsichtlich der in Abschnitt 5.2.2.1 aufgestellten fünf Kriterien dargestellt.

**Tabelle 5.3:** Eignung von Fuzzyinferenz (FI), künstlichen neuronalen Netze (KNN), bayesischen Netze (BN) und Entscheidungsbäumen (EB) hinsichtlich der aufgestellten Kriterien. Die Eignung ist dargestellt in drei Abstufungen: geeignet ( $\checkmark$ ), teilweise geeignet ( $\sim$ ) oder nicht geeignet ( $\times$ ).

	FI	KNN	BN	EB
Nominale, ordinale und kardinale Attribute	$\checkmark$	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$
Entscheidungsgründe	$\checkmark$	$\sim$	$\sim$	$\checkmark$
Abstrakte Nutzenfunktion	$\checkmark$	$\checkmark$	$\times$	$\sim$
Operationalisierung latenter Variablen	$\checkmark$	$\checkmark$	$\checkmark$	$\times$
Determinismus	$\checkmark$	$\checkmark$	$\times$	$\checkmark$

Das Kriterium, dass beliebige nominale, ordinale und kardinale Attribute abgebildet werden können müssen, wird von Fuzzyinferenz, künstlichen neuronalen Netzen und von Entscheidungsbäumen erfüllt. Bayessche Netze erfüllen das Kriterium nicht.

Die linguistischen Variablen eines Fuzzyinferenzsystems sind gut geeignet, um beliebige entscheidungsrelevante Attribute durch Fuzzifizierung zu verarbeiten. Liegt für nominale oder ordinale Attribute beispielweise nur eine endliche Menge von Ausprägungen vor, können diese durch entsprechende Singletons einer linguistischen Variable codiert werden. Als Zugehörigkeitsfunktion für kardinale Attribute als Eingabewerte hingegen ist nahezu jede beliebige Funktion möglich, um mit oder ohne begrenzten Definitionsbereich für das jeweilige Attribut eine Fuzzifizierung zu ermöglichen. Vergleichsweise ähnlich kann auch für künstliche neuronale Netze festgestellt werden, dass Eingaben aus beliebigen entscheidungsrelevanten Attributen möglich sind, indem jedem möglichen Attribut ein künstliches Neuron in der Eingabeschicht des Netzes zugeordnet wird, das die Eingabe mit einer entsprechenden Aktivierungsfunktion verarbeitet. Für Entscheidungsbäume gilt ebenso, dass Eingabewerte aus beliebigen entscheidungsrelevanten Attributen möglich sind. Diese werden im Gegensatz zu Fuzzyinferenz und künstlichen neuronalen Netzen zwar hierarchisch und nacheinander statt parallel und gleichzeitig herangezogen, was die Größe des Entscheidungsbaums bei vielen entscheidungsrelevanten Attributen gegebenenfalls stark erhöht, das Kriterium ist dennoch prinzipiell erfüllt. Bayessche Netze hingegen können lediglich nominale Attribute

abbilden, da die Knoten eines bayesschen Netzes nur erfüllt oder nicht erfüllt sein können. Zwar sind die Knoten weiterhin durch diskrete oder kontinuierliche Wahrscheinlichkeiten beschrieben, auch diese ermöglichen jedoch keine sinnvolle Abbildung kardinaler Attribute.

Das Kriterium der Abbildung von beliebigen Entscheidungsgründen wird von Fuzzyinferenz und Entscheidungsbäumen erfüllt und von künstlichen neuronalen Netzen und bayesschen Netzen wenigstens teilweise erfüllt.

Ein Fuzzyinferenzsystem ist ein grundsätzlich regelbasierter Ansatz, dessen Regelbasis Zusammenhänge zwischen den linguistischen Termen verschiedener linguistischer Variablen des Systems nachvollziehbar herstellen kann. Es ist damit gut geeignet, die einzelnen Entscheidungsgründe für oder gegen bestimmte Mobilitätsoptionen abzubilden. Auch Entscheidungsbäume sind zur Abbildung einzelner Entscheidungsgründe geeignet. Jede Verzweigung in einem Baum repräsentiert eine Teilentscheidung, die durch den damit verbundenen Entscheidungsgrund gesteuert wird. In der disjunktiven Normalform eines Entscheidungsbauers repräsentieren die einzelnen Terme die Entscheidungsgründe dieser Teilentscheidungen (QUINLAN, 1987). Künstliche neuronale Netze sind nur teilweise für die Abbildung von einzelnen Entscheidungsgründen geeignet, da diese durch die grundsätzlich konnektionistische Art eines solchen Netzes nur durch die Verbindungen und ihre Gewichte zwischen den einzelnen Neuronen und in Abhängigkeit der jeweiligen Eingabefunktionen ausgedrückt werden können. Es ist daher zu erwarten, dass die Abbildung einzelner Entscheidungsgründe aus einem konkreten sozialwissenschaftlichen Modell auf diesem Weg vergleichsweise kompliziert ist. Ebenso ist für bayessche Netze festzustellen, dass zwar eine grundsätzliche Abhängigkeit zwischen miteinander verbundenen Knoten durch bedingte Wahrscheinlichkeiten zum Ausdruck gebracht werden kann, jedoch zu erwarten ist, dass die Übertragbarkeit einzelner Entscheidungsgründe aus einem konkreten sozialwissenschaftlichen Modell dadurch erschwert würde.

Das Kriterium zur erforderlichen abstrakten Nutzenfunktion wird von Fuzzyinferenz und künstlichen neuronalen Netzen erfüllt und von Entscheidungsbäumen wenigstens teilweise erfüllt. Bayessche Netze erfüllen das Kriterium nicht.

Beide in dieser Arbeit vorgestellten Arten der Fuzzyinferenz sind geeignet, um zur Berechnung eines abstrakten Nutzens beim Vergleich von Mobilitätsoptionen durch die Simulationsagenten herangezogen werden zu können. Im Fall von Mamdani-Inferenz kann dazu eine linguistische Variable für den wahrgenommenen Nutzen eingeführt werden, deren Definitionsbereich bei der Defuzzifizierung das Intervall beschreibt, in dem der Nutzen abgebildet werden kann. Im Fall von Takagi-Sugeno-Inferenz beschreibt die Ausgabe des Systems unmittelbar einen abstrakten Wert. Künstliche neuronale Netze sind ebenso geeignet, um einen abstrakten Nutzen aus den Eingaben in das Netz zu berechnen. Selbst ein einfaches Perzeptron mit stetiger statt binärer Ausgabefunktion könnte bereits dazu verwendet werden, die Eingaben in das Netzwerk auf einen abstrakten Nutzen abzubilden. Auch Entscheidungsbäume können in Form von Regressionsbäumen zwar zur Berechnung von stetigen Ausgabewerten eingesetzt werden, es ist jedoch davon auszugehen, dass zumindest die händische, nicht-automatische Formulierung eines solchen Regressionsbaumes auf

Grundlage eines sozialwissenschaftlichen Modells sehr aufwändig und komplex ist, sobald mehr als ein entscheidungsrelevantes Attribut bei der Entscheidung berücksichtigt werden muss, insbesondere bei Wechselwirkungen zwischen diesen Attributen. Bayessche Netze sind zur Berechnung eines abstrakten Nutzens ungeeignet, da ausschließlich Aussagen über die diskreten Knoten des Netzes getroffen werden können. Da aber eine stetige Nutzenfunktion erforderlich ist, kann dieses Kriterium mit bayesschen Netzen nicht erfüllt werden.

Das Kriterium hinsichtlich der Operationalisierung latenter Variablen wird von Fuzzyinferenz, künstlichen neuronalen Netzen und bayesschen Netzen erfüllt. Entscheidungsbäume erfüllen das Kriterium nicht.

Fuzzyinferenz ist gut geeignet zur Abbildung latenter Variablen, da zwischen den linguistischen Variablen zur Ein- und Ausgabe in das System prinzipiell beliebig viele weitere linguistische Variablen liegen können. Diese intermediären Variablen können als latente Variablen genutzt werden, sodass mit einem Teil der Regelbasis zunächst intermediäre Variablen auf Grundlage der Eingabewerte und der dazugehörigen linguistischen Variablen operationalisiert werden können, anschließend mit einem weiteren Teil der Regelbasis Aussagen auf Grundlage der intermediären Variablen über die Ausgaben des Fuzzyinferenzsystems getroffen werden können. Auch künstliche neuronale Netze können das Kriterium erfüllen, indem das Netz um einen oder mehr Hidden Layer erweitert wird, deren Neuronen die latenten Variablen repräsentieren. Je nach Gewichtung der Eingangsverbindungen in ein solches Neuron kann die damit abgebildete latente Variable durch ein oder mehr Neuronen in der Eingabeschicht oder in vorherigen Hidden Layern operationalisiert werden. Bayessche Netze ermöglichen ebenfalls die Operationalisierung latenter Variablen, indem diese als bedingte Variablen modelliert werden. Bei der kausalen Inferenz innerhalb des bayesschen Netzes von den Ursachen einer Entscheidung zu den Effekten können sich Veränderungen an einem oder mehreren Elternknoten einer solchen bedingten Variable im Graphen des bayesschen Netzes auf die latente Variable auswirken, welche sich wiederum auf den zu beobachtenden Effekt auswirken. Entscheidungsbäume sind durch ihre vollständig hierarchische Struktur zur expliziten Abbildung von latenten Variablen ungeeignet. Da Entscheidungsbäume lediglich eine Verkettung von Teilentscheidungen auf Grundlage ihrer Eingabewerte repräsentieren, besteht keine praktikable Möglichkeit, latente Variablen als Zwischenschritte der Entscheidungsfindung abzubilden.

Das Kriterium zu einem insgesamt deterministischen Ablauf der Entscheidungsfindung wird von Fuzzyinferenz, künstlichen neuronalen Netzen und Entscheidungsbäumen erfüllt. Bayessche Netze erfüllen das Kriterium nicht.

Fuzzyinferenz ist ein grundsätzlich deterministisches Verfahren, bei dem die gleichen Eingaben stets zu den gleichen Ausgaben führen. Eine als Type-2-Fuzzyinferenz bezeichnete Erweiterung der in Abschnitt 2.3.2.1 beschriebenen und zur Abgrenzung dementsprechend als Type-1-Fuzzyinferenz bezeichneten Arten der Mamdani- und Takagi-Sugeno-Inferenz ist jedoch möglich, um neben Unschärfe auch Unsicherheit in die Inferenz mit aufzunehmen (ZADEH, 1975, S. 242). Diese erweitert zwar die Fuzzifizierung von Eingabewerten um eine zusätzliche Dimension der Unsicherheit, um unterschiedliche Definitionen des gleichen

linguistischen Terms zu modellieren. Die Inferenz und Defuzzifizierung zur Bestimmung eines scharfen Ausgabewertes erfolgen dennoch deterministisch (MENDEL et al., 2014, S. 7–9; ANTÃO, 2017, S. 17 f.). Die Ausgaben eines künstlichen neuronalen Netzes sind ebenfalls deterministisch. Im Rahmen von maschinellem Lernen kann das Trainieren eines künstlichen neuronalen Netzes zwar gegebenenfalls probabilistische Aspekte wie eine zufällige Gewichtung der Verbindungen zu Beginn des Trainings umfassen, diese Tatsache ist jedoch für diese Arbeit unerheblich, da die mit dem auszuwählenden Verfahren der Computational Intelligence abzubildenden sozialwissenschaftlichen Modelle als bereits gegeben beziehungsweise trainiert anzunehmen sind. Auch Entscheidungsbäume können vollständig deterministisch formuliert werden. Probabilistische Teilentscheidungen sind zwar durch Teilentscheidungen mit unsicheren Möglichkeiten (Englisch: chance node) prinzipiell mit Entscheidungsbäumen abbildbar, dies ist jedoch nicht zwingend nötig (KAMIŃSKI et al., 2018, S. 138). Ein Entscheidungsbaum ohne probabilistische Teilentscheidungen führt bei gleichen Eingaben stets zu den gleichen Ausgaben. Bayessche Netze hingegen sind inhärent probabilistisch, sodass eine durch Inferenz mit einem bayesschen Netz begründete Entscheidung nicht eindeutig auf die Eingaben zurückzuführen ist. Um insbesondere Einzelentscheidungen individueller Simulationsagenten nachvollziehbar zu machen, sind bayessche Netze daher nicht geeignet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bayessche Netze und Entscheidungsbäume mindestens eines der aufgestellten Kriterien für das auszuwählende Verfahren der Computational Intelligence nicht erfüllen. Fuzzyinferenz und künstliche neuronale Netze sind prinzipiell geeignet, um als Verfahren zur Entscheidungsfindung der Simulationsagenten des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems eingesetzt zu werden. Die entscheidenden Vorteile von Fuzzyinferenz gegenüber künstlichen neuronalen Netzen liegen vor allem in der einfacheren Modellierung auf Grundlage eines sozialwissenschaftlichen Modells. Durch die natürlichsprachliche Formulierung der Regelbasis eines Fuzzyinferenzsystems ist davon auszugehen, dass die wesentlichen Beziehungen zwischen den entscheidungsrelevanten Attributen, den latenten Variablen und den wahrgenommenen subjektiven Nutzen im Vergleich zu künstlichen neuronalen Netzen einfacher durchzuführen und anschließend nachzuvollziehen sind. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass die linguistischen Variablen und linguistischen Terme eines Fuzzyinferenzsystems besonders geeignet sind, um unterschiedliche qualitative und quantitative sozialwissenschaftliche Modelle abbilden zu können. Die linguistischen Terme können beispielsweise, je nach Komplexität des sozialwissenschaftlichen Modells, zur unscharfen Kategorisierung von entscheidungsrelevanten Attributen und latenten Variablen oder zur Modellierung durch geeignete mathematische Funktionen auf Grundlage quantitativer Daten eingesetzt werden. Die typischerweise natürlichsprachliche Bezeichnung der linguistischen Variablen und Terme erleichtert zudem die spätere Nachvollziehbarkeit des abgebildeten sozialwissenschaftlichen Modells.

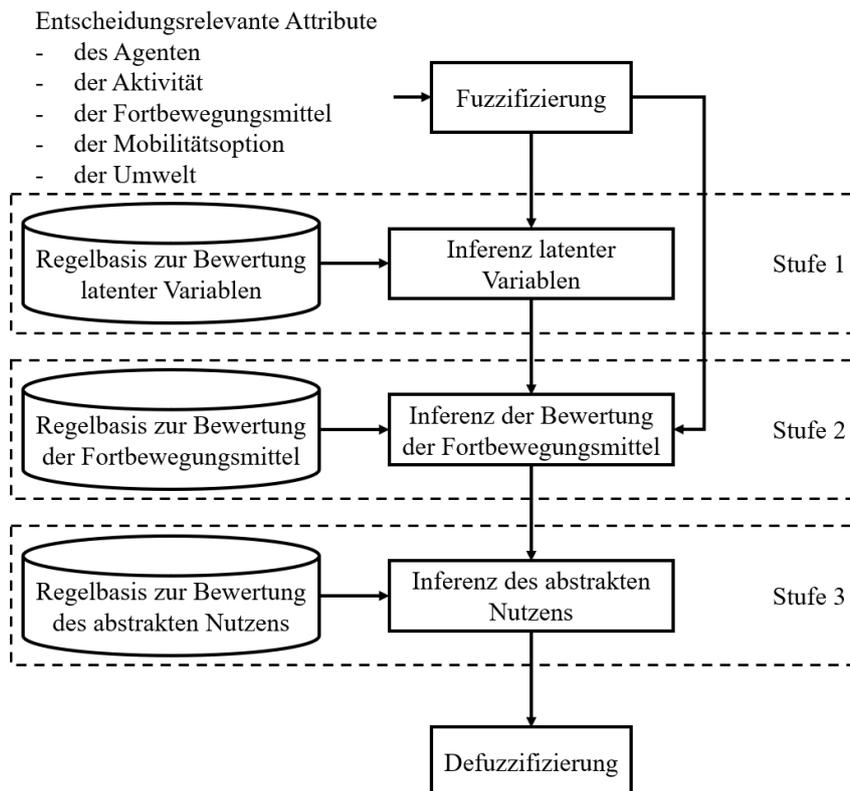
Insgesamt wird die Entscheidungsfindung eines Simulationsagenten aus diesen Gründen als Fuzzyinferenzsystem konzipiert. Auch vor dem Hintergrund der in Anforderung A01 geforderten Naturanalogie scheint Fuzzyinferenz durch ihre Natürlichsprachlichkeit besonders geeignet.

### 5.2.3 Fuzzyinferenz zur Entscheidung für Mobilitätsoptionen

Zur Bestimmung des Nutzens der Mobilitätsoptionen eines Agenten des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems wird ein Konzept für ein Fuzzyinferenzsystem benötigt, das im Sinne von Anforderung A12 als generisches Inferenzmodell zur Abbildung beliebiger sozialwissenschaftlichen Modelle genutzt werden kann. Anzahl und Art der entscheidungsrelevanten Attribute, Entscheidungsgründe und latenten Variablen sind dazu einerseits vom sozialwissenschaftlichen Modell und andererseits von den Fortbewegungsmitteln der Mobilitätsoptionen abhängig.

Das Konzept des Fuzzyinferenzsystems besteht dementsprechend aus drei aufeinander folgenden Inferenzstufen, die für die Operationalisierung latenter Variablen, die Bewertung der zu einer Mobilitätsoption gehörigen Fortbewegungsmittel und die Bestimmung des abstrakten Nutzens einer Mobilitätsoption zuständig sind.

In Abbildung 5.5 ist dieses Konzept dargestellt. Es besteht aus der Fuzzifizierung der entscheidungsrelevanten Attribute, dreier hierarchischer Stufen der Inferenz und der abschließenden Defuzzifizierung zur Bestimmung des Nutzens einer Mobilitätsoption. Zur besseren Unterscheidung der drei Stufen ist auch die Regelbasis des gesamten Systems in drei separate Regelbasen aufgeteilt, um die inhaltliche Zuordnung zu den drei Stufen zu erleichtern.



**Abbildung 5.5:** Dreistufiges, generisches Inferenzmodell des Fuzzyinferenzsystems zur Bestimmung des Nutzens einer beliebigen Mobilitätsoption.

Vor der ersten Inferenzstufe werden alle verfügbaren entscheidungsrelevanten Attribute fuzzifiziert. Prinzipiell wird dazu für jedes entscheidungsrelevante Attribut eine linguisti-

sche Variable benötigt, die das jeweilige Attribut in fuzzifizierter Form repräsentieren kann. Abhängig vom konkreten sozialwissenschaftlichen Modell und dem jeweiligen entscheidungsrelevanten Attribut können dazu unterschiedliche Arten von Zugehörigkeitsfunktionen für die jeweiligen linguistischen Terme eingesetzt werden. Beispielsweise liegt es nahe, nominale Attribute wie das Geschlecht eines Agenten oder die Art der verfolgten Aktivität als Singletons in den jeweiligen linguistischen Variablen abzubilden, sodass für ein beliebiges Attribut stets nur für exakt einen linguistischen Term eine Zugehörigkeit  $\mu = 1$  berechnet wird und 0 für alle anderen Terme. Für nominale Attribute dient die Fuzzifizierung also primär zur Repräsentierung des jeweiligen Attributs durch einen natürlichsprachlichen Begriff. Demgegenüber bieten sich zur Fuzzifizierung ordinaler und insbesondere kardinaler Attribute, wie es beispielsweise Distanzen oder Zeitspannen sind, linguistische Terme mit unscharfen Zugehörigkeitsfunktionen an, sodass natürlichsprachliche Begriffe wie lange oder kurze Distanzen und Dauern durch die Fuzzifizierung abgebildet werden können. Unabhängig von den konkreten linguistischen Termen beziehungsweise Zugehörigkeitsfunktionen ist das Ergebnis der Fuzzifizierung jedoch die Abbildung der entscheidungsrelevanten Attribute auf die vorhandenen Terme.

Nach der Fuzzifizierung der entscheidungsrelevanten Attribute erfolgt die erste Inferenzstufe zur Bestimmung der Ausprägungen latenter Variablen, die für die weitere Entscheidungsfindung notwendig sein können. Wie bereits in Abschnitt 5.2.2.1 dargestellt, müssen subjektive Wahrnehmungen, wie beispielsweise das Sicherheitsgefühl, gegebenenfalls aus mehr als einem entscheidungsrelevanten Attribut aggregiert werden. Jede latente Variable muss dazu als linguistische Variable mit geeigneten linguistischen Termen abgebildet werden. Zur natürlichsprachlichen Beschreibung des Sicherheitsgefühls könnten dies beispielsweise die Begriffe gut und schlecht sein. Als Zugehörigkeitsfunktionen der in der ersten Inferenzstufe genutzten linguistischen Terme werden ausschließlich Singletons genutzt, da nach der ersten Inferenzstufe keine Defuzzifizierung erfolgt und eine detaillierte Zuordnung der linguistischen Terme zu einem Definitionsbereich daher nicht erforderlich ist. Die Regelbasis zur Inferenz der latenten Variablen enthält dementsprechend Fuzzyregeln, welche die Beziehung zwischen fuzzifizierten entscheidungsrelevanten Attributen und den linguistischen Termen wesentlicher latenter Variablen in Form von Konditionalregeln herstellen. Ob aussagenlogische Junktoren wie Negation, Konjunktion oder Disjunktion im Antezedens einer Regel benötigt werden, hängt vom abzubildenden sozialwissenschaftlichen Modell ab. Die Notwendigkeit einer Inferenz latenter Variablen für die weitere Entscheidungsfindung ist ebenfalls vom konkreten sozialwissenschaftlichen Modell abhängig. Falls sich sämtliche Regeln zur Inferenz der Bewertung der Fortbewegungsmittel einer Mobilitätsoption unmittelbar auf die fuzzifizierten entscheidungsrelevanten Attribute beziehen, werden die Ausprägungen möglicher latenter Variablen dementsprechend nicht benötigt. Ergebnis der ersten Inferenzstufe sind die Aktivierungsgrade der Regelbasis und daraus die Zugehörigkeitsgrade der linguistischen Terme der latenten Variablen. Diese bilden so zusammen mit der Fuzzifizierung die subjektive Wahrnehmung eines Simulationsagenten im Kontext der Entscheidung ab.

Die zweite Inferenzstufe dient zur Bewertung der einzelnen Fortbewegungsmittel, die zu der jeweiligen Mobilitätsoption gehören. Jedes Fortbewegungsmittel wird dazu durch eine linguistische Variable repräsentiert. Als linguistische Terme werden, wie auch in der ersten Inferenzstufe, Singletons genutzt, welche die Akzeptanz oder Ablehnung des jeweiligen Fortbewegungsmittels abbilden. Die genaue Gestaltung, Benennung und Anzahl der linguistischen Terme hängt vom jeweiligen sozialwissenschaftlichen Modell ab, um positive und negative Einflüsse auf die Bereitschaft zur Nutzung eines Fortbewegungsmittels abbilden zu können, sind jedoch wenigstens zwei Terme erforderlich. Die Regelbasis der zweiten Inferenzstufe enthält die Entscheidungsgründe für oder gegen einzelne Fortbewegungsmittel in Form von Fuzzyregeln. Eine Fuzzyregel zur Bewertung eines Fortbewegungsmittels stellt einen Zusammenhang zwischen wenigstens einem fuzzifizierten entscheidungsrelevanten Attribut oder einer latenten Variable auf der einen Seite und einem Fortbewegungsmittel auf der anderen Seite dar. Wie auch in der ersten Stufe ist die Formulierung einer konkreten Fuzzyregel abhängig vom jeweiligen sozialwissenschaftlichen Modell. Nach der zweiten Inferenzstufe liegen damit einzelne Zugehörigkeitsgrade für die Akzeptanz oder Ablehnung aller Fortbewegungsmittel der zu bewertenden Mobilitätsoption vor. Wie viele und welche Fortbewegungsmittel tatsächlich eine Rolle bei der Entscheidung spielen, hängt von der Mobilitätsoption ab. Beispielsweise enthält eine Mobilitätsoption, bestehend aus einer Fahrt mit einem Auto von Start bis Ziel, dementsprechend nur ein Fortbewegungsmittel, während eine komplexere intermodale Verkehrskette aus wenigstens zwei prinzipiell beliebigen Fortbewegungsmitteln bestehen kann.

Die dritte und letzte Inferenzstufe vereinheitlicht die einzelnen Bewertungen der Fortbewegungsmittel aus der zweiten Stufe hinsichtlich eines abstrakten Nutzens der Mobilitätsoption, um die Güte dieser mit anderen vergleichbar zu machen. Dementsprechend enthält sie lediglich eine einzige linguistische Variable, die den Nutzen der Mobilitätsoption repräsentiert. Auch für die linguistischen Terme dieser Variable werden Singletons benutzt, die beispielsweise guten oder schlechten Nutzen repräsentieren. Da diese Terme im Gegensatz zu denen der ersten und zweiten Inferenzstufe zur anschließenden Defuzzifizierung genutzt werden, ist der ihnen zugeordnete Wert entscheidend für das Intervall, in dem der abstrakte Nutzen abgebildet wird. Naheliegend sind beispielsweise Werte von 1 für guten Nutzen und -1 für schlechten Nutzen, um bei der Defuzzifizierung einen Nutzen im Intervall  $[-1, 1]$  erwarten zu können. Die Regelbasis der dritten Inferenzstufe ergibt sich im Gegensatz zu denen der ersten und zweiten Stufe nicht mehr zwangsweise aus einem sozialwissenschaftlichen Modell, vielmehr dient sie dazu, die Akzeptanz von Fortbewegungsmitteln auf einen guten Nutzen und deren Ablehnung auf einen schlechten Nutzen abzubilden. Im trivialen Fall einer Mobilitätsoption mit lediglich einem Fortbewegungsmittel entsprechen Zugehörigkeiten der linguistischen Terme in der dritten Stufe unmittelbar denen in der zweiten, bei einer Mobilitätsoption mit mehreren Fortbewegungsmitteln werden die einzelnen Akzeptanzen und Ablehnungen somit jedoch in den linguistischen Termen der dritten Inferenzstufe aggregiert. Ergebnis der dritten Inferenzstufe ist daher die Zugehörigkeit der einzelnen linguistischen

Terme der linguistischen Variable für den abstrakten Nutzen, das obenstehende Beispiel aufgreifend also eine Zugehörigkeit für guten Nutzen und eine für schlechten Nutzen.

Die Defuzzifizierung als letzter Teilschritt der Bewertung einer Mobilitätsoption dient dazu, aus den Zugehörigkeiten der einzelnen linguistischen Terme nach der dritten Inferenzstufe einen einzelnen, scharfen Wert zu berechnen. Da es sich bei den linguistischen Termen der dritten Inferenzstufe ausnahmslos um Singletons handelt, erfordert die Berechnung des scharfen Nutzens keine geometrische Defuzzifizierung mit Methoden wie beispielsweise der Flächenschwerpunktfunktion. Wie in Abschnitt 2.3.2.1 beschrieben, ist eine Unterscheidung zwischen Mamdani-Inferenz und Takagi-Sugeno-Inferenz in diesem Fall daher nicht nötig, die Defuzzifizierung erfolgt in beiden Fällen funktional äquivalent mit beispielsweise einem gewichteten Mittelwert oder einer gewichteten Summe. Die den Singletons zugeordneten Werte, beispielsweise 1 für guten Nutzen und  $-1$  für schlechten Nutzen, treten dazu an die Stelle der Gewichte, mit denen die Aktivierungsgrade der Regeln der dritten Inferenzstufe multipliziert werden.

Zusammenfassend handelt es sich bei dem Konzept für das durch die Simulationsagenten zu nutzende Fuzzyinferenzsystem damit um ein generisches Inferenzmodell, das für beliebige entscheidungsrelevante Attribute, Fuzzyregeln und linguistische Variablen eingesetzt werden kann. Es bestehen keine grundsätzlichen Einschränkungen, ob und welche Attribute, Entscheidungsgründe, latenten Variablen oder Fortbewegungsmittel in der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden müssen. Zwar ließen sich auch Entscheidungssysteme formulieren, bei denen die entscheidungsrelevanten Attribute in einem komplexen Schritt unmittelbar zur Bestimmung des abstrakten Nutzens eingesetzt würden, der Aufwand zur Erstellung, Nachvollziehbarkeit und Wartbarkeit eines solchen Systems ist jedoch als ungleich höher einzuschätzen. Insbesondere würden kleine Änderungen an einzelnen Fuzzyregeln oder linguistischen Variablen im Rahmen von experimentellen Simulationsstudien somit deutlich erschwert.

Aus Sicht der in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Ansätze der multikriteriellen Entscheidungsfindung handelt es sich bei dem Konzept für das durch die Simulationsagenten zu nutzende Fuzzyinferenzsystem im Kern um ein Verfahren zur Gewichtung von Kriterien ohne vorgegebene Zielwerte. Analog zur Beschreibung in Abschnitt 5.2.1 werden Aktivierungsgrade und Gewichte, in diesem Fall in einem mehrstufigen Verfahren, letztendlich mit gewichtetem Mittelwert oder gewichteter Summe als Ausgabefunktion verrechnet, um zu einem Ergebnis zu gelangen.

#### 5.2.4 Methode zur Erstellung eines Fuzzyinferenzsystems

Zur systematischen Erstellung eines konkreten, dem im Abschnitt 5.2.3 vorgestellten Konzept folgenden Fuzzyinferenzsystems auf Grundlage eines sozialwissenschaftlichen Modells ist eine Methode erforderlich, welche die komplexe Erstellung in einzelne Schritte zerlegt. Dazu werden im Folgenden neun Schritte vorgeschlagen, die einen potenziellen Anwender des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems auf Grundlage eines durch einen Sozial-

wissenschaftler bereitgestellten sozialwissenschaftlichen Modells durch die Erstellung eines Fuzzyinferenzsystems führen.

Die Methode ist generisch für beliebige Modellarten formuliert, teilweise können einzelne Schritte, je nach Inhalt des abzubildenden sozialwissenschaftlichen Modells, gegebenenfalls übergangen werden. Die ersten drei Schritte der Methode adressieren zunächst allgemeine Aspekte des abzubildenden sozialwissenschaftlichen Modells, die weitere Erstellung verläuft insgesamt, entgegen der späteren Nutzung des Fuzzyinferenzsystems, von hinten nach vorne und stellt so die Akzeptanz und Nutzung von Fortbewegungsmitteln als Ergebnis der Entscheidungsfindung an den Anfang der Methode.

**Schritt 1: Funktion zur Defuzzifizierung** Im ersten Schritt zur Erstellung eines Fuzzyinferenzsystems sollte die zu nutzende Funktion zur Defuzzifizierung gewählt werden, um die Grundsatzentscheidung zu treffen, ob das Intervall, auf das der mit dem Fuzzyinferenzsystem zu bestimmende abstrakte Nutzen abgebildet werden soll, beschränkt oder unbeschränkt sein soll.

Da die linguistische Variable der dritten und letzten Inferenzstufe, wie in Abschnitt 5.2.3 beschrieben, als linguistische Terme lediglich Singletons vorsieht, kommen als Defuzzifizierungsfunktion der gewichtete Mittelwert oder die gewichtete Summe in Betracht. Nutzung des gewichteten Mittelwerts führt zu einem beschränkten, Nutzung der gewichteten Summe zu einem unbeschränkten Intervall. Durch Nutzung von beschränkten Intervallen können bei gleichen Schranken auch mehrere Fuzzyinferenzsysteme für unterschiedliche Fortbewegungsmittel gleichzeitig innerhalb eines Simulationsexperiments eingesetzt werden. Ein unbeschränktes Intervall hingegen kann den Vergleich und die Interpretierbarkeit von Entscheidungen bei der Auswertung der Ergebnisse eines Simulationsexperiments erleichtern.

Die Wahl der Defuzzifizierungsfunktion ist damit vom eigentlichen Inhalt des abzubildenden sozialwissenschaftlichen Modells unabhängig und ergibt sich stattdessen vorrangig aus dem Zweck und den Zielen der durchzuführenden Simulationsexperimente.

**Schritt 2: Variable der dritten Inferenzstufe** Im zweiten Schritt sollte die linguistische Variable mit der Anzahl und den Werten der dazugehörigen linguistischen Terme der dritten Inferenzstufe definiert werden. Soll der abstrakte Nutzen gemäß Schritt 1 auf ein beschränktes Intervall abgebildet werden, bestimmen der höchste und niedrigste Wert der Singletons die obere und untere Schranke des Intervalls. Für ein unbeschränktes Intervall ergibt sich zumindest die ungefähre Größenordnung des Nutzens aus den Werten der Singletons, da diese als Gewichte bei der Defuzzifizierung eingesetzt werden. Wenn eine Vergleichbarkeit verschiedener Simulationsexperimente ermöglicht werden soll, sollten in diesen die gleichen Singletons in der linguistischen Variable der dritten Inferenzstufe genutzt werden. Scharfe Nutzenwerte aus Entscheidungen mit unterschiedlichen linguistischen Variablen in der dritten Inferenzstufe müssten erst umgerechnet werden, um miteinander verglichen werden zu können.

Die genaue Gestaltung der linguistischen Variable ergibt sich damit weniger aus dem abzubildenden sozialwissenschaftlichen Modell, sondern insbesondere aus dem gewünschten Wertebereich, auf den mögliche Nutzenwerte einer Mobilitätsoption abgebildet werden können sollen.

**Schritt 3: Aggregationsfunktion** Nach der Definition der linguistischen Variable der dritten Inferenzstufe sollte eine Entscheidung hinsichtlich der zu nutzenden Aggregationsfunktionen dieser und aller weiteren linguistischen Variablen getroffen werden. Konkrete t-Conormen wie beispielsweise Maximum, Summe oder nach oben beschränkte Summe haben als Aggregationsfunktion unterschiedliche Auswirkungen darauf, wie sich die Aktivierungsgrade der einzelnen Regeln innerhalb einer Inferenzstufe auf die linguistische Terme der unterschiedlichen linguistischen Variablen auswirken. Je nach gewählter Aggregationsfunktion ist die Entscheidungsfindung eher mit einer wie in Abschnitt 2.4.4.2 beschriebenen, heuristisch getriebenen Entscheidung oder einer wie in Abschnitt 2.4.4.1 beschriebenen vollständig rationalen Entscheidung vergleichbar. Die Wahl einer geeigneten Aggregationsfunktion hängt damit von der Perspektive des abzubildenden sozialwissenschaftlichen Modells ab.

Bei Nutzung der Maximumfunktion wird für jeden linguistischen Term lediglich die am stärksten aktivierte Fuzzyregel berücksichtigt. Diese Funktion ist vergleichbar mit dem aus der Verhaltensökonomie bekannten heuristischen Verhalten, nicht alle, sondern lediglich die deutlichsten Entscheidungsgründe bei der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen. Dies bedeutet jedoch im Gegenzug, dass kein Entscheidungsverhalten abgebildet werden kann, das mehrere Fuzzyregeln hinsichtlich des gleichen linguistischen Terms gleichzeitig berücksichtigen können soll. Insbesondere für unvollständige oder qualitativ erstellte Modelle kann die Maximumfunktion als Aggregationsfunktion empfehlenswert sein, da Teilentscheidungen mit vielen Entscheidungsgründen nicht gegenüber Teilentscheidungen mit wenig Entscheidungsgründen überbewertet werden.

Bei der Aggregation durch Summenbildung hingegen werden sämtliche Aktivierungsgrade addiert, sodass jede Fuzzyregel entsprechend ihres Aktivierungsgrads berücksichtigt wird. So kann im Gegensatz zur Maximumfunktion gewährleistet werden, dass jede Fuzzyregel unabhängig von anderen Regeln bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt wird und viele schwache Aktivierungsgrade gegebenenfalls wenige starke ausgleichen können. Die Funktion birgt jedoch potenziell das Risiko, in einer Inferenzstufe mit erheblich mehr Fuzzyregeln für eine linguistische Variable als für alle anderen, diese überzubewerten. Die Nutzung der Summenfunktion als Aggregationsfunktion ist daher eher für abgeschlossene oder quantitativ berechnete sozialwissenschaftliche Modelle angezeigt.

Als Kompromiss zwischen Maximum und Summe als Aggregationsfunktion kann eine nach oben beschränkte Summe in Erwägung gezogen werden, als Schranke liegt für Fuzzyinferenzsysteme typischerweise der Wert 1 nahe. Bis zum Erreichen der Schranke werden die Aktivierungsgrade der Fuzzyregeln zu einem linguistischen Terms addiert,

überschreiten diese Schranke jedoch nicht. So können einerseits auch wenig aktivierte Fuzzyregeln berücksichtigt werden, solange der Zugehörigkeitsgrad des dazugehörigen linguistischen Terms noch unterhalb der definierten Schranke liegt, andererseits unterscheidet sich der Einfluss verschiedener linguistischer Variablen bei der weiteren Entscheidungsfindung nicht zu stark, da diese durch die Schranke begrenzt werden. Verschiedene linguistische Variablen werden so gleichwertiger in nachfolgenden Inferenzstufen und bei der Defuzzifizierung berücksichtigt.

Die Wahl der passenden Aggregationsfunktion für die linguistischen Variablen des Fuzzyinferenzsystems ergibt sich damit nicht aus dem konkreten Inhalt des abzubildenden sozialwissenschaftlichen Modells, sondern eher aus der Perspektive des Sozialwissenschaftlers auf menschliches Entscheidungsverhalten.

**Schritt 4: Zweite Regelbasis** Im vierten Schritt sollte zunächst die Regelbasis für die zweite Inferenzstufe definiert werden, da ihr Inhalt sowohl für die relevanten Fortbewegungsmittel als auch für mögliche latente Variablen wesentlich ist. Jede einen Entscheidungsgrund des abzubildenden sozialwissenschaftlichen Modells repräsentierende Fuzzyregel sollte eine Aussage über die Akzeptanz oder Ablehnung eines Fortbewegungsmittels auf Grundlage mindestens einer natürlichsprachlich formulierten latenten Variable oder eines natürlichsprachlich formulierten entscheidungsrelevanten Attributs enthalten. Wie bereits in Abschnitt 5.1.3.1 erkannt, sollte bei der Erstellung jeder Fuzzyregel weiterhin berücksichtigt werden, wie mit ihr im potenziellen Fall eines fehlenden entscheidungsrelevanten Attributs umgegangen werden soll, da sie dann während der Inferenz ignoriert werden würde. Dieses Verhalten kann gewünscht sein, kann jedoch alternativ durch Anlegen einer zusätzlichen Regel kompensiert werden, die einen Standardfall beim Fehlen eines entscheidungsrelevanten Attributs beschreibt.

Weiterhin sollte für die Regelbasis eine geeignete t-Norm und t-Conorm zur Berechnung der Konjunktion beziehungsweise der Disjunktion gewählt werden, falls einzelne Fuzzyregeln mehr als eine Proposition enthalten. Minimum- beziehungsweise Maximumfunktion liegen an dieser Stelle nahe, die Entscheidung sollte im Zweifelsfall aus Konsistenzgründen hinsichtlich des Verhaltens des Fuzzyinferenzsystems auch bereits für die Regelbasen der dritten und ersten Inferenzstufe übernommen werden.

Darüber hinaus können die Fuzzyregeln bei Bedarf mit einem Regelgewicht versehen werden, sollte dies vor dem Hintergrund des jeweiligen sozialwissenschaftlichen Modells erforderlich sein oder anderweitig sinnvoll erscheinen.

**Schritt 5: Variablen der zweiten Inferenzstufe** Im fünften Schritt sollten die linguistischen Variablen der zweiten Inferenzstufe sowie die dazugehörigen linguistischen Terme auf Grundlage der Regelbasis der zweiten Inferenzstufe festgelegt werden. Mindestens für jedes der in der Regelbasis der zweiten Inferenzstufe genannten Fortbewegungsmittel muss eine linguistische Variable angelegt werden, die linguistischen Terme jeder Variable müssen in Form von Singletons den Begriffen der Regelbasis der zweiten Inferenzstufe entsprechen. Art und Anzahl der linguistischen Variablen hängen

damit von dieser Regelbasis ab. Zusätzliche Variablen können bei Bedarf angelegt werden, haben jedoch ohne sie betreffende Fuzzyregeln in der Regelbasis der zweiten Inferenzstufe keinen Einfluss auf die Entscheidungsfindung.

**Schritt 6: Dritte Regelbasis** Nachdem die linguistischen Variablen der zweiten Inferenzstufe definiert wurden, sollte die Regelbasis der dritten Inferenzstufe formuliert werden. Dazu wird für jeden linguistischen Term jeder linguistischen Variable der zweiten Inferenzstufe eine Fuzzyregel angelegt, die, je nachdem, ob der Term Akzeptanz oder Ablehnung repräsentiert, einen passenden Zusammenhang zu einem der linguistischen Terme der Variable für den abstrakten Nutzen abbildet. Bei Einhaltung dieser Reihenfolge zur Erstellung eines Fuzzyinferenzsystems ist die Regelbasis der dritten Inferenzstufe minimal und beschreibt Abhängigkeiten des abstrakten Nutzens nur für die Fortbewegungsmittel, die tatsächlich Teil des Modells sind. Auch eine automatisierte Erzeugung dieser Regelbasis ist in dieser Reihenfolge möglich. Konjunktions- und Disjunktionsfunktion sollten im Zweifelsfall aus Schritt 4 übernommen werden, die optionale Gewichtung der Fuzzyregeln ist auch hier vom jeweiligen sozialwissenschaftlichen Modell abhängig.

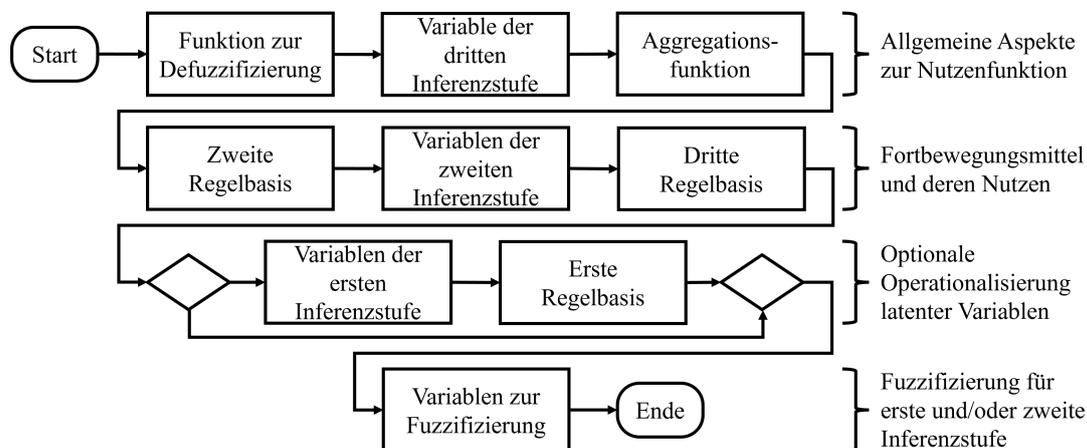
**Schritt 7: Variablen der ersten Inferenzstufe** Auf Grundlage der bereits erstellten Regelbasis der zweiten Inferenzstufe können die für das abzubildende sozialwissenschaftliche Modell wesentlichen latenten Variablen erkannt und als linguistische Variablen für die erste Inferenzstufe abgebildet werden. Falls sich jede der Regeln ausschließlich unmittelbar auf ein entscheidungsrelevantes Attribut bezieht, kann dieser Schritt übersprungen werden. Zur Erstellung sollte, vergleichbar mit Schritt 5, für jede der in einer der Fuzzyregeln der Regelbasis der zweiten Inferenzstufe genannten latenten Variablen eine entsprechende linguistische Variable mit Singletons als linguistische Terme entsprechend der Regel definiert werden.

**Schritt 8: Erste Regelbasis** Falls die Regelbasis der zweiten Inferenzstufe latente Variablen vorsieht und diese in Schritt 7 erstellt wurden, sollte anschließend die Regelbasis der ersten Inferenzstufe definiert werden. Müssen keine latenten Variablen abgebildet werden, kann dementsprechend auch dieser Schritt übersprungen werden. Das Vorgehen zur Erstellung der Regelbasis der ersten Inferenzstufe ist vergleichbar mit dem in Schritt 4. Jede zu erstellende Regel sollte auf Grundlage wenigstens eines natürlich-sprachlich formulierten entscheidungsrelevanten Attributs eine Aussage über einen linguistischen Term einer latenten Variable treffen. Ebenso sollte erwogen werden, wie mit der Regel im Fall fehlender Informationen über das entscheidungsrelevante Attribut umgegangen werden soll. Wie bereits in Schritt 6 beschrieben, sollten Konjunktions- und Disjunktionsfunktion auch an dieser Stelle im Zweifelsfall aus Schritt 4 übernommen werden, die optionale Gewichtung der Fuzzyregeln ist auch hier vom jeweiligen sozialwissenschaftlichen Modell abhängig.

**Schritt 9: Variablen zur Fuzzifizierung** Den letzten Schritt in der Methode zur Erstellung eines Fuzzyinferenzsystems bildet die Formulierung der linguistischen Variablen zur Fuzzifizierung der entscheidungsrelevanten Attribute. Dazu sollte für jedes entscheidungsrelevante Attribut in den Antezedenzen der in Schritt 4 oder Schritt 8 erstellten Fuzzyregeln eine linguistische Variable angelegt werden.

Die besondere Herausforderung in diesem Schritt liegt in der angemessenen, individuellen Definition der Zugehörigkeitsfunktion jedes linguistischen Terms der linguistischen Variablen. Diese können je nach abzubildendem sozialwissenschaftlichen Modell prinzipiell beliebig komplex sein, von wenigen, bei der Modellerstellung durch Regression berechneten linearen Funktionen in quantitativen Modellen hin zu einer Vielzahl subjektiv aus qualitativen Daten abgeleiteter Funktionen pro linguistischer Variable. Insgesamt sind Funktionsverlauf und Anzahl der linguistischen Terme vollständig abhängig von Art und Inhalt des abzubildenden sozialwissenschaftlichen Modells. Weiterhin ist bei der Wahl einer Zugehörigkeitsfunktion eines linguistischen Terms die Art des abzubildenden Attributs zu berücksichtigen. Wie in Abschnitt 5.2.3 beschrieben liegt es nahe, für nominale Attribute Singletons einzusetzen, während für ordinale und insbesondere kardinale Attribute auch stetige Funktionen in Betracht kommen.

In Abbildung 5.6 sind die neun Schritte der Methode zur Erstellung eines Fuzzyinferenzsystems grafisch zusammengefasst. Zur erleichterten Erkennung ihres hauptsächlichen Zwecks sind diese dort zusätzlich inhaltlich gruppiert.



**Abbildung 5.6:** Schritte der Methode zur Erstellung eines Fuzzyinferenzsystems.

### 5.3 Beschreibung eines Simulationsszenarios

Das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem muss gemäß Anforderung A03 einen grundsätzlich szenariobasierten Ansatz verfolgen, um die explorative und systematische Untersuchung unterschiedlicher Simulationskonfigurationen und -parameter zu erlauben. Dies wird in Anforderung A10 durch Trennung zwischen der Definition und Ausführung

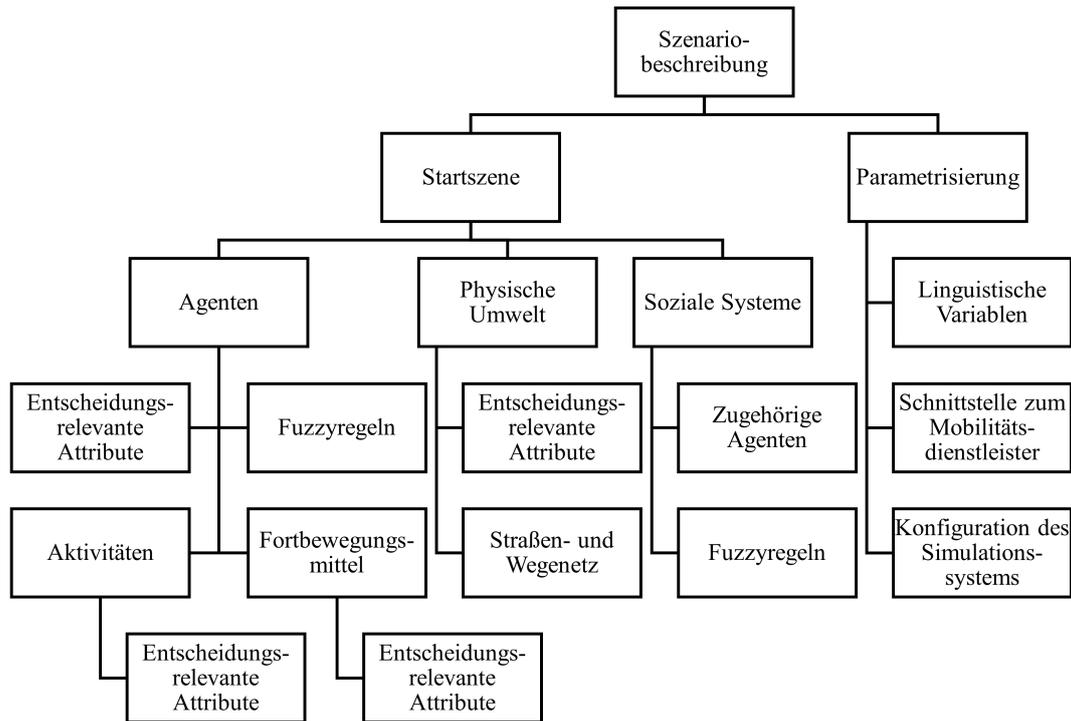
eines Szenarios vertieft. Durch Anforderung A11 ist weiterhin eine Berücksichtigung der Schnittstellen zwischen dem zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem und den in Abschnitt 1.2 genannten und in Abbildung 4.2 dargestellten Stakeholdern notwendig, die im Rahmen einer gemeinsamen Beschreibung eines Simulationsszenarios konsolidiert werden können. Es ist dementsprechend erforderlich, eine allgemeine Struktur zur Beschreibung eines Simulationsszenarios zu definieren, die von einem Anwender genutzt werden kann, um ein Simulationsexperiment für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem zu definieren.

Die in dieser Arbeit genutzte Terminologie zur Differenzierung der einzelnen Elemente eines Simulationsszenarios orientiert sich, wie in Anforderung A03 und Anforderung A04 erwähnt, an den von ULBRICH et al. (2015) vorgeschlagenen Definitionen zur Beschreibung von Verkehrssimulationen. Ein Szenario beschreibt demnach den zeitlichen Verlauf aller Elemente einer Simulation, der interne Zustand der Simulation zu einem Zeitpunkt während des Szenarios wird als Szene bezeichnet (ULBRICH et al., 2015, S. 106, 114). Adaptiert für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem beinhaltet eine Szene demnach erstens die handlungsfähigen Agenten mit ihren Aktivitäten, Attributen und Fähigkeiten, die passive Szenerie, bestehend aus der räumlichen Umgebung mit dem Straßen- und Wegenetz, den Umweltbedingungen, sonstigen relevanten Objekten und den Beziehungen dieser Simulationselemente untereinander und drittens mögliche dynamische Elemente wie in der Szene verfügbare Mobilitätsoptionen oder laufende Entscheidungsprozesse (ULBRICH et al., 2015, S. 107 f.). Ausgehend von einer konkreten *Startszene* entwickelt sich ein Szenario damit während der Simulation abhängig von der konkreten Gestaltung, Umsetzung und Parametrisierung des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems.

Zur vollständigen Definition eines mit dem zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem durchzuführenden Simulationsexperiments ist daher eine im Rahmen dieser Arbeit als *Szenariobeschreibung* bezeichnete inhaltliche Struktur erforderlich. Eine Szenariobeschreibung enthält einerseits die jeweilige Startszene eines Simulationsexperiments, andererseits die Parametrisierung des zur Ausführung genutzten Simulationssystems.

Die Erstellung einer konkreten Szenariobeschreibung entspricht dem als Berechnung bezeichneten zweiten Schritt der in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen und in Abbildung 2.3 dargestellten Simulationspipeline nach BUNGARTZ et al. (2013). Im Rahmen des als Modellierung bezeichneten ersten Schritts der Simulationspipeline muss jedoch zuvor eine generische Struktur festgelegt werden, die zur allgemeinen Beschreibung der Inhalte einer Szenariobeschreibung für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem geeignet ist.

In Abbildung 5.7 ist der hierarchische Aufbau einer Szenariobeschreibung mit ihren wesentlichen Inhalten grafisch dargestellt. Die Grundlage dazu bilden die in Abschnitt 5.1.2.3 herausgearbeiteten und in Abbildung 5.3 dargestellten Modellelemente, die in Abschnitt 5.1.3.1 formulierte und in Tabelle 5.2 dargestellte PEAS-Beschreibung eines Simulationsagenten sowie das in Abschnitt 5.2.3 entwickelte und in Abbildung 5.5 dargestellte generische Inferenzmodell für das Fuzzyinferenzsystem des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems.



**Abbildung 5.7:** Struktur und Inhalt einer Szenariobeschreibung für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem.

Eine Szenariobeschreibung besteht aus zwei wesentlichen Teilen, der Startszene und der Parametrisierung. Die Startszene beschreibt alle Simulationsobjekte mit ihrem Zustand zu Beginn der Simulation, die Parametrisierung enthält alle Informationen, die nicht die Simulationsobjekte, sondern die Eigenschaften des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems selbst beschreiben. Dynamische Elemente wie verfügbare Mobilitätsoptionen oder laufende Entscheidungsprozesse einer Szene müssen in der Startszene einer Szenariobeschreibung nicht abgebildet werden, da diese erst bei der Durchführung des Simulationsexperiments entstehen.

Die Startszene enthält eine Beschreibung aller Agenten eines Simulationsexperiments mit dem zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem. Zentrale Grundlage dieser Beschreibung sind die in Abbildung 5.3 dargestellten Modellelemente, anhand derer einem Agenten seine entscheidungsrelevanten Attribute, Aktivitäten und Fortbewegungsmittel zuzuordnen sind. Mögliche Attribute eines Agenten sind beispielsweise der genaue Wohnort oder andere relevante, soziodemografische Eigenschaften wie Geschlecht oder Alter. Aktivitäten und Fortbewegungsmittel eines Agenten sind ebenfalls mit entscheidungsrelevanten Attributen auszustatten, um diese im Fall einer Aktivität beispielsweise durch Zeit, Dauer und Ort, im Fall eines Fortbewegungsmittels beispielsweise um dessen Art genauer zu spezifizieren. Weiterhin wird jeder Agent in einer Szenariobeschreibung durch seine mit Fuzzyregeln abgebildeten individuellen Entscheidungsgründe charakterisiert.

Neben den Agenten ist auch die physische Umwelt Teil einer Startszene und muss in dieser beschrieben werden. Die Beschreibung der Umwelt muss das Straßen- und Wege-

netz enthalten, in dem die Agenten und ihr Mobilitätsverhalten verortet sein sollen. Größe und Detailgrad des Straßen- und Wegenetzes sollten an die mit dem Simulationsexperiment verfolgten Ziele angepasst werden, bei reiner Betrachtung von motorisiertem Individualverkehr ist beispielsweise eine Abbildung von Rad- und Fußwegen nicht erforderlich. Darüber hinaus kann auch die Umwelt, ebenso wie die Agenten sowie ihre jeweiligen Aktivitäten und Fortbewegungsmittel, durch globale entscheidungsrelevante Attribute wie beispielsweise Wetterangaben beschrieben werden, sollte dies gewünscht sein.

Die dritte Komponente der Startszene einer Szenariobeschreibung sind die sozialen Systeme, die zur Strukturierung der sozialen Umwelt der Simulationsagenten genutzt werden können. Diese bilden den in Abschnitt 5.1.2.3 genannten Hypergraph zur Beschreibung der Beziehungen zwischen den Agenten ab. Ein soziales System wird dazu durch die zugehörigen Agenten sowie gegebenenfalls durch weitere Fuzzyregeln beschrieben, die kollektiv für alle Agenten des sozialen Systems gelten und insbesondere normative Entscheidungsgründe repräsentieren.

Diese deutliche Trennung zwischen den Agenten sowie ihrer physischen und sozialen Umwelt folgt der Empfehlung von BALMER et al. (2004), die mentale Welt innerhalb der Agenten und physische Welt außerhalb für Mobilitätssimulationen zu unterscheiden, und erweitert diese für diese Arbeit um die soziale Umwelt eines Agenten (BALMER et al., 2004, S. 60).

Neben der Startszene ist die übrige Parametrisierung ebenfalls Teil einer Szenariobeschreibung. Diese enthält zum einen die linguistischen Variablen, die innerhalb der Fuzzyregeln der Agenten und sozialen Systeme der Startszene referenziert werden, da diese keinem einzelnen Agenten oder sozialen System explizit zugeordnet sind, sondern Teil des zur Durchführung eines Simulationsexperiments genutzten Simulationssystems sind.

Weiterer Bestandteil der Parametrisierung ist die Schnittstelle zu ausgewählten Mobilitätsdienstleistern, die zur Erzeugung oder zum Bezug von Mobilitätsangeboten genutzt werden soll. Diese bestimmt Art, Anzahl und Detailgrad der Mobilitätsoptionen, die während eines Simulationsexperiments von den Agenten genutzt werden können.

Abschließend enthält die Parametrisierung die übrige technische Konfiguration des Simulationssystems, die spezifisch für das jeweilige Simulationssystem angelegt werden muss. Dies beinhaltet beispielsweise Angaben zur Ausgabe der Ergebnisse eines Simulationsexperiments für die Nutzung durch einen Entscheidungsträger oder benötigte Werte zur Kalibrierung des Simulationssystems.



# Kapitel 6

## Umsetzung

Auf Grundlage des in Kapitel 5 formulierten Konzepts für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem kann in diesem Kapitel dessen softwaretechnische Umsetzung für die Simulation von Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten beschrieben und durchgeführt werden. Hinsichtlich der in Abschnitt 1.2 formulierten Forschungsfragen adressiert dieses Kapitel damit insbesondere Teilfrage 3 nach der konkreten softwaretechnischen Gestaltung.

Inhalt dieses Kapitels sind damit die beiden Phasen des Entwurfs und der Implementierung im in Abschnitt 1.4 beschriebenen Software-Lebenszyklus nach BALZERT (2011). Diese Phasen decken sich weitestgehend mit dem als Berechnung beziehungsweise Implementierung bezeichneten zweiten und dritten Schritt der in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen und in Abbildung 2.3 dargestellten Simulationspipeline nach BUNGARTZ et al. (2013). Weiterhin beinhaltet dieses Kapitel mit der Gestaltung einer grafischen Benutzeroberfläche einen Teil des als Visualisierung bezeichneten vierten Schritts der Simulationspipeline.

In Abgrenzung zum bisher im Rahmen der Anforderungsanalyse in Kapitel 4 und des in Kapitel 5 beschriebenen allgemeinen Konzepts verwendeten Begriff des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems wird ab diesem Kapitel der Begriff des *Prototyps* genutzt, um das konkrete, durch den Entwurf und dessen anschließende Implementierung entstehende Artefakt eindeutig referenzieren und abgrenzen zu können.

Die wesentlichen Herausforderungen dieses Kapitels liegen in der für Anforderung A10 erforderlichen technischen Trennung von Szenarioerstellung und -ausführung sowie in den damit einhergehenden Gestaltungsentscheidungen an die aus Anforderung A11 hervorgehenden Schnittstellen, die Beobachtbarkeit von Simulationsverhalten und -ergebnissen im Sinne von Anforderung A14 und die in Anforderung A15 geforderte Robustheit. Hinsichtlich der in Anforderung A01 geforderten Agentenbasierung detailliert dieses Kapitel damit, im Gegensatz zur im allgemeinen Konzept thematisierten abstrakten Agentenfunktion, die Umsetzung des konkreten technischen Agentenprogramms (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 34 f.).

In diesem Kapitel wird innerhalb technischer Diagramme und Darstellungen, wie in der Softwaretechnik und Systementwicklung üblich, auf rein englischsprachige Bezeichnungen zurückgegriffen (BALZERT, 2011, S. ix–xi). Diese orientieren sich an den deutschsprachigen Begriffen der bisherigen Kapitel und werden gegebenenfalls mit diesen an entsprechender Stelle in Verbindung gebracht.

Den beiden Phasen des Entwurfs und der Implementierung im Software-Lebenszyklus entsprechend ist auch dieses Kapitel in zwei wesentliche Abschnitte unterteilt. In Abschnitt 6.1 wird der strukturelle und funktionale Entwurf, unterteilt in Grob- und Feinentwurf, dargestellt, anschließend werden in Abschnitt 6.2 die relevanten Details zur Anbindung von Mobilitätsdienstleistern, zur technischen Datenstruktur einer Szenariobeschreibung und zur grafischen Benutzeroberfläche des Prototyps während der Implementierung herausgestellt.

## 6.1 Entwurf des Prototyps

Der Entwurf des Prototyps gliedert sich in zwei wesentliche Bereiche, einen technologieagnostischen<sup>53</sup> Grobentwurf der übergeordneten Systemarchitektur und Funktionsweisen sowie einen Feinentwurf zur detaillierten Gestaltung des umzusetzenden Systems (BALZERT, 2011, S. 6).

### 6.1.1 Grobentwurf der Subsysteme

Grundlage für den Grobentwurf des Prototyps bildet das in Kapitel 5 entwickelte allgemeine Konzept des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems. Der Grobentwurf adaptiert dieses Konzept für eine technische Umsetzung und spezifiziert Gestaltungsentscheidungen, die Systemarchitektur und -grenzen sowie die grundsätzlichen technischen Funktionsweisen und Abläufe der Subsysteme.

#### 6.1.1.1 Grundlegende Gestaltungsentscheidungen

Im ersten Schritt des Grobentwurfs des Prototyps können an dieser Stelle, aufbauend auf der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Modellbildung, die grundsätzlichen Gestaltungsentscheidungen für das Simulationsmodell getroffen werden. Dazu sind insbesondere die bereits in Abschnitt 5.1.3.1 ermittelten Einschränkungen und Spielräume hinsichtlich der Aufgabenumgebung eines Agenten sowie ihre Auswirkungen auf Gestaltungsentscheidungen an den Prototyp zu berücksichtigen. Diese werden im Folgenden zunächst mit den in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Unterscheidungsmerkmalen für Simulationsmodelle harmonisiert. Wenn möglich, werden in diesem Zusammenhang auch bereits erste Konfigurationsparameter für den Prototyp identifiziert, deren Ausprägungen Auswirkungen auf den Verlauf und die Ergebnisse eines Simulationsexperiments haben.

**Deterministisches Simulationsmodell** Struktur, Funktionsweise und Algorithmen des Simulationsmodells sind gemäß Anforderung A09 so zu gestalten, dass ein deterministischer Ablauf eines Simulationsexperiments gewährleistet werden kann. Um die Reproduzierbarkeit von Simulationsergebnissen weitestgehend sicherzustellen, können mehrere Gestaltungsentscheidungen getroffen werden. Das Simulationsmodell ist daher grundsätzlich so zu gestalten, dass die Erzeugung und Nutzung von Zufallszahlen

<sup>53</sup>Ein Entwurf wird als technologieagnostisch bezeichnet, wenn dieser keinerlei Vorgaben oder Implikationen für eine genaue technische Umsetzung enthält.

möglichst nicht erforderlich ist. Sollte dies nicht vollständig vermieden werden können, ist zumindest der für den Zufallszahlengenerator zu nutzende Seed<sup>54</sup> als Konfigurationsparameter für den Prototyp zu hinterlegen, damit gleiche Szenariobeschreibungen dennoch zu gleichen Simulationsergebnissen führen.

Weiterhin sind unkontrollierbare technische Wechselwirkungen zwischen den Simulationsagenten innerhalb des Simulationsmodells zu vermeiden. Dazu ist bei der Umsetzung des Prototyps auf die parallele Ausführung von Simulationsagenten durch beispielsweise Multithreading<sup>55</sup> zu verzichten. So kann sichergestellt werden, dass Agenten stets in der gleichen Reihenfolge abgearbeitet und unkontrollierbare Verzögerungen innerhalb einzelner Threads und daraus resultierende Wechselwirkungen vermieden werden können.

Es muss jedoch festgestellt werden, dass eine vollständig deterministische Ausführung eines Simulationsexperiments nicht grundsätzlich zugesichert werden kann. Dies ist insbesondere auf die Tatsache zurückzuführen, dass Funktionsweise und Angebot der zur Erzeugung von Mobilitätsoptionen genutzten Mobilitätsdienstleister nicht als bekannt und unveränderlich vorausgesetzt werden können. Beispielsweise können Weiterentwicklungen auf Seiten eines Mobilitätsdienstleisters zu veränderten Mobilitätsoptionen führen. Außerdem ist denkbar, dass von Mobilitätsdienstleistern genutzte Echtzeitinformationen die bezogenen Mobilitätsoptionen beeinflussen.

**Dynamisches Simulationsmodell** Der Prototyp ist mit einem dynamischen Simulationsmodell auszugestalten, um fundamental in der Lage zu sein, einen beliebig ausgewählten Zeitraum eines Simulationsexperiments abbilden zu können, in dem die Simulationsagenten ihre Aktivitäten verfolgen. Start und Dauer des Simulationszeitraums sind damit als wesentliche Konfigurationsparameter für den Prototyp innerhalb der Szenariobeschreibung zu identifizieren.

**Zeitdiskretes Simulationsmodell** Aufbauend auf der Entscheidung für ein dynamisches Simulationsmodell ist der Prototyp mit einem zeitdiskreten Simulationsmodell auszugestalten. Vor dem Hintergrund, dass real genutzte Fahrpläne und Reisezeitangaben typischerweise minutengenaue Abfahrts-, Ankunfts- und Reisezeiten angeben, liegt es nahe, auch die zeitliche Auflösung des Simulationsmodells entsprechend zu wählen. Der kontinuierliche Zeitverlauf der Realität wird damit innerhalb des Simulationsmodells in einzelne *Simulationsschritte* mit einem gleichmäßigen Abstand von einer Minute zwischen zwei Ereignissen diskretisiert. Eine Anpassbarkeit der zeitlichen Auflösung des Simulationsmodells in Form eines dedizierten Konfigurationsparameters ist daher nicht notwendig. Eine Umsetzung als kontinuierliches Simulationsmodell wäre demge-

---

<sup>54</sup>Ein Seed (Deutsch: Samen) dient als Startwert für einen Zufallszahlengenerator. Ist der Seed der einzige Parameter eines Zufallszahlengenerators, erzeugt dieser stets die gleiche Abfolge von Zufallszahlen.

<sup>55</sup>Ein Thread (Deutsch: Faden) ist eine Sequenz von Anweisungen zur Ausführung auf einem Prozessor. Stehen mehrere Kerne innerhalb eines Prozessors zur Verfügung, können gegebenenfalls mehrere Threads parallel ausgeführt werden (Englisch: multithreading).

genüber erheblich aufwändiger, ohne einen Mehrwert gegenüber einer minutengenauen Diskretisierung der Simulationszeit zu bieten.

Zu unterscheiden ist an dieser Stelle die Umsetzung des Prototyps mit einem dynamischen, zeitdiskreten Simulationsmodell von der in Abschnitt 5.1.3.1 beschriebenen statischen Aufgabenumgebung eines Agenten, die durch das Simulationsmodell bereitgestellt werden muss. Eine statische Aufgabenumgebung ist in diesem Zusammenhang sehr gut vereinbar mit einem dynamischen, zeitdiskreten Simulationsmodell, da die Simulationszeit erst nach der vollständigen Auswertung eines Simulationsschritts voranschreitet. Eine Veränderung der Umwelt der Agenten ist daher in der Zwischenzeit nicht möglich.

Neben diesen drei sich unmittelbar aus den in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Unterscheidungsmerkmalen für Simulationsmodelle ergebenden Gestaltungsentscheidungen können weitere für die Umsetzung des Prototyps getroffen werden.

**Multiagentensystem** Der Prototyp ist als Multiagentensystem für eine prinzipiell beliebige Anzahl an Simulationsagenten zu gestalten, dies ergibt sich insbesondere aus der in Abschnitt 5.1.3.1 festgelegten Aufgabenumgebung eines Agenten. Neben der bereits in Abschnitt 5.1.3.1 adressierten Simulation von prosumerbasierten Peer-to-Peer-Ridesharing-Angeboten ist eine Gestaltung als Multiagentensystem auch deshalb sinnvoll, um statistisch belastbare Ergebnisse zu Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten mit einem Simulationsexperiment bereitstellen zu können. Bei ausreichender Anzahl von Agenten und angemessener Simulationsdauer kann eine Vielzahl von Einzelentscheidungen simuliert werden, die bei der Auswertung beispielsweise aggregiert werden können, um Aussagen über Mobilitätsverhalten unter den für das Simulationsexperiment getroffenen Annahmen treffen zu können. Für den Test und die Evaluation des Prototyps ist auch die Durchführung von Einzelagentensimulationen denkbar, im tatsächlichen Einsatz für das vorgesehene Einsatzgebiet ist jedoch nahezu ausschließlich von Multiagentensimulationen auszugehen. Während die Struktur dieses Multiagentensystems vorrangig in der Startszene einer gemäß Abschnitt 5.3 erstellten Szenariobeschreibung definiert wird, liegt die Ausführungsreihenfolge der Agenten bei der Ereignisverwaltung des Prototyps.

**Episodische und sequenzielle Aufgabenumgebung** Wie bereits in Abschnitt 5.1.3.1 festgestellt, ist die Frage, ob es sich um eine episodische oder sequenzielle Aufgabenumgebung eines Agenten handelt, im Wesentlichen von der konkreten Implementierung und dem Zeithorizont der Vorausplanung eines Simulationsagenten abhängig.

Als Konfigurationsparameter für den Prototyp ist daher anzugeben, ob die zu einer Tour gehörigen Trips grundsätzlich gleichzeitig durch die Simulationsagenten geplant werden müssen oder mit zeitlichem Abstand geplant werden dürfen. Damit einher gehen *Planungshorizont*, *Planungsintervall* und *Planungsende* als wesentliche Konfigurationsparameter. Der Planungshorizont beschreibt, wie viele Zeiteinheiten vor Beginn oder Ende einer Aktivität ein Agent frühestens verfügbare Mobilitätsoptionen ermittelt und bewertet, das Planungsintervall beschreibt den zeitlichen Abstand,

in dem der Agent dies gegebenenfalls erneut durchführt und das Planungsende bestimmt, wie viele Zeiteinheiten vor Beginn einer Aktivität beziehungsweise eines Trips eine Entscheidung spätestens getroffen werden muss. Je nach Wahl dieser Konfigurationsparameter können somit unterschiedlich spontane Simulationsagenten abgebildet werden. Eng verbunden mit Planungsintervall und -ende ist weiterhin der Umgang mit unzuverlässig verfügbaren Mobilitätsoptionen, da Peer-to-Peer-Ridesharing-Angebote potenziell von anderen Agenten vergriffen werden können, wenn diesen nicht unmittelbar zugesagt wird. Daher muss durch einen Konfigurationsparameter zum Umgang mit unzuverlässig verfügbaren Mobilitätsoptionen gesteuert werden können, ob diesen unabhängig von Planungsintervall und -ende durch einen Agenten gegebenenfalls unmittelbar zugesagt werden soll.

**Vollständig und teilweise beobachtbare Aufgabenumgebung** Wie ebenfalls in Abschnitt 5.1.3.1 erkannt, ist auch die Frage, ob innerhalb des Prototyps eine vollständig oder nur teilweise beobachtbare Aufgabenumgebung eines Agenten vorliegt, im Wesentlichen vom in der Szenariobeschreibung eines Simulationsexperiments definierten Fuzzyinferenzsystem abhängig. Stellt der Prototyp alle im Fuzzyinferenzsystem geforderten entscheidungsrelevanten Attribute bereit, handelt es sich um eine vollständig beobachtbare Aufgabenumgebung. Fehlen Attribute, beispielsweise, weil die genutzte Schnittstelle zur Erzeugung von Mobilitätsoptionen diese nicht bereitstellt oder der Prototyp diese aus anderen Gründen nicht anbietet, kann ein Agent seine im Rahmen seiner Entscheidungsfindung relevante Umgebung nur teilweise beobachten. Abschnitt 5.2.4 nennt verschiedene Möglichkeiten, um teilweise beobachtbare Aufgabenumgebungen innerhalb eines Fuzzyinferenzsystems zu kompensieren. Vor dem Hintergrund von Anforderung A15 ist in diesem Zusammenhang insbesondere die Robustheit des Prototyps bei der Wechselwirkung zwischen potenziell fehlenden entscheidungsrelevanten Attributen einerseits und fehlenden Fuzzyregeln des in einer Szenariobeschreibung definierten Fuzzyinferenzsystems andererseits zu berücksichtigen.

**Optionale grafische Benutzeroberfläche** Vor dem Hintergrund von Anforderung A14 ist der Prototyp mit einer einfachen *grafischen Benutzeroberfläche* auszustatten, die durch eine geeignete Visualisierung insbesondere zur fortlaufenden Beobachtbarkeit eines Simulationsexperiments dient. Diese sollte als grafische Darstellung des aktuellen Zustands eines Simulationsexperiments die in der Szenariobeschreibung definierte physische Umwelt mit dem relevanten Straßen- und Wegenetz, den Positionen der Simulationsagenten sowie das Entscheidungsverhalten der Simulationsagenten geeignet darstellen. Wenngleich zu erwarten ist, dass der überwiegende Erkenntnisgewinn eines Simulationsexperiments aus seinen Ergebnissen gezogen wird, ermöglicht die grafische Benutzeroberfläche einem Entscheidungsträger damit bereits während der Laufzeit einen ersten Einblick in das Verhalten der Simulationsagenten.

Dennoch ist die grafische Benutzeroberfläche als optionale Komponente zu gestalten, sodass ein Simulationsexperiment bei Bedarf auch ohne Visualisierung durchgeführt werden kann, um beispielsweise die Laufzeit zu verbessern oder den automatischen Start eines Simulationsexperiments ohne Interaktion mit dem Anwender zu ermöglichen.

**Datumsformat des Prototyps** Bei der Umsetzung des Prototyps sind reale Datums-, Zeit- und Zeitzoneformate zu verwenden, um eine sinnvolle Nutzung der von unterschiedlichen Mobilitätsdienstleistern bereitgestellten Mobilitätsoptionen zu ermöglichen. Um die Datums- und Zeitangaben dieser Mobilitätsoptionen innerhalb des Prototyps nutzbar zu machen, muss dieser daher ebenfalls ein real existierendes Datumsformat nutzen. Eine einfache, simulationsinterne Zeitählung ab Beginn der Simulation ist nicht ausreichend, da so kein Zusammenhang zwischen Datums- und Zeitangaben eines Simulationsexperiments und den von Mobilitätsdienstleistern bereitgestellten Mobilitätsoptionen hergestellt werden kann.

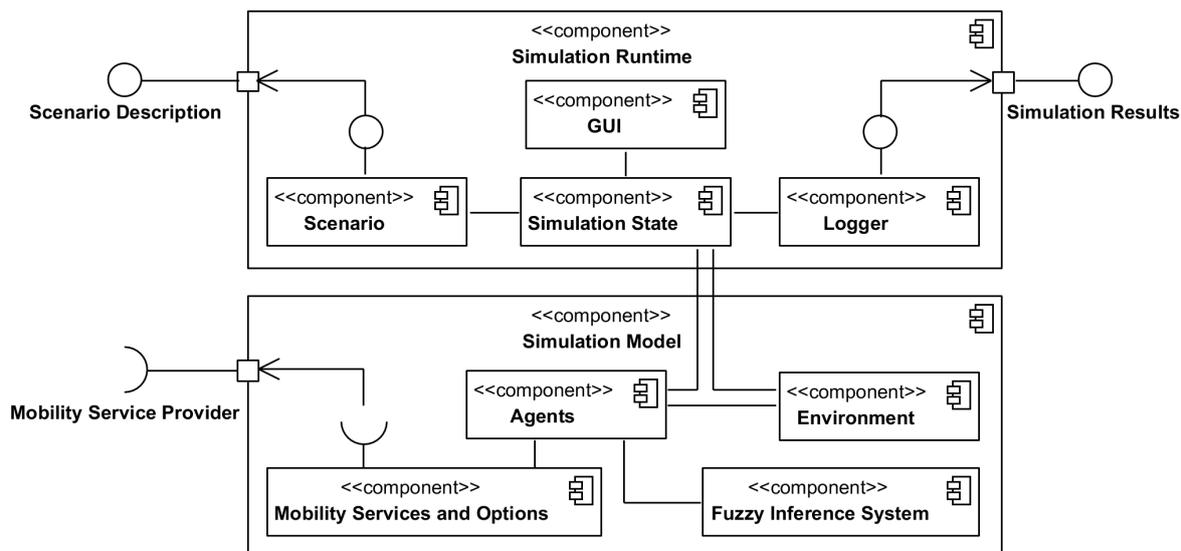
Die Nutzung eines realen Datumsformats ermöglicht über die Ziele dieser Arbeit hinaus zusätzlich die Synchronisation der Zeit eines Simulationsexperiments mit dem Zeitverlauf der Realität. Ein solcher Prototyp kann damit beispielsweise auch zur Durchführung von realistischen Lasttests für die von einem Mobilitätsdienstleister angebotenen Dienste genutzt werden.

Diese Gestaltungsentscheidung hat wesentliche Auswirkungen auf sämtliche Teile einer Szenariobeschreibung mit Datumsbezug. Startzeit und Dauer eines Simulationsexperiments sowie Planungshorizont, -intervall und -ende müssen durch ein reales Datum beziehungsweise reale Zeitfenster beschrieben werden. Für die in einer Szenariobeschreibung enthaltene Startszene bedeutet diese Gestaltungsentscheidung, dass jeder Aktivität eines Agenten ein Beginn, eine Dauer und ein Wochentag zuzuordnen sind, damit aus diesen Angaben zusammen mit der Simulationszeit zur Laufzeit des Prototyps ein genaues Datum für jede Aktivität bestimmt werden kann. Damit ergibt sich weiterhin, dass allen Teilen einer Szenariobeschreibung mit Ortsbezug, beispielsweise Wohnorte von Agenten oder Orte von Aktivitäten, eine Zeitzone zuzuordnen ist, damit datums- und zeitbezogene Informationen korrekt bestimmt werden können.

### 6.1.1.2 Systemarchitektur und Schnittstellen

Auf Grundlage der in Abschnitt 6.1.1.1 getroffenen Gestaltungsentscheidungen kann eine erste Systemarchitektur mit ihren wesentlichen Komponenten und Schnittstellen festgelegt werden. In Abbildung 6.1 ist diese Systemarchitektur in einem UML-Komponentendiagramm grafisch dargestellt.

Die Systemarchitektur besteht aus zwei wesentlichen Subsystemen, einerseits der szenariounabhängigen *Laufzeitumgebung* des Prototyps (Simulation Runtime) zur Steuerung und Verwaltung eines Simulationsexperiments und andererseits dem szenariospezifischen Simulationsmodell (Simulation Model) selbst.



**Abbildung 6.1:** UML-Komponentendiagramm der Systemarchitektur des Prototyps.

**Laufzeitumgebung des Prototyps (Simulation Runtime)** In der Laufzeitumgebung des Prototyps werden sämtliche Komponenten zur Initialisierung und Steuerung eines Simulationsexperiments sowie zur Darstellung und Ausgabe der Simulationsergebnisse zusammengefasst.

Zentrale Komponente der Laufzeitumgebung des Prototyps ist der Zustand der Simulation (Simulation State). Dieser verwaltet ein Simulationsexperiment, indem er die Simulationszeit steuert und diese gegebenenfalls mit der Realzeit synchronisiert. Weiterhin umfasst die Laufzeitumgebung des Prototyps die Ablauf- und Reihenfolgeplanung der einzelnen Simulationsagenten.

Die Komponente Szenario (Scenario) dient zum simulationsinternen Einlesen einer Szenariobeschreibung (Scenario Description), damit der Zustand der Simulation die szenariorelevanten Datenstrukturen des Simulationsmodells initialisieren kann. Die Szenariobeschreibung muss dazu in einem für die Schnittstelle des Prototyps geeigneten Datenformat vorliegen und die in Abschnitt 5.3 beschriebenen Aspekte enthalten.

Die Komponente für die grafische Benutzeroberfläche (GUI) dient zur Auslagerung der Visualisierung des Datenmodells und sonstiger relevanter Informationen des laufenden Simulationsexperiments, damit diese, wie in Abschnitt 6.1.1.1 beschrieben, bei Bedarf vollständig ausgelassen werden kann.

Die Komponente Datenlogger (Logger) schreibt das Simulationsverhalten und Entscheidungen der Agenten mit, um die Simulationsergebnisse (Simulation Results) über eine geeignete Schnittstelle auszugeben und gegebenenfalls zu persistieren.

**Simulationsmodell (Simulation Model)** Das Simulationsmodell-Subsystem wird durch den Zustand der Simulation initialisiert und enthält das szenariospezifische Datenmodell einer Szenariobeschreibung sowie die darin festgelegte Schnittstelle zu einem Mobilitätsdienstleister.

Die Komponente Umwelt (Environment) enthält sowohl die physische als auch die soziale Umwelt der Simulationsagenten. Die physische Umwelt wird durch einen das szenariospezifische Straßen- und Wegenetz repräsentierenden Graphen mit physischen Punkten in einem Koordinatenreferenzsystem abgebildet und enthält außerdem die Simulationsuhr zur simulationsinternen Zeitmessung. Dynamische Objekte, wie beispielsweise Fortbewegungsmittel, sind jedoch kein Teil der physischen Umwelt, sondern der sie besitzenden Agenten. Die soziale Umwelt enthält die szenariospezifischen sozialen Systeme.

Die Komponente für die Simulationsagenten (Agents) beschreibt die Agenten mit ihren sich aus der Szenariobeschreibung ergebenden Datenstrukturen. Diese sind insbesondere die Aktivitäten und Fortbewegungsmittel eines jeden Agenten, sein auf Punkte der physischen Umwelt verweisender Wohnort und aktueller Standort sowie sein Aktivitätsplan, der die zu verfolgenden Aktivitäten anhand der Simulationszeit einordnet. Weiterhin beinhaltet die Komponente die Datenstrukturen für die Planung der Touren und dazugehörigen Trips eines Agenten.

Die zu einem Agenten gehörige Komponente für das Fuzzyinferenzsystem (Fuzzy Inference System) beinhaltet alle zur Bewertung von Mobilitätsoptionen notwendigen Objekte und Funktionen. Diese sind neben der Fuzzyinferenzmaschine selbst die Datenstrukturen für die linguistischen Variablen und die Fuzzyregeln der drei unterschiedlichen Inferenzstufen des in Abschnitt 5.2.3 vorgestellten Konzepts zur Fuzzyinferenz zur Entscheidung für Mobilitätsoptionen.

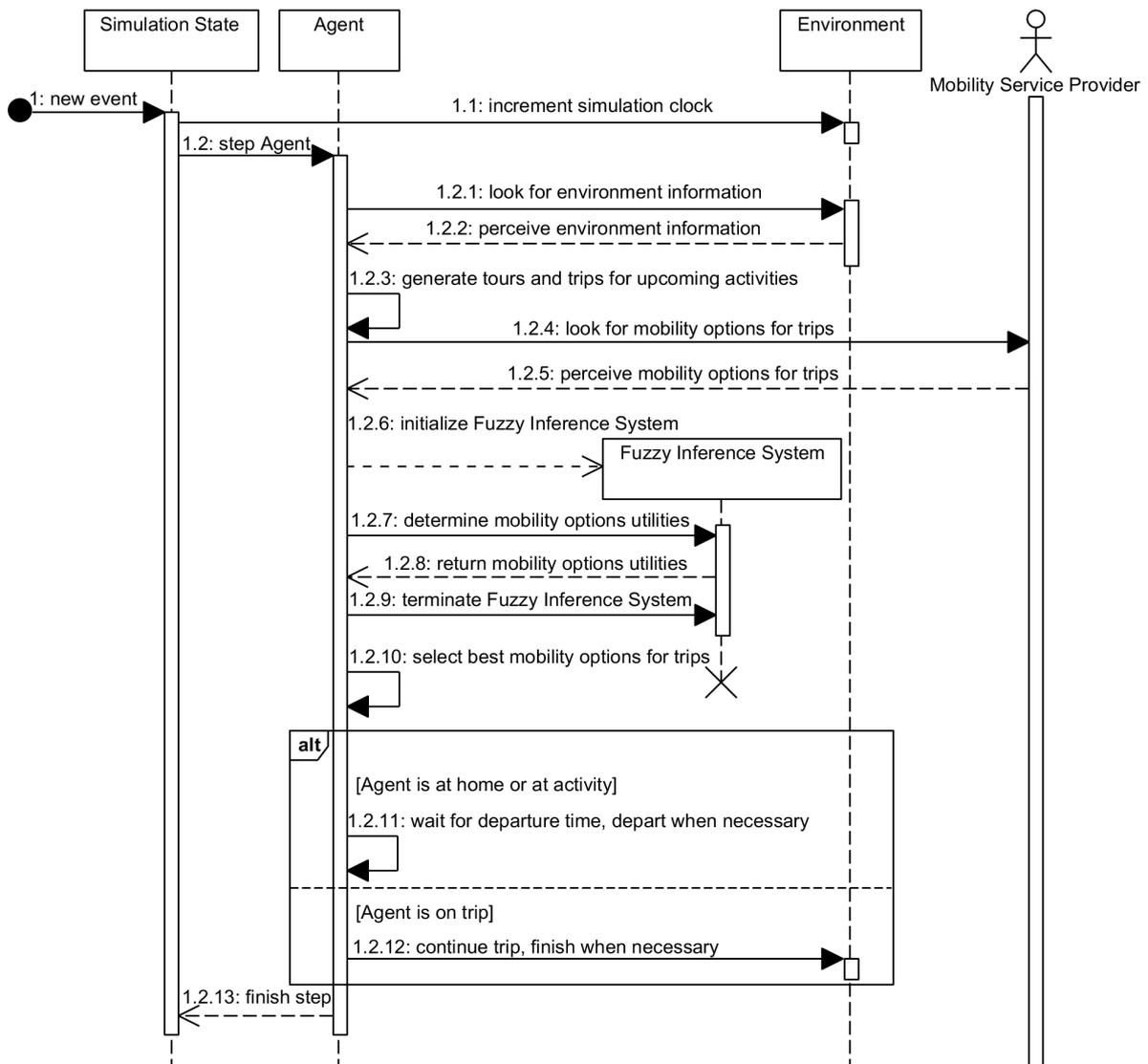
Die Komponente zur Erzeugung von Mobilitätsoptionen (Mobility Services and Options) umfasst die notwendigen Datenstrukturen und Funktionen zum Abruf von Mobilitätsoptionen von einem Mobilitätsdienstleister (Mobility Service Provider). Diese Schnittstelle muss im Zweifelsfall für jeden an den Prototyp anzuschließenden Mobilitätsdienstleister einzeln implementiert werden, da diese kein einheitliches Datenformat zur Beschreibung ihrer Angebote nutzen. Das durch einen Mobilitätsdienstleister bereitgestellte, individuelle Datenmodell wird simulationsintern zu durch die Agenten nutzbaren Mobilitätsoptionen konvertiert.

### 6.1.1.3 Ablauf eines Simulationsschritts zwischen den Komponenten

Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, sind die in gleichmäßigem Abstand auftretenden Ereignisse die zentralen, den Ablauf einer zeitdiskreten Simulation definierenden Elemente. Wie dazu in Abschnitt 6.1.1.1 weiter konkretisiert, ist für den Prototyp eine Zeitauflösung von einer Minute umzusetzen, das heißt, das Denken und Handeln der Simulationsagenten erfolgt in einminütigen Intervallen. Aufbauend auf der in Abschnitt 6.1.1.2 beschriebenen und in Abbildung 6.1 dargestellten Systemarchitektur und den Komponenten des Prototyps kann der Ablauf eines Simulationsschritts innerhalb des Prototyps definiert werden, der ein oben beschriebenes Simulationsereignis repräsentiert.

Abbildung 6.2 zeigt ein UML-Sequenzdiagramm, das den Ablauf eines Simulationsschritts grafisch darstellt. Die Darstellung greift die in Abbildung 6.1 dargestellten Komponenten des Simulationsmodells, den Zustand der Simulation sowie die internen und externen Schnittstellen auf. Der dargestellte Ablauf eines Simulationsschritts nimmt dabei zwei Vereinfachungen an der Darstellung der Systemarchitektur vor. Erstens wird das Zusammenspiel zwischen dem Zustand der Simulation und den Agenten nur für einen Agenten exemplarisch gezeigt. Bei mehr als einem Agenten werden in jedem Simulationsschritt nacheinander alle Agenten durch den Zustand der Simulation abgearbeitet, erst danach schreitet die Simulation weiter. Zweitens ist die Kommunikation zwischen Agent und Mobilitätsdienstleister reduziert dargestellt, indem die Komponente zur Erzeugung von Mobilitätsoptionen zugunsten der Übersichtlichkeit nicht gezeigt wird. Da diese vorrangig zum Abruf von Mobilitätsoptionen sowie zur Konvertierung zwischen Datenformat des Mobilitätsdienstleisters und simulationsinternem Datenformat einer Mobilitätsoption dient, wird in der Darstellung eine direkte Interaktion zwischen dem Agenten und dem vom Prototyp unabhängigen Mobilitätsdienstleister gezeigt.

Auslöser eines Simulationsschritts ist das Auftreten eines neuen Simulationseignisses, entweder der Start eines Simulationsexperiments oder die Beendigung des vorherigen Simulationsschritts durch den Zustand der Simulation (1). Nach Auftreten eines Ereignisses wird durch den Zustand der Simulation die zur Umwelt gehörige Simulationszeit inkrementiert, um den zeitlichen Fortschritt des Simulationsexperiments im Simulationsmodell abzubilden (1.1). Anschließend wird der Simulationsschritt innerhalb des Agenten vom Zustand der Simulation ausgelöst (1.2). Als ersten Teilschritt ruft der Agent seine Perzepte aus der Umwelt ab. Insbesondere sind diese die aktuelle Simulationszeit, die entscheidungsrelevanten Attribute der Umwelt sowie die Fuzzyregeln aus den sozialen Systemen der Umwelt (1.2.1 und 1.2.2). Im Anschluss aktualisiert der Agent seinen Tourenplan, indem er für alle sich nun in seinem Planungshorizont befindlichen Aktivitäten eine Tour, bestehend aus jeweils einem Trip zur Hin- und Rückfahrt, anlegt und anhand des Beginns der dazugehörigen Aktivitäten in den Tourenplan einsortiert (1.2.3). Auf Grundlage dieses Tourenplans ruft der Agent für jeden Trip, der entweder neu angelegt wurde oder dessen Planungsintervall erreicht wurde, die möglichen Mobilitätsoptionen vom Mobilitätsdienstleister ab (1.2.4 und 1.2.5). Nachdem die Mobilitätsoptionen abgerufen wurden, initialisiert der Agent ein Fuzzyinferenzsystem für jede der Mobilitätsoptionen. Zur Initialisierung werden alle relevanten linguistischen Variablen und Fuzzyregeln eingesetzt (1.2.6). Anschließend wird der Nutzen jeder Mobilitätsoption durch Eingabe der verfügbaren entscheidungsrelevanten Attribute in das jeweilige Fuzzyinferenzsystem bestimmt (1.2.7 und 1.2.8). Da jedes Fuzzyinferenzsystem für eine spezifische Mobilitätsoption initialisiert wird, kann es nach der Bestimmung des Nutzens verworfen werden (1.2.9). Nach der Bestimmung des Nutzens jeder Mobilitätsoption kann der Agent jedem Trip seiner bevorstehenden Touren die bestmögliche Mobilitätsoption zuordnen (1.2.10). Im Anschluss führt der Agent eine Handlung durch. Dabei ist zu berücksichtigen, wann der Agent zu seinem nächsten Trip aufbrechen muss oder ob er sich momentan auf einem Trip befindet. Je nach momentaner spatiotemporaler Situation



**Abbildung 6.2:** UML-Sequenzdiagramm eines Simulationsschritts. Die durch Agenten ausgelösten Nachrichten und empfangenen Antworten sind nur für einen einzelnen Agenten exemplarisch dargestellt und werden für jeden Agenten wiederholt, bevor der Simulationsschritt abgeschlossen und zum nächsten vorangeschritten werden kann.

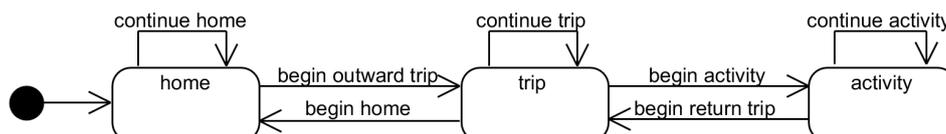
muss der Agent an seinem Wohnort oder dem Ort einer Aktivität auf einen Trip warten oder diesen innerhalb seiner Umwelt beginnen, fortsetzen oder beenden (1.2.11 oder 1.2.12). Nach der Handlung beendet der Agent seinen Simulationsschritt gegenüber dem Zustand der Simulation, sodass der nächste Agent abgearbeitet werden kann (1.2.13).

#### 6.1.1.4 Zustände eines Agenten

Nachdem in Abschnitt 6.1.1.3 der Ablauf eines Simulationsschritts hinsichtlich des Zusammenspiels der wesentlichen Komponenten des Prototyps dargestellt wurde, kann die Funktionsweise eines Agenten genauer spezifiziert werden. Dazu werden zunächst die fundamental

möglichen Aktionen eines Agenten unterschieden und vertieft, die aus der in Abbildung 6.2 angedeuteten Fallunterscheidung zwischen Nachricht 1.2.11 und 1.2.12 hervorgehen.

Abbildung 6.3 zeigt dazu ein UML-Zustandsdiagramm der drei möglichen Zustände Zuhause (home), Unterwegs (trip) und Aktivität (activity) eines Agenten, ein Agent kann sich in genau einem dieser drei möglichen Zustände befinden. Jeder Simulationsschritt im Verlauf eines Simulationsexperiments löst mindestens einen der sieben dargestellten möglichen Zustandsübergänge aus.



**Abbildung 6.3:** UML-Zustandsdiagramm der drei möglichen Zustände eines Simulationsagenten. Jeder Simulationsschritt löst mindestens einen Zustandsübergang aus.

Zu Beginn eines Simulationsexperiments wird jeder Agent an seinem Wohnort im Zustand Zuhause initialisiert. Der Agent verbleibt in jedem Simulationsschritt solange in diesem Zustand, bis der Abreisezeitpunkt für die Hinfahrt (outward trip) zu einer Aktivität erreicht wird. Ist dies der Fall, ändert der Agent seinen Zustand und ist ab diesem Zeitpunkt unterwegs. Typischerweise wird der Agent mehr als einen Simulationsschritt lang unterwegs sein, sodass der Zustand über die Simulationsschritte während des Trips beibehalten wird. Erreicht der Agent das Ende einer Hinfahrt, beginnt er die zu verfolgende Aktivität und führt diese über ihren Zeitraum aus. Die genaue Dauer der Aktivität ergibt sich aus der Ankunftszeit der Hinfahrt beziehungsweise der Abfahrtszeit der Rückfahrt (return trip). Insbesondere bei Angeboten des öffentlichen Verkehrs muss der Agent gegebenenfalls vor Ende der Aktivität zur Rückfahrt aufbrechen oder nach Ende der Aktivität auf den Beginn der Rückfahrt warten. Nach Antritt der Rückfahrt befindet sich der Agent erneut im Zustand Unterwegs und führt diese durch, bis er seinen Wohnort erreicht und seinen Zustand in Zuhause ändert.

Jeder Simulationsschritt löst damit einen Zustandsübergang aus, in überwiegend hypothetischen Randfällen kann jedoch auch mehr als ein Zustandsübergang pro Simulationsschritt auftreten. Triviales Beispiel für einen solchen Randfall ist eine Aktivität am exakten Wohnort eines Agenten. In diesem Fall würde innerhalb des selben Simulationsschritts der Trip zur Aktivität begonnen und beendet werden. Ein anderes Beispiel ist eine Aktivität mit einer kürzeren Dauer als der Zeitauflösung des Prototyps von einer Minute, wie etwa das Einwerfen ein Briefes in einen Briefkasten. In diesem Fall würde die Rückfahrt im selben Simulationsschritt begonnen werden, in dem die Hinfahrt beendet und auch die Aktivität durchgeführt wird.

Insgesamt ist eine derartige Umsetzung als Zustandsautomat notwendig, um die Kontinuität in den Handlungen eines Agenten zwischen den Simulationsschritten zu erhalten.

Insbesondere die Durchführung eines Trips erfordert einen über einen Simulationsschritt hinaus persistenten Zustand eines Agenten.

#### 6.1.1.5 Phasen eines Simulationsschritts innerhalb eines Agenten

Aufbauend auf dem in Abschnitt 6.1.1.3 beschriebenen Ablauf eines Simulationsschritts zwischen den Komponenten des Prototyps und den in Abschnitt 6.1.1.4 definierten Zuständen eines Agenten können die einzelnen Phasen eines Simulationsschritts innerhalb eines Agenten konkretisiert werden. Dies entspricht damit dem Ablauf zwischen Nachricht 1.2 und Antwort 1.2.13 in Abbildung 6.2.

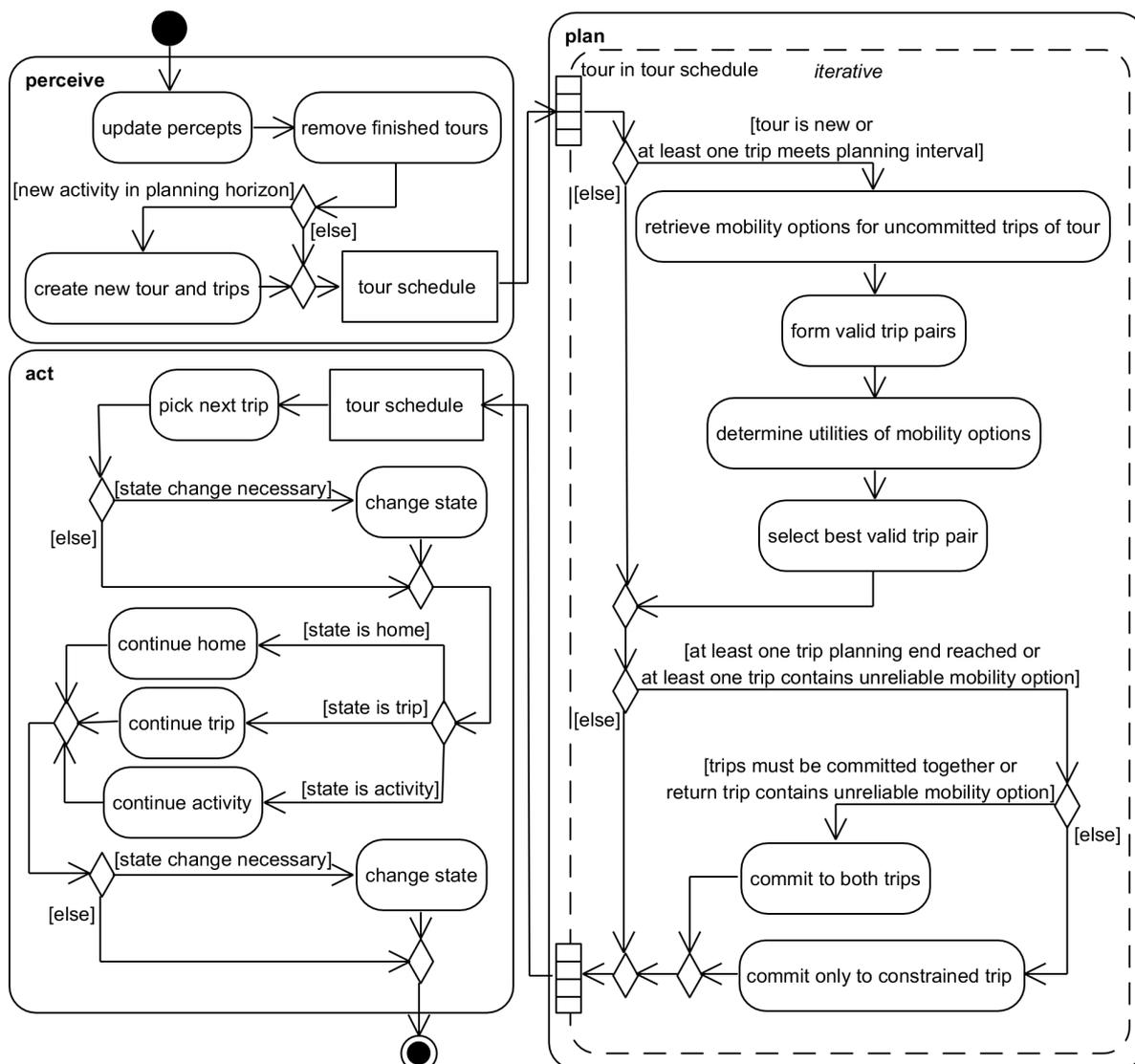
In Abbildung 6.4 ist ein UML-Aktivitätsdiagramm dargestellt, das den algorithmischen Ablauf eines Simulationsschritts und die damit verbundenen Fallunterscheidungen und Schleifen innerhalb eines Agenten genauer spezifiziert. Im Gegensatz dazu wird jedoch die in Abbildung 6.2 noch detailliert dargestellte Interaktion zwischen dem Agenten und den übrigen Komponenten des Prototyps nicht mehr explizit dargestellt. Dennoch kann nicht jede Fallunterscheidung in Abbildung 6.4 dargestellt werden. Die explizit grafisch dargestellten Fallunterscheidungen sind daher jene von besonderer Wichtigkeit für den Ablauf, triviale Fallunterscheidungen werden an entsprechender Stelle lediglich textuell beschrieben.

Zur besseren Unterscheidbarkeit zwischen Aktivitäten im Sinne eines softwaretechnischen Aktivitätsdiagramms und Aktivitäten im Sinne eines aktivitätsbasierten Verkehrsmodells werden erstere im weiteren Verlauf stets explizit als UML-Aktivitäten bezeichnet.

Der Ablauf eines Simulationsschritts innerhalb eines Agenten gliedert sich in drei Phasen, in Abbildung 6.4 dargestellt durch die UML-Aktivitäten Wahrnehmen (perceive), Planen (plan) und Handeln (act). Diese Gliederung entspricht der in Abschnitt 5.1.3.2 beschriebenen und in Abbildung 5.4 dargestellten Agentenarchitektur, die auf der üblichen, in Abschnitt 2.3.1 erläuterten Darstellung basiert.

Das zentrale Objekt eines Agenten zur Durchführung eines Simulationsschritts ist sein Tourenplan (tour schedule). In diesem hält der Agent seine bevorstehenden Touren, bestehend aus einem Trip zur Hinfahrt und einem zur Rückfahrt, vor. Dieser Tourenplan ist eine entsprechend der zu den jeweiligen Touren gehörigen Aktivitäten sortierte Liste.

**Wahrnehmen (perceive)** Die erste UML-Aktivität umfasst sämtliche Aktionen zur Wahrnehmung eines neuen Simulationsschritts. Der Agent aktualisiert dazu seine Perzepte aus der Umwelt, das zunächst wichtigste Perzept ist die aktuelle Simulationszeit, weitere Perzepte wie globale entscheidungsrelevante Attribute oder Fuzzyregeln aus sozialen Systemen werden während der UML-Aktivität zur Wahrnehmung noch nicht unmittelbar benötigt. Hat der Agent im vorherigen Simulationsschritt die oberste Tour seines Tourenplans beendet, entfernt er diese aus dem Plan. Abschließend prüft der Agent, ob sich eine neue Aktivität in seinem Planungshorizont befindet, ist dies der Fall, legt der Agent eine Tour mit der dazugehörigen Hin- und Rückfahrt an und hängt diese an seinen Tourenplan an. Je nach in der Szenariobeschreibung gewähltem Planungshorizont beginnt der Agent daher mit mehr oder weniger viel Vorlaufzeit die Planung



**Abbildung 6.4:** UML-Aktivitätsdiagramm eines Simulationsschritts innerhalb eines Agenten.

seiner bevorstehenden Touren. Ergebnis der UML-Aktivität zur Wahrnehmung ist für den Agenten neben seinen aktualisierten Perzepten sein bereinigter Tourenplan.

**Planen (plan)** Die zweite und komplexeste UML-Aktivität ist die detaillierte Planung der Touren. Der in Abbildung 6.4 gezeigte Ablauf wird dazu iterativ für jede Tour im Tourenplan des Agenten durchlaufen. Die Planung jeder Tour lässt sich in zwei Abschnitte gliedern, einen Abschnitt zur Identifikation und Auswahl von Mobilitätsoptionen und einen Abschnitt zur verbindlichen Festlegung der Trips einer Tour.

Im ersten Abschnitt prüft der Agent, ob die jeweilige Tour zum gegenwärtigen Zeitpunkt überhaupt zu planen ist, Gründe dafür sind entweder die Tatsache, dass die Tour zuvor neu angelegt wurde und dementsprechend noch nie geplant wurde oder dass das in der Szenariobeschreibung definierte Planungsintervall der Tour erreicht wurde und diese daher erneut zu überprüfen ist. Gilt für die Tour keine dieser Be-

dingungen, wird direkt zum zweiten Abschnitt fortgeschritten, andernfalls führt der Agent vier Aktionen zur Bestimmung der bestgeeigneten Mobilitätsoptionen der Tour durch. Dazu ruft dieser für die Trips der Tour, die noch nicht in einem früheren Simulationsschritt verbindlich festgelegt (committed) wurden, die verfügbaren Mobilitätsoptionen vom zu nutzenden Mobilitätsdienstleister ab. Für einen verbindlich festgelegten Trip kann die Mobilitätsoption nicht mehr verändert werden, beispielsweise weil sich der Agent bereits auf diesem Trip befindet. Anschließend bildet der Agent mögliche gültige Paare aus den Mobilitätsoptionen für Hin- und Rückfahrt. Dies ist insbesondere dann notwendig, wenn sowohl Mobilitätsoptionen des Individualverkehrs als auch des öffentlichen Verkehrs zur Verfügung stehen. Soll beispielsweise für die Hinfahrt das Auto eines Agenten genutzt werden, muss dieses konsequenterweise auch für den Rückweg genutzt werden. Mobilitätsoptionen, die nicht für gültige Paare aus Hin- und Rückfahrt genutzt werden können, werden verworfen. Für jede der verbleibenden Mobilitätsoptionen wird danach ihr jeweiliger Nutzen durch ein mit den linguistischen Variablen der Szenariobeschreibung und den agenteneigenen und normativen Fuzzyregeln initialisiertes Fuzzyinferenzsystem bestimmt. Eingabewerte in das Fuzzyinferenzsystem sind die entscheidungsrelevanten Attribute des Agenten und die der mit der Tour verfolgenden Aktivität, die der zu bewertenden Mobilitätsoptionen und die der darin genutzten Fortbewegungsmittel sowie die in der UML-Aktivität zur Wahrnehmung erkannten globalen entscheidungsrelevanten Attribute. Der Nutzen einer gültigen Tour entspricht der Summe des Nutzens der Hin- und Rückfahrt. Sollte einer der Trips bereits verbindlich festgelegt worden sein, kann der Nutzen dieses Trips dementsprechend nicht mehr verändert werden. Nach der Nutzenbestimmung hinterlegt der Agent das beste Paar von Mobilitätsoptionen für Hin- und Rückfahrt in der Tour, womit der erste Abschnitt der UML-Aktivität zur Planung abgeschlossen wird.

Im zweiten Abschnitt bestimmt der Agent, vorwiegend durch Fallunterscheidungen gesteuert, ob wenigstens einer der Trips der Tour nun verbindlich festzulegen ist. Gibt es keinen Anlass, einen der Trips verbindlich festzulegen, wird für die jeweilige Tour auch der zweite Abschnitt unmittelbar beendet. Eine verbindliche Festlegung wird grundsätzlich in zwei möglichen Fällen notwendig. Einerseits kann für wenigstens einen der Trips der Tour das in der Szenariobeschreibung definierte Planungsende erreicht sein und dieser daher nicht mehr verändert werden, da die Abreise unmittelbar bevor steht. Bei einem Planungsende von 0 Minuten legt sich der Agent daher erst zum Simulationszeitpunkt der Abreise verbindlich fest, andernfalls tritt dieser Fall bereits früher ein. Andererseits kann für wenigstens einen der Trips eine unzuverlässige (unreliable) Mobilitätsoption im ersten Abschnitt dieser UML-Aktivität ausgewählt worden sein. Eine unzuverlässige Mobilitätsoption ist ein in seiner Kapazität begrenztes und potenziell verfallendes Angebot, wie beispielsweise ein Ridesharing-Angebot, sodass es, wenn in der Szenariobeschreibung eine unmittelbare verbindliche Festlegung von unzuverlässigen Mobilitätsoption vorgesehen ist, für den Agenten notwendig ist, dieser

unmittelbar zuzusagen, damit diese nicht durch andere Agenten genutzt und vergriffen werden kann. Der durch eine dieser Bedingungen beschränkte (constrained) Trip muss in jedem Fall verbindlich festgelegt werden, allerdings sind zwei weitere Fälle zu berücksichtigen, die zur gleichzeitigen verbindlichen Festlegung beider Trips der jeweiligen Tour führen können. Diese Fälle treten jedoch nur auf, wenn es sich bei dem durch die erste Bedingung beschränkten Trip um die Hinfahrt der jeweiligen Tour handelt. Sollten Hin- und Rückfahrt gemäß Szenariobeschreibung grundsätzlich gleichzeitig verbindlich festgelegt werden müssen oder sollte die Rückfahrt ebenfalls aus einer unzuverlässigen Mobilitätsoption bestehen, dann legt der Agent trotz noch nicht erreichten Planungsendes für die Rückfahrt bereits beide Trips verbindlich fest. Nachdem dieser Prozess für alle Touren im Tourenplan des Agenten durchlaufen wurde, wird die UML-Aktivität zur Planung beendet.

**Handeln (act)** Die dritte und letzte UML-Aktivität dient zur Handlung des Agenten über den durch den Simulationsschritt abgebildeten Zeitraum hinweg. Die UML-Aktivität nutzt den in Abbildung 6.3 dargestellten, internen Zustandsautomaten des Agenten, um entsprechend des Tourenplans des Agenten zu agieren. Auf Grundlage des nächsten bevorstehenden Trips muss der Agent entscheiden, ob ein Zustandswechsel notwendig ist, andernfalls kann er seinen bisherigen Zustand über den Simulationsschritt hinweg fortsetzen. Anschließend prüft der Agent, ob er sein Ziel innerhalb des laufenden Simulationsschritts erreicht und passt seinen Zustand gegebenenfalls dementsprechend an.

## 6.1.2 Feinentwurf der Komponenten

Aufbauend auf dem in Abschnitt 6.1.1 entwickelten Grobentwurf kann ein softwaretechnischer Feinentwurf vorgenommen werden, der die Gestaltungsentscheidungen hinsichtlich der zu nutzenden Technologien und die Struktur, Abhängigkeiten und Funktionsweisen der Komponenten des Prototyps im Detail spezifiziert.

### 6.1.2.1 Technologiestack und Datenformate

Zur Umsetzung von Teilen des Prototyps kommt prinzipiell eine Vielzahl existierender Software-Bibliotheken und -Frameworks (Deutsch: Rahmenstrukturen) in Frage. Festzulegen ist daher an dieser Stelle zunächst der Technologiestack<sup>56</sup> und die damit verbundenen Gestaltungsentscheidungen des Prototyps. Es ist zu bestimmen, für welche Komponenten und Funktionen des Prototyps auf eine externe Software-Bibliothek zurückgegriffen werden kann, da die genaue Funktionsweise jeder Software-Bibliothek potenziell Auswirkungen auf den weiteren Feinentwurf sowie andere Software-Bibliotheken hat. Damit einher geht die Entscheidung für zu nutzende Datenformate an den Schnittstellen des Prototyps sowie gegebenenfalls auch systemintern.

<sup>56</sup>Als Technologiestack einer Anwendung wird die Gesamtheit der genutzten Programmiersprachen und -paradigmen, Software-Bibliotheken und -Frameworks sowie übrigen Technologien bezeichnet.

**Softwarebibliothek für das Multiagentensystem** Vor dem Hintergrund der in Abschnitt 5.1 beschriebenen, deutlich sozialwissenschaftlichen Fundierung der Agenten des Prototyps liegt ein besonderer Fokus auf flexiblen Software-Bibliotheken für Multiagentensysteme für sozialwissenschaftliche Agentensimulationen. Software-Bibliotheken für vorwiegend verteilte Agentensysteme, wie beispielsweise JADE<sup>57</sup>, sind daher weniger geeignet. Im Rahmen dieser Arbeit wird MASON<sup>58</sup> als Software-Bibliothek zur Umsetzung des erforderlichen Multiagentensystems eingesetzt. MASON ist eine quelloffene, ereignisorientierte Simulationsumgebung mit optionaler grafischer Oberfläche für Java, die daher auch als zeitdiskrete Simulationsumgebung genutzt werden kann (LUKE et al., 2005). Gegenüber Alternativen wie beispielsweise Repast<sup>59</sup> ist MASON besonders flexibel, ohne Installation einzubinden und hat keine sonstigen Abhängigkeiten oder speziellen Anforderungen an die Entwicklungsumgebung. Darüber hinaus bietet MASON mit der Erweiterung GeoMason<sup>60</sup> die Möglichkeit, Shapefiles<sup>61</sup> einzulesen und diese als Umwelt der Simulationsagenten darzustellen. Aus der Entscheidung für MASON und GeoMason ergibt sich die Tatsache, dass der Prototyp mit Java umgesetzt wird. Dies ist bei der Entscheidung für weitere Software-Bibliotheken zu berücksichtigen.

**Softwarebibliothek für das Fuzzyinferenzsystem** Als Software-Bibliothek für das umzusetzende Fuzzyinferenzsystem wird auf jfuzzylite<sup>62</sup> zurückgegriffen. Neben der Inferenz von unscharfem Wissen ermöglicht jfuzzylite darüber hinaus das Einlesen von FCL<sup>63</sup>-Dateien, die zur Beschreibung und Persistierung eines Fuzzyinferenzsystems in einer Szenariobeschreibung eingesetzt werden können (IEC 61131-7:2000, S. 23–51).

**Datenformate für Szenariobeschreibung und Simulationsergebnisse** Die Szenariobeschreibungen für ein Simulationsexperiment mit dem Prototyp werden im JSON<sup>64</sup>-Format angegeben (IETF STD 90, 2017). Gegenüber Alternativen wie XML bietet JSON den Vorteil, durch seine starke Objektorientierung auch Datenstrukturen wie Listen ohne zusätzliche Definitionen explizit abbilden zu können. Weiterhin ist JSON kompakter und besser menschenlesbar als XML, was die Wartbarkeit von Szenariobeschreibungen potenziell erleichtert. Zum Einlesen und Verarbeiten von Szenariobeschreibungen im JSON-Format wird die Software-Bibliothek Gson<sup>65</sup> genutzt. Die Datenformate für die Abbildung des Straßen- und Wegenetzes und der Fuzzyvariablen innerhalb einer Szenariobeschreibung ergeben

<sup>57</sup><https://jade.tilab.com> (letzter Abruf: 27. 02. 2022).

<sup>58</sup><https://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason> (letzter Abruf: 27. 02. 2022).

<sup>59</sup><https://repast.github.io> (letzter Abruf: 27. 02. 2022).

<sup>60</sup><https://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/extensions/geomason> (letzter Abruf: 27. 02. 2022).

<sup>61</sup>Shapefile ist ein Datenformat für geospatiale Vektordaten, um Objekte anhand ihrer Geometrien zur Beschreibung der physischen Lage und Form sowie ihrer Attribute abzubilden (ESRI, 1998).

<sup>62</sup><https://www.fuzzylite.com/java> (letzter Abruf: 27. 02. 2022).

<sup>63</sup>FCL (Fuzzy Control Language) ist eine domänenspezifische Sprache zur Beschreibung von Fuzzyinferenzsystemen (IEC 61131-7:2000).

<sup>64</sup>JavaScript Object Notation

<sup>65</sup><https://github.com/google/gson> (letzter Abruf: 27. 02. 2022).

sich aus der Entscheidung für MASON und GeoMason beziehungsweise aus der für jfuzzylite. Die abzubildenden Fuzzyregeln müssen nicht zwangsweise in FCL-Syntax sondern können als einfache Zeichenketten angegeben werden, da dies die Lesbarkeit der Startszene innerhalb einer Szenariobeschreibung erhöht. Das Straßen- und Wegenetz wird durch routingfähige Shapefiles von der Geofabrik<sup>66</sup> abgebildet, die aus den öffentlichen Daten von OpenStreetMap<sup>67</sup> bezogen und aufbereitet werden. Zum separaten Einlesen der Attribute von in einem Shapefile gespeicherten Objekten wird zusätzlich die Software-Bibliothek JavaDBF<sup>68</sup> genutzt. Insgesamt besteht eine gemäß der in Abschnitt 5.3 definierten Inhalte aufgestellte Szenariobeschreibung für den Prototyp damit aus vier separaten Dateien. Die Startszene und die Parametrisierung jeweils im JSON-Format, das Straßen- und Wegenetz im Shapefile-Format und die Fuzzyvariablen im FCL-Format.

Zur Ausgabe der Simulationsergebnisse wird das CSV-Format genutzt. CSV-Dateien können von nahezu allen gängigen Datenverarbeitungs- und Statistikanwendungen, wie beispielsweise Excel, R oder Knime, verarbeitet werden. Erzeugung und Aufbereitung der Simulationsergebnisse können auf diesem Weg getrennt werden.

### 6.1.2.2 Klassenstruktur

Der in Abschnitt 6.1.1 beschriebene Grobentwurf kann zusammen mit den in Abschnitt 6.1.2.1 getroffenen Technologie- und Datenformatentscheidungen genutzt werden, um einen Java-spezifischen Feinentwurf der Klassenstruktur des Prototyps zu spezifizieren. In Abbildung 6.5 ist dazu zunächst die Paketstruktur des Prototyps als UML-Paketdiagramm für das bessere Verständnis der anschließend erläuterten Klassenstruktur dargestellt. Die Pakete orientieren sich an den in Abbildung 6.1 definierten Subsystemen und Komponenten der Systemarchitektur.

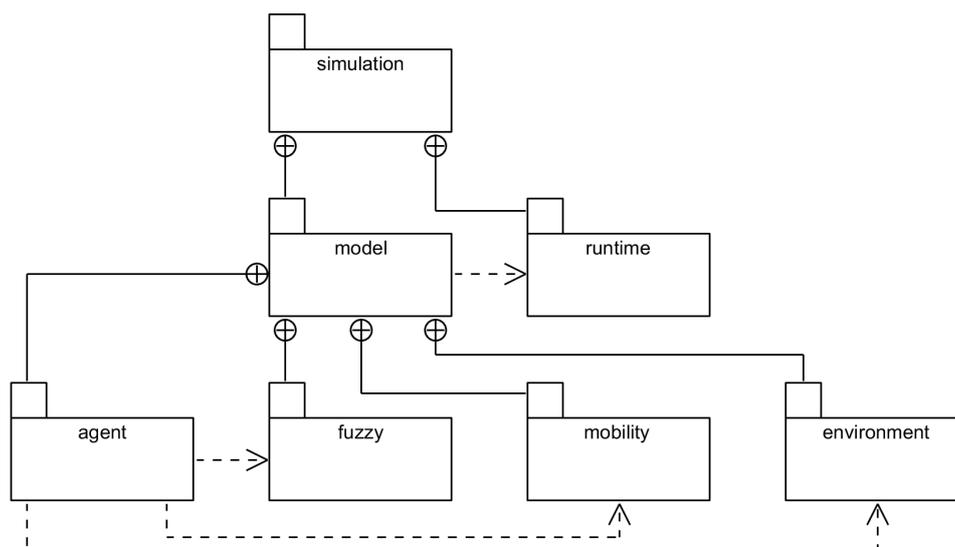
Das Paket Simulation (simulation) umfasst den gesamten Prototyp und gliedert sich in die Pakete Laufzeitumgebung (runtime) und Modell (model). Das Paket Modell enthält analog zur Systemarchitektur Pakete für die Umwelt der Agenten (environment), die Agenten selbst (agent), das Fuzzyinferenzsystem (fuzzy) und die Erzeugung von Mobilitätsoptionen (mobility). Alle vier Pakete innerhalb des Pakets Modell sind jedoch vom Paket Laufzeitumgebung abhängig. Weiterhin ist das Paket Agent abhängig von den anderen drei Paketen des Pakets Modell.

Die Darstellung der vollständigen Klassenstruktur erstreckt sich von Abbildung 6.6 bis Abbildung 6.8. Für die Benennung von Paketen, Klassen, Attributen und Funktionen wird eine für Java typische Syntax genutzt. Die Nutzung externer Software-Bibliotheken ist durch eine entsprechende Markierung der Pakete durch UML-Stereotypen gekennzeichnet. Multiplizitäten zwischen Klassen werden zugunsten der Lesbarkeit nur dann angegeben, wenn es sich nicht um eine 1:1-Beziehung oder allgemeine Assoziation handelt. Die Darstellung von

<sup>66</sup><https://www.geofabrik.de> (letzter Abruf: 27. 02. 2022).

<sup>67</sup><https://www.openstreetmap.org> (letzter Abruf: 27. 02. 2022).

<sup>68</sup><https://github.com/albfernandez/javadbdf> (letzter Abruf: 27. 02. 2022).



**Abbildung 6.5:** UML-Paketdiagramm des Prototyps.

Attributen und Methoden der Klassen beschränkt sich auf die für Struktur und Funktionsweise Wesentlichen. Getter- und Setter-Methoden werden nicht explizit dargestellt.

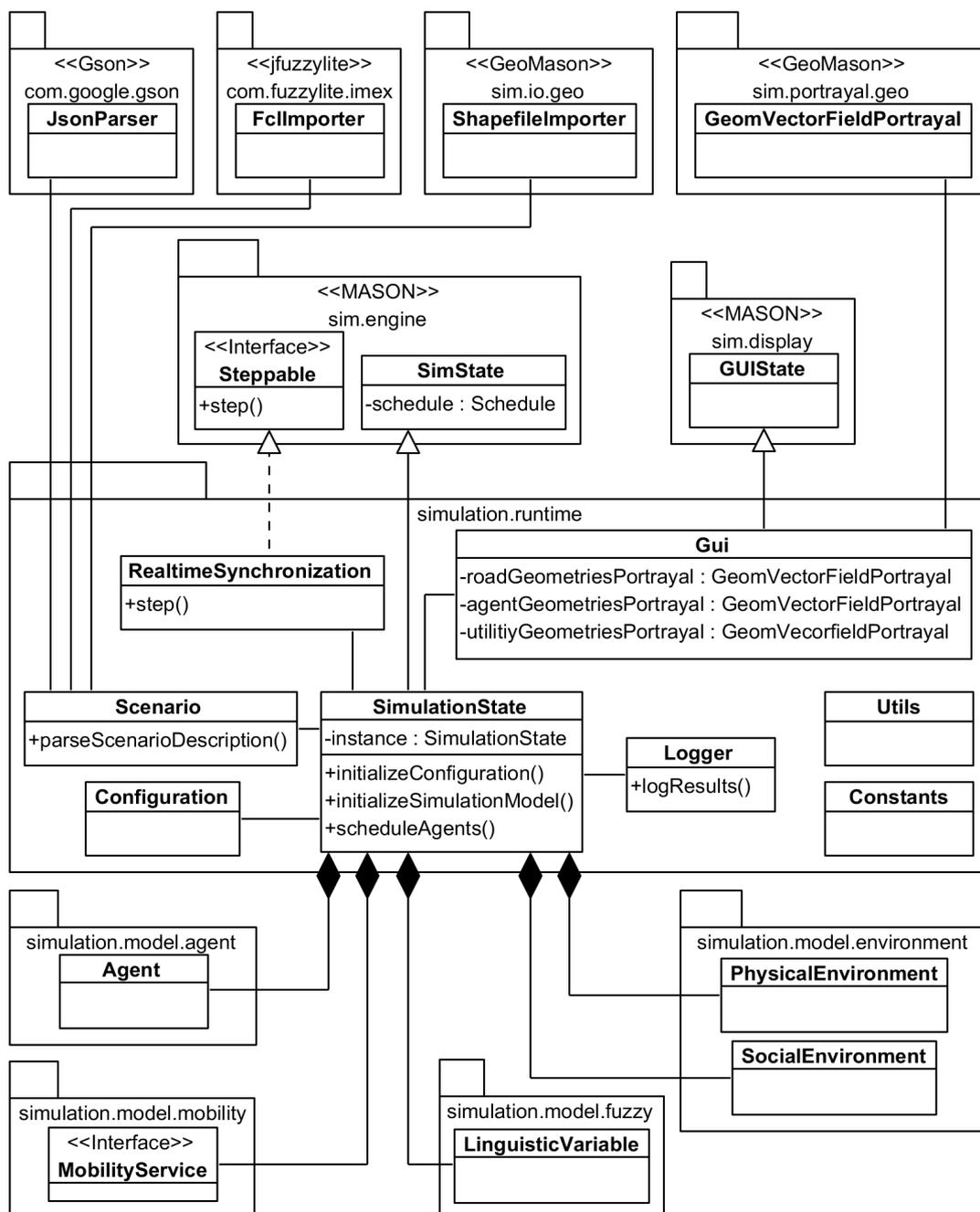
Abbildung 6.6 stellt zunächst die Klassenstruktur innerhalb der Laufzeitumgebung des Prototyps sowie der unmittelbar betroffenen Klassen anderer Pakete detailliert dar.

**Paket Laufzeitumgebung (simulation.runtime)** Zentrale Klasse der Laufzeitumgebung ist der Zustand der Simulation (SimulationState). Dieser ist nach dem Einzelstück-Entwurfsmuster (Englisch: singleton pattern) angelegt und setzt die von der Software-Bibliothek MASON bereitgestellte Simulationsumgebung mit der dazugehörigen Datenstruktur für einen Reihenfolgeplan der Simulationsereignisse (schedule) um (BALZERT, 2011, S. 74). Diese initialisiert die Konfiguration (Configuration) und die Objekte des Simulationsmodells (Paket simulation.model) gemäß der in Abschnitt 5.3 definierten Inhalte einer Szenariobeschreibung und plant die Simulationsagenten im Sinne einer zeitdiskreten Simulation in den Reihenfolgeplan der Simulationsereignisse ein.

Die Klasse Szenario (Scenario) dient zum Einlesen einer Szenariobeschreibung mithilfe der Software-Bibliotheken Gson, jfuzzylite und GeoMason und bildet die Grundlage für die Initialisierung durch den Zustand der Simulation.

Die Klasse für die grafische Benutzeroberfläche (Gui) erbt von der entsprechenden Klasse der Software-Bibliothek GeoMason und nutzt deren Klassen zur Darstellung der Geometrien des eingelesenen Straßen- und Wegenetzes sowie der Agenten und der durch sie wahrgenommenen Nutzen unterschiedlicher Mobilitätsoptionen.

Die Klasse zur Synchronisation mit der Echtzeit (RealtimeSynchronization) implementiert die Steppable-Schnittstelle von MASON, um bei Bedarf als letztes Ereignis in jedem Simulationsschritt eine optionale Verzögerung der Simulationszeit einzuführen, damit simulativer und realer Zeitverlauf synchronisiert werden können.

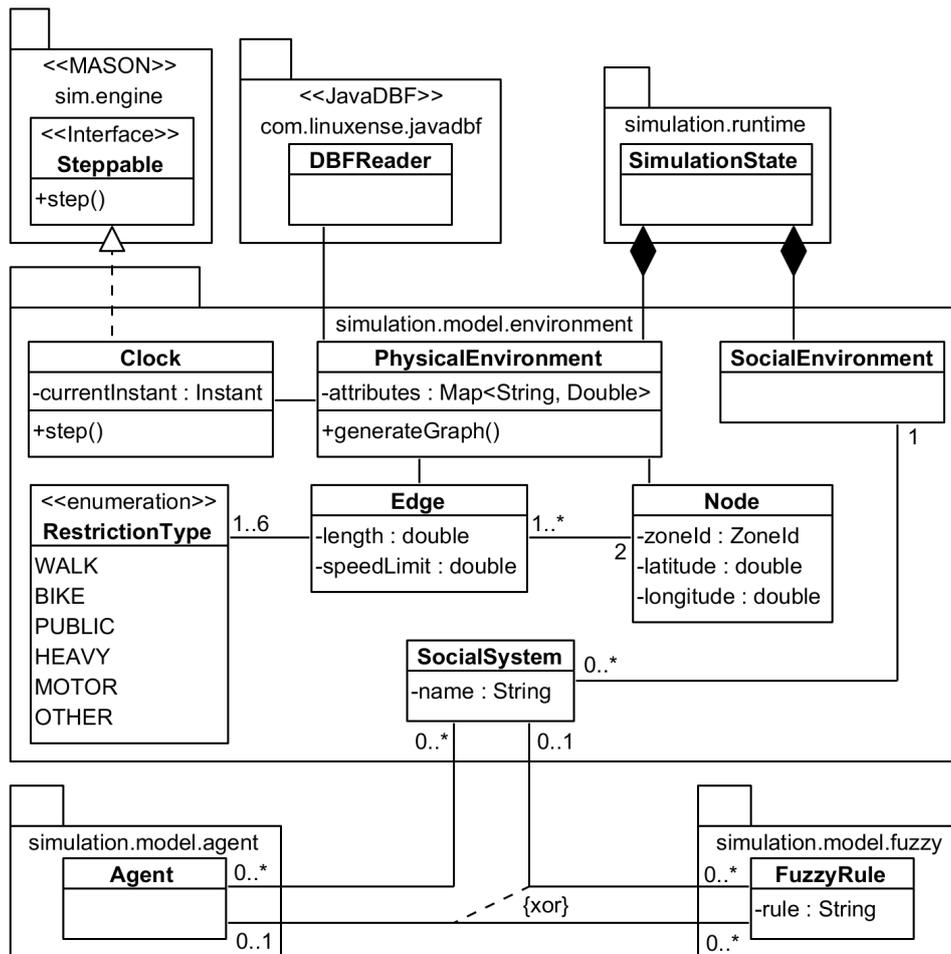


**Abbildung 6.6:** UML-Klassendiagramm der Laufzeitumgebung des Prototyps.

Die Klasse Datenlogger (Logger) dient zur Persistierung der Simulationsergebnisse, übrige Hilfsfunktionen und Konstanten des Prototyps werden durch zwei Hilfsklassen (Utils, Constants) bereitgestellt.

Zur Vertiefung des Pakets Simulationsmodell (simulation.model) wird in Abbildung 6.7 nun die Umwelt genauer spezifiziert.

**Paket Umwelt (simulation.model.environment)** Die durch den Zustand der Simulation initialisierte Umwelt besteht aus zwei zentralen Klassen, der physischen Umwelt (PhysicalEnvironment) und der sozialen Umwelt (SocialEnvironment).



**Abbildung 6.7:** UML-Klassendiagramm der physischen und sozialen Umwelt im Simulationsmodell des Prototyps.

Die zur physischen Umwelt gehörigen entscheidungsrelevanten Attribute werden in einer Map-Datenstruktur<sup>69</sup> als Gleitkommazahlen anhand ihres Bezeichners gespeichert. Dies ist notwendig, damit entscheidungsrelevante Attribute ihren jeweiligen linguistischen Variablen anhand ihres Bezeichners zugeordnet werden können. Die genaue Repräsentation eines entscheidungsrelevanten Attributs ist damit dem Anwender bei der Erstellung einer Szenariobeschreibung überlassen. Beispielsweise kann ein nominales entscheidungsrelevantes Attribut mit genau einer von mehreren möglichen Ausprägungen, wie der Zweck einer Aktivität, entweder mit einem separaten Attribut für jede mögliche Ausprägung oder nur einem Attribut mit Zuordnung eines numerischen Werts zu jeder Ausprägung abgebildet werden.

Weiterhin enthält die physische Umwelt einen das Straßen- und Wegenetz repräsentierenden Graphen, bestehend aus den entsprechenden Klassen für die Kanten (Edge) und Knoten (Node) des Graphen. Die dazu relevanten Informationen aus dem Shapefile der Szenariobeschreibung werden mit der Software-Bibliothek JavaDBF eingelesen.

<sup>69</sup>Eine Map enthält eine beliebige Anzahl an Paaren, bestehend aus einem in der Map einzigartigen Schlüssel und einem Wert. Über den Schlüssel kann der jeweilige Wert abgerufen oder verändert werden.

Eine Kante des Graphen enthält Informationen über ihre Länge und Geschwindigkeitsbegrenzung sowie ein bis sechs Beschränkungstypen für die auf der Kante zulässigen Arten von Verkehrsmittelgruppen, wie Fußgänger, Fahrräder, öffentlicher oder Schwerlastverkehr, übrige motorisierte Fahrzeuge oder sonstige Verkehrsmittel, repräsentiert durch eine entsprechende Enumeration (`RestrictionType`). Ein Knoten enthält seine geografische Position als Längen- und Breitengrad sowie seine Zeitzone.

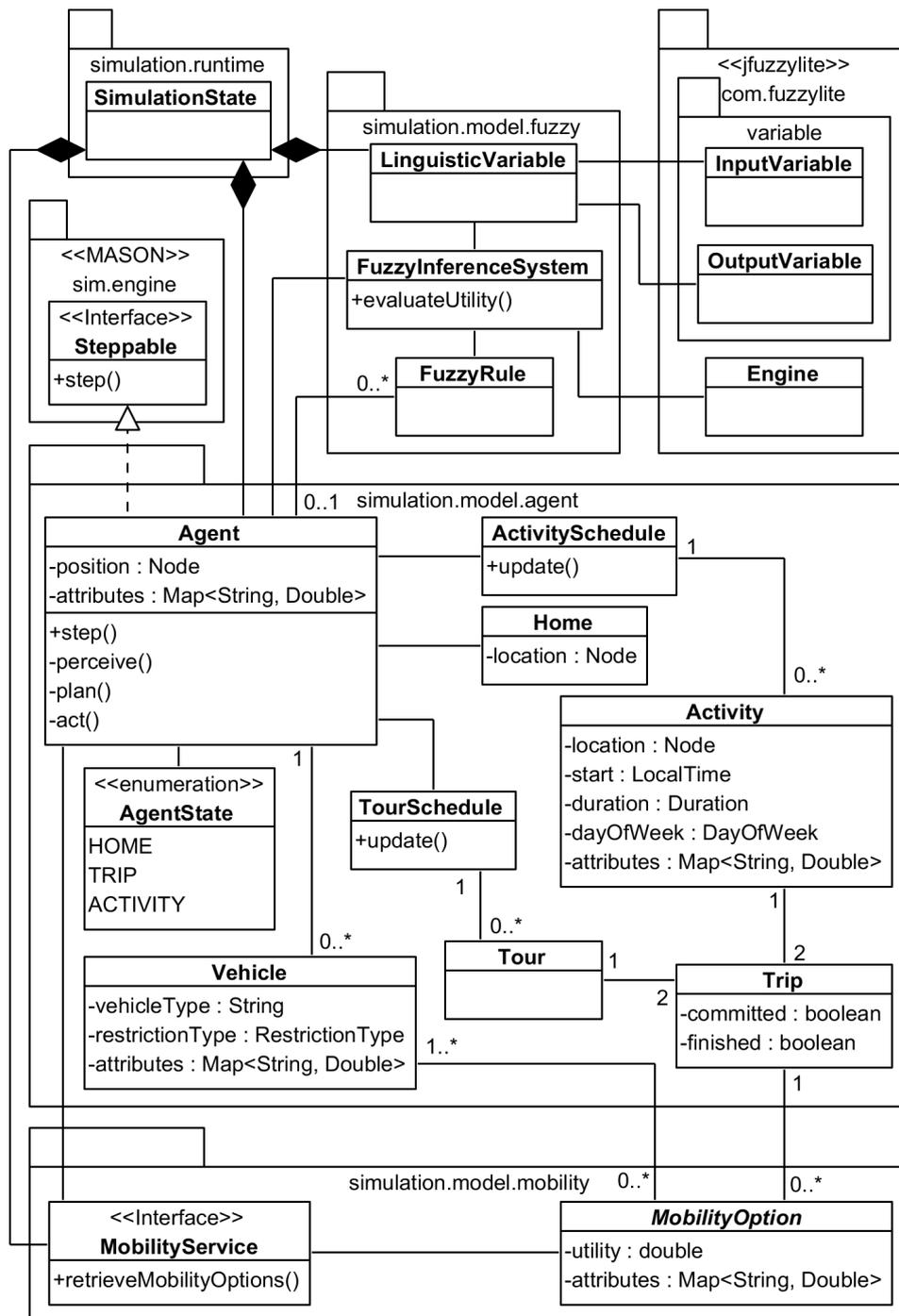
Darüber hinaus enthält die physische Umwelt die Klasse `Simulationsuhr` (`Clock`), welche die `Steppable`-Schnittstelle der Software-Bibliothek MASON implementiert und die aktuelle Simulationszeit bereitstellt. Die `Simulationsuhr` wird dazu bei jedem Simulationsschritt als erstes aktualisiert.

Die soziale Umwelt verweist auf die Klasse für die sozialen Systeme (`SocialSystem`) einer Szenariobeschreibung, diese besitzen jeweils einen eindeutigen Namen und verweisen wiederum auf ihre jeweiligen Agenten und Fuzzyregeln. Eine Fuzzyregel ist in diesem Zusammenhang entweder genau einem sozialen System oder genau einem Agenten zugeordnet.

In Abbildung 6.8 werden die verbleibenden Pakete des Prototyps zu Agenten, Fuzzyinferenzsystem und Erzeugung von Mobilitätsoptionen spezifiziert.

**Paket `Agent` (`simulation.model.agent`)** Zentrale Klasse des Pakets `Agent` ist die gleichnamige Klasse `Agent`, diese implementiert die `Steppable`-Schnittstelle der Software-Bibliothek MASON und wird somit bei jedem Simulationsschritt durch den Zustand der Simulation aufgerufen. Ein `Agent` wird durch seine aktuelle Position in Form eines Knotens aus dem Graphen der physischen Umwelt beschrieben, alle weiteren entscheidungsrelevanten Attribute sind in einer `Map`-Datenstruktur als Gleitkommazahlen anhand ihres Bezeichners gespeichert. Sämtliche Methoden außer der durch den Zustand der Simulation aufgerufenen `Step`-Methode sind im Sinne der in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen erheblichen Datenkapselung bei agentenorientierter Programmierung als `privat` deklariert (WOOLDRIDGE, 2002, S. 25–27; SHOHAM, 1993, S. 55–57). Die neben der `Step`-Methode dargestellten Methoden der Klasse `Agent` sind zusammenfassend auf die drei in Abschnitt 6.1.1.5 beschriebenen, übergeordneten UML-Aktivitäten reduziert. Die drei gemäß Abschnitt 6.1.1.4 und insbesondere Abbildung 6.3 möglichen Zustände eines Agenten sind mit einer entsprechenden Enumeration (`AgentState`) repräsentiert. Weiterhin ist einem Agenten eine Klasse `Wohnort` (`Home`) zugeordnet, die ebenso wie die Position eines Agenten auf einen Knoten im Graphen der physischen Umwelt verweist. Die Klasse `Fortbewegungsmittel` (`Vehicle`) beschreibt die Fortbewegungsmittel eines Agenten anhand des für die Entscheidungsfindung relevanten Typs des Fortbewegungsmittels, eines der im Paket `Umwelt` definierten Beschränkungstypen sowie der übrigen entscheidungsrelevanten Attribute in einer `Map`-Datenstruktur.

Die Klasse `Aktivitätsplan` (`ActivitySchedule`) hält eine mit jedem Simulationsschritt durch den Agenten aktualisierte Liste seiner bevorstehenden Aktivitäten vor und



**Abbildung 6.8:** UML-Klassendiagramm des Agenten im Simulationsmodell des Prototyps.

hängt wöchentlich auftretende Aktivitäten nach deren Ablauf für die Folgewoche an den Aktivitätsplan an. Der Aktivitätsplan umfasst daher unabhängig vom in der Szenariobeschreibung gewählten Planungshorizont eine Woche, ein Planungshorizont von mehr als einer Woche hat damit keinen Einfluss auf das Verhalten eines Agenten. Die Klasse Aktivität beschreibt eine Aktivität anhand ihres durch einen Knoten der physischen Umwelt abgebildeten Ortes, ihrer Startzeit, Dauer und ihres Wochentags sowie ihrer in einer Map-Datenstruktur repräsentierten entscheidungsrelevanten Attribute.

Die Klassen für den Tourenplan (TourSchedule), eine Tour und einen Trip eines Agenten entsprechen in ihren Abhängigkeiten der in Abschnitt 6.1.1.5 beschriebenen Funktionsweise. Anhand der beiden booleschen Attribute kann für einen Trip identifiziert werden, ob dieser verbindlich festgelegt (committed) oder abgeschlossen (finished) ist.

**Paket Mobilität (simulation.model.mobility)** Das Paket Mobilität dient zur Anbindung eines Mobilitätsdienstleisters und der Erzeugung von Mobilitätsoptionen. Die Schnittstelle Mobilitätsdienst (MobilityService) muss für den anzubindenden Mobilitätsdienstleister individuell implementiert werden. Die dargestellte Komposition durch den Zustand der Simulation bezieht sich daher auf eine für einen spezifischen Mobilitätsdienstleister implementierte Klasse. Die abstrakte Klasse Mobilitätsoption (MobilityOption) muss entsprechend ebenfalls für den Mobilitätsdienstleister spezifisch implementiert werden. Sie wird bei Erzeugung einem Trip zugeordnet und beschreibt wenigstens ihren Nutzen sowie ihre entscheidungsrelevanten Attribute in einer Map-Datenstruktur. Weiterhin ist ihr wenigstens ein Fortbewegungsmittel zugeordnet, dieses muss sich jedoch nicht zwangsweise im Besitz eines Agenten befinden, es kann sich auch um ein Fortbewegungsmittel des öffentlichen Verkehrs oder ein im Rahmen von Ridesharing verfügbares Fortbewegungsmittel handeln.

**Paket Fuzzy (simulation.model.fuzzy)** Zentrale Klasse des Pakets Fuzzy ist die Klasse Fuzzyinferenzsystem (FuzzyInferenceSystem). Die interne Struktur der Klasse Fuzzyinferenzsystem sowie der Ablauf der Fuzzyinferenz entsprechen dem in Abschnitt 5.2.3 entwickelten, mehrstufigen Konzept. Diese verwendet die Datenstrukturen und Funktionen der Software-Bibliothek jfuzzylite, um den Nutzen einer Mobilitätsoption auf Grundlage aller übergebenen entscheidungsrelevanten Attribute, der durch die gleichnamigen Klassen repräsentierten Fuzzyregeln (FuzzyRule) und der durch den Zustand der Simulation gemäß der Szenariobeschreibung initialisierten linguistischen Variablen (LinguisticVariable) zu berechnen.

## 6.2 Implementierung des Prototyps

Auf Grundlage des in Abschnitt 6.1 gestalteten Entwurfs kann der Prototyp implementiert werden (BALZERT, 2011, S. 492 f.). Dieser Abschnitt adressiert daher insbesondere die implementierungsspezifischen Details des Prototyps, die nicht bereits unmittelbar aus dem in Abschnitt 6.1 beschriebenen Entwurf hervorgehen. Auf Darstellungen von einzelnen Datenstrukturen oder Methoden im Quellcode des Prototyps wird jedoch verzichtet.

### 6.2.1 Anbindung von Mobilitätsdienstleistern

Im Rahmen der Implementierung des Prototyps wurden zwei unterschiedliche Mobilitätsdienstleister an den Prototyp angebunden, um zur Erzeugung von Mobilitätsoptionen während eines Simulationsexperiments genutzt werden zu können.

Der erste Mobilitätsdienstleister ist das im Rahmen des NEMo Projekts entwickelte Fahrkreis-System. Das Fahrkreis-System stellt Nutzern über die Fahrkreis-App unter anderem eine aktuelle, auf Google Directions<sup>70</sup> basierende Mobilitätsauskunft zu Verfügung, bietet darüber hinaus jedoch auch die Möglichkeit, Peer-to-Peer-Ridesharing-Angebote zwischen den Nutzern zu organisieren. Das Fahrkreis-System stellt damit sowohl Mobilitätsoptionen des Individualverkehrs, des öffentlichen und intermodalen Verkehrs als auch des prosumerbasierten Verkehrs bereit.

Der zweite angeschlossene Mobilitätsdienstleister ist eine eigens für den Prototyp implementierte, simulationsinterne Routing-Komponente, die auf Grundlage des zur physischen Umwelt des Simulationsmodells gehörigen, das Straßen- und Wegenetz repräsentierenden Graphen eine Routenfindung durchführt. Diese ist auf Individualverkehr beschränkt und kann zur Erzeugung von Mobilitätsoptionen für unterschiedliche Fortbewegungsmittel eines Simulationsagenten genutzt werden.

Die beiden Mobilitätsdienstleister sind explizit für die Implementierung in entsprechend zusätzlichen Paketen umgesetzt und daher nicht bereits in der in Abschnitt 6.1.2.2 beschriebenen Klassenstruktur dargestellt worden.

In Abbildung 6.9 ist die Implementierung der beiden Mobilitätsdienstleister in einem UML-Klassendiagramm dargestellt. Die Darstellung schließt sich an die in Abschnitt 6.1.2.2 spezifizierte Schnittstelle und die abstrakte Klasse des Pakets Mobilität des Prototyps an und basiert damit auf dem Fabrikmethoden-Entwurfsmuster (Englisch: factory method pattern), um den Anschluss unterschiedlicher Mobilitätsdienstleister zu gestatten (BALZERT, 2011, S. 89–96).

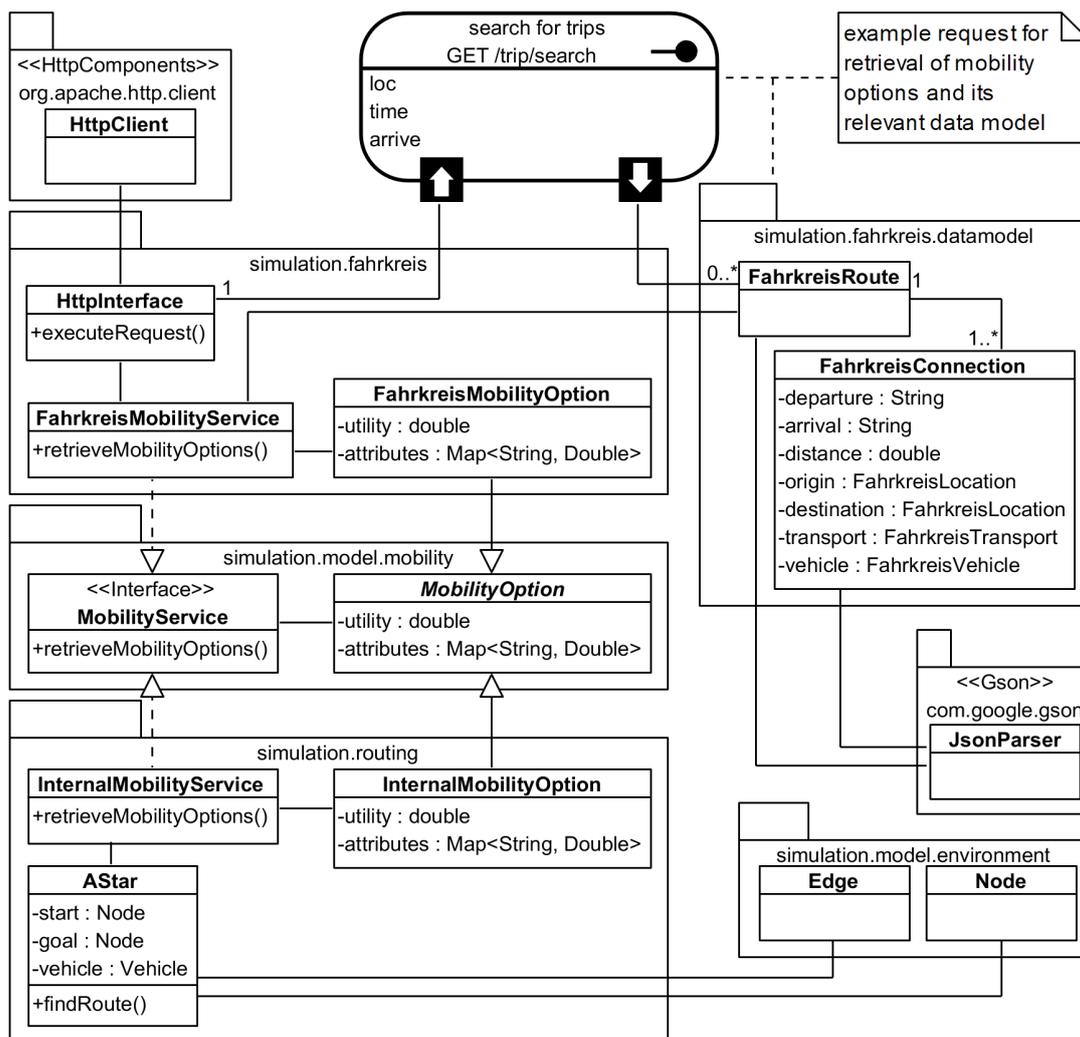
**Fahrkreis-Schnittstelle** Die Schnittstelle zum Fahrkreis-System ist in den Paketen Fahrkreis (simulation.fahrkreis) und Fahrkreis-Datenmodell (simulation.fahrkreis.datamodel) implementiert.

Die Klasse Fahrkreis-Mobilitätsdienst (FahrkreisMobilityService) implementiert die Schnittstelle Mobilitätsdienst (MobilityService) und ist funktional äquivalent zu den Funktionen der Fahrkreis-App für menschliche Nutzer. Diese stellt alle Methoden zum Abruf von Mobilitätsoptionen vom Server des Fahrkreis-Systems zur Verfügung. Das Fahrkreis-System bietet zu diesem Zweck eine REST<sup>71</sup>-Schnittstelle an, die zur Client-Server-Kommunikation genutzt wird (BALZERT, 2011, S. 286–288). In Abbildung 6.9 ist dazu lediglich die wichtigste Anfrage (Englisch: request) dargestellt, der GET-Request zum Abruf von Mobilitätsoptionen, im Fahrkreis-System als Suche nach Trips (search for trips) bezeichnet. Die Parameter dieser Anfrage sind der Start- und Zielort als Liste (loc), die gewünschte Zeit (time) und eine boolesche Variable, ob es sich bei der gewünschten Zeit um die Abfahrts- oder Ankunftszeit (arrive) handelt. Durchgeführt wird die Anfrage mithilfe der Software-Bibliothek Apache HttpComponents<sup>72</sup>.

<sup>70</sup><https://developers.google.com/maps/documentation/directions> (letzter Abruf: 27.02.2022).

<sup>71</sup>Representational State Transfer

<sup>72</sup><https://hc.apache.org> (letzter Abruf: 27.02.2022).



**Abbildung 6.9:** UML-Klassendiagramm zur Anbindung von Mobilitätsdienstleistern.

Die Antwort des Server des Fahrkreis-Systems wird durch die Software-Bibliothek Gson verarbeitet und zunächst durch das für Fahrkreis spezifische Datenmodell abgebildet, repräsentiert durch die jeweiligen Klassen für Fahrkreis-Routen (Fahrkreis-Route) und Fahrkreis-Verbindungen (FahrkreisConnection). Eine Fahrkreis-Route entspricht einer Mobilitätsoption, die aus mindestens einer Fahrkreis-Verbindung im Falle eines durchgehenden Individualverkehrs von Start bis Ziel oder mehreren Verbindungen im Falle intermodaler Verkehrsketten besteht. Aus den Fahrkreis-Verbindungen lassen sich alle wesentlichen Informationen einer Fahrkreis-Route rekonstruieren.

Für jede vom Server des Fahrkreis-Systems abgerufene Fahrkreis-Route wird eine von der abstrakten Klasse Mobilitätsoption (MobilityOption) abgeleitete Klasse Fahrkreis-Mobilitätsoption (FahrkreisMobilityOption) instanziiert, die in ihrem Konstruktor die Konvertierung des Fahrkreis-Datenmodells in die in einer Map-Datenstruktur abgebildeten entscheidungsrelevanten Attribute durchführt.

**Interne Schnittstelle** Die Schnittstelle zur simulationsinternen Erzeugung von Mobilitätsoptionen ist im Paket Routing (simulation.routing) implementiert.

Die Klasse interner Mobilitätsdienst (`InternalMobilityService`) implementiert die Schnittstelle Mobilitätsdienst (`MobilityService`) und ruft zur Erzeugung von Mobilitätsoptionen einen A\*-Algorithmus<sup>73</sup> auf. Dieser ist in der Klasse A\* (`AStar`) implementiert und sucht für gegebene Start- und Zielknoten im die physikalische Umwelt abbildenden Graphen des Straßen- und Wegenetzes nach einer entsprechenden Mobilitätsoption, zur Distanzberechnung auf der Erdoberfläche wird die Vincentyformel genutzt (VINCENTY, 1975). Bei der Suche werden sowohl die physische Distanz zum Ziel, die Zulässigkeit und die typische Geschwindigkeit des gewählten Fortbewegungsmittels als auch geltende Höchstgeschwindigkeiten durch die Heuristik des A\*-Algorithmus berücksichtigt. Für unterschiedliche Fortbewegungsmittel muss die Suche daher mehrfach durchgeführt werden.

Die Ergebnisse des A\*-Algorithmus werden im Konstruktor der von der abstrakten Klasse Mobilitätsoption (`MobilityOption`) abgeleiteten Klasse interne Mobilitätsoption (`InternalMobilityOption`) in der entsprechenden Map-Datenstruktur für entscheidungsrelevante Attribute abgebildet.

## 6.2.2 Datenstruktur einer Szenariobeschreibung

Die Struktur einer Szenariobeschreibung für den Prototyp folgt den in Abschnitt 5.3 festgelegten Inhalten sowie den in Abschnitt 6.1.1.1 identifizierten Konfigurationsparametern. Aufgrund der in Abschnitt 6.1.2.1 benannten, unterschiedlichen genutzten Datenformate besteht die vollständige Szenariobeschreibung jedoch aus mehreren, separaten Dateien.

In Abbildung 6.10 ist anhand eines Beispiels die Wurzeldatei einer Szenariobeschreibung dargestellt. Der Pfad zu dieser Wurzeldatei wird dem Prototyp bei Start als Kommandozeilenparameter übergeben.

Die Wurzeldatei im JSON-Format beschreibt die Konfigurationsparameter des Prototyps und verweist auf die übrigen Dateien einer vollständigen Szenariobeschreibung. Die ersten neun Parameter ergeben sich unmittelbar aus den in Abschnitt 6.1.1.1 getroffenen Designentscheidungen. Die textuellen Datums- und Zeitangaben folgen der Syntax der mit Java 8 eingeführten `Date/Time`<sup>74</sup>-Programmierschnittstelle. Der zehnte Parameter gibt den zu nutzenden Mobilitätsdienstleister an, in diesem Beispiel handelt es sich um die in Abschnitt 6.2.1 beschriebene Fahrkreis-Schnittstelle. Alternativ kann der Wert ‚internal‘ angegeben, um stattdessen die simulationsinterne Schnittstelle zu nutzen. Die letzten drei Parameter enthalten die Pfade zu den übrigen Dateien der Szenariobeschreibung, das Straßen- und Wegenetz im Shapefile-Format, die linguistischen Variablen und sonstigen, das Fuzzyinferenzsystem betreffenden Konfigurationsparameter im FCL-Format sowie die Startszene im JSON-Format. Neben den topologisch notwendigen Attributen zu Anfang, Ende und Länge

<sup>73</sup>Der A\*-Algorithmus ist ein heuristischer Suchalgorithmus zum Finden kürzester Pfade zwischen zwei Knoten in einem Graphen. Der A\*-Algorithmus garantiert das Finden einer optimalen Lösung, wenn diese existiert (RUSSELL und NORVIG, 2010, S. 93).

<sup>74</sup><https://docs.oracle.com/javase/8/docs/api/java/time/package-summary.html> (letzter Abruf: 27.02.2022).

```

{
  "seed": 4711,
  "simulationStart": "2021-01-01T00:00:00[Europe/Berlin]",
  "simulationDuration": "7D",
  "commitOutwardAndReturnTripTogether": true,
  "planningHorizon": "24H",
  "planningInterval": "1H",
  "planningEnd": "30M",
  "commitUnreliableMobilityOptionsImmediately": true,
  "realTimeSynchronization": false,
  "mobilityServiceProvider": "fahrkreis",
  "shapefileData": "relative/path/to/shapefile.shp",
  "linguisticVariablesData": "relative/path/to/linguisticVariables.fcl",
  "startSceneData": "relative/path/to/startScene.json"
}

```

**Abbildung 6.10:** Beispielhafte Datenstruktur einer Szenariobeschreibung mit Konfiguration des Prototyps sowie Pfaden zu Startszene, Straßen- und Wegenetz und linguistischen Variablen.

der im Shapefile enthaltenen Objekte muss dieses für den Prototyp wenigstens Attribute für die zulässige Höchstgeschwindigkeit sowie die in Abschnitt 6.1.2.2 beschriebenen Beschänkungstypen einer Kante des Graphen der physischen Umwelt enthalten, damit jener korrekt initialisiert werden kann.

### 6.2.2.1 Datenstruktur einer FCL-Datei

Die in einer gemäß Abschnitt 6.2.2 definierten Szenariobeschreibung referenzierte FCL-Datei enthält die linguistischen Variablen sowie alle weiteren Konfigurationsparameter für ein Fuzzyinferenzsystem. In Abbildung 6.11 wird nun zunächst der Aufbau einer FCL-Datei anhand eines Beispiels dargestellt. In dieser sind alle ein Fuzzyinferenzsystem betreffenden Informationen und Parameter abgebildet.

In Abbildung 6.11a werden zunächst im Block VAR\_INPUT die entscheidungsrelevanten Attribute anhand ihres Bezeichners und ihres Definitionsbereichs festgelegt. Im Beispiel sind zwei Attribute, das kardinale Attribut Alter (age) mit den reellen (REAL) Zahlen als Definitionsbereich und das nominale Attribut Aktivitätszweck (purpose) mit ganzen (INT) Zahlen als Definitionsbereich angegeben. Im Block VAR\_OUTPUT werden die Ausgabe-Größen des Fuzzyinferenzsystem ebenso anhand ihrer Bezeichner und Definitionsbereiche festgelegt. Nur der Nutzen (utility) wird mit den reellen (REAL) Zahlen als Definitionsbereich tatsächlich als scharfer Ausgabewert der in Abschnitt 5.2.3 beschriebenen dritten Inferenzstufe des Fuzzyinferenzsystems genutzt. Die übrigen im Beispiel dargestellten Werte müssen lediglich definiert werden, damit diesen anschließend gleichnamige linguistische Variablen für die erste und zweite Inferenzstufe zugeordnet werden können. Im Beispiel sind diese, jeweils mit den ganzen Zahlen als Definitionsbereich, das Sicherheitsgefühl (safety) für die erste Inferenzstufe sowie Auto (car) und Fahrrad (bike) für die zweite Inferenzstufe.

<pre> VAR_INPUT   age : REAL;   purpose : INT; END_VAR  VAR_OUTPUT   safety : INT;   car : INT;   bike : INT;   utility : REAL; END_VAR  FUZZIFY age   TERM young := (0, 1), (100, 0);   TERM middle := <i>Gaussian 50, 12.5</i>;   TERM old := <i>Function x/100</i>; END_FUZZIFY  FUZZIFY purpose   TERM work := 0;   TERM shopping := 1; END_FUZZIFY </pre>	<pre> DEFUZZIFY safety   TERM unsafe := -1;   TERM somewhat_safe := 0;   TERM safe := 1; END_DEFUZZIFY  DEFUZZIFY car   TERM rejected := -1;   TERM accepted := 1; END_DEFUZZIFY  DEFUZZIFY bike   TERM rejected := -1;   TERM accepted := 1; END_DEFUZZIFY  DEFUZZIFY utility   TERM bad := -1;   TERM good := 1;   ACCU : BSUM;   METHOD : COGS; END_DEFUZZIFY </pre>
--	---

(a) Definitionsbereiche und Fuzzifizierung.

(b) Inferenzstufen und Defuzzifizierung.

<pre> RULEBLOCK latent_variables_rulebase   AND : MIN;   OR : MAX;   ACT : MIN; END_RULEBLOCK  RULEBLOCK utility_rulebase   AND : MIN;   OR : MAX;   ACT : MIN;   RULE 1 : IF car IS accepted THEN utility IS good   RULE 2 : IF car IS rejected THEN utility IS bad   RULE 3 : IF bike IS accepted THEN utility IS good   RULE 4 : IF bike IS rejected THEN utility IS bad END_RULEBLOCK </pre>	<pre> RULEBLOCK vehicles_rulebase   AND : MIN;   OR : MAX;   ACT : MIN; END_RULEBLOCK </pre>
--	--

(c) Regelbasen und Junktoren.

**Abbildung 6.11:** Beispielhafte Datenstruktur einer FCL-Datei zur Definition von linguistischen Variablen und Regelbasen. Kursiv dargestellt sind nicht zur ursprünglichen Definition des FCL-Formats gehörige, aber durch jfuzzylite ermöglichte, zusätzliche Angaben.

Weiterhin zeigt Abbildung 6.11a die Definition der linguistischen Variablen zur Fuzzifizierung anhand ihrer linguistischen Terme und Zugehörigkeitsfunktionen. Die linguistische Variable Alter im Block FUZZIFY age zeigt exemplarisch drei unterschiedliche linguistische Terme für junges (young), mittleres (middle) und hohes (old) Alter. Die Software-Bibliothek jfuzzylite bietet an dieser Stelle die Möglichkeit, neben einfachen, abschnittsweise linear

definierten Funktionen der ursprünglichen Definition des FCL-Formats auch komplexere Funktionen wie beispielsweise Gaußfunktionen anhand der Position ihres Maximums und ihrer Standardabweichung oder beliebige andere Zugehörigkeitsfunktionen für linguistische Terme zu definieren. Beispiele für diese zusätzlichen Möglichkeiten von jfuzzylite sind in Abbildung 6.11 kursiv dargestellt. Der Block FUZZIFY activity zeigt exemplarisch die Definition der zwei Singletons Arbeit (work) und Einkaufen (shopping) zur Abbildung von zwei alternativen Aktivitätszwecken.

Insgesamt umfasst Abbildung 6.11a damit anhand eines Beispiels Schritt 9 der in Abschnitt 5.2.4 definierten Methode zur Erstellung eines Fuzzyinferenzsystems.

In Abbildung 6.11b sind die linguistischen Variablen der vier in Abbildung 6.11a festgelegten Ausgabegrößen des Fuzzyinferenzsystem definiert. Der Block DEFUZZIFY safety ist für die erste Inferenzstufe vorgesehen, die Blöcke DEFUZZIFY car und DEFUZZIFY bike für die zweite Inferenzstufe. Wie in Abschnitt 5.2.3 beschrieben, ist die Angabe eines Intervalls für den Definitionsbereich dieser linguistischen Variablen nicht erforderlich, da diese nicht zur tatsächlichen Defuzzifizierung genutzt werden. Auch die Werte der Singletons können prinzipiell beliebig gewählt werden. Der Block DEFUZZIFY utility hingegen definiert die zur Defuzzifizierung genutzte linguistische Variable für den Nutzen. Aus diesem Grund müssen die Werte der Singletons sinnvoll gewählt werden. Mit den Parametern ACCU beziehungsweise METHOD kann für die linguistische Variable weiterhin die zu nutzende Aggregationsfunktion beziehungsweise die Funktion zur Defuzzifizierung definiert werden. Im Beispiel sind dies eine nach oben beschränkte Summe (BSUM, bounded sum) zur Aggregation und ein gewichteter Mittelwert (COGS, center of gravity for singletons) zur Defuzzifizierung.

Zusammenfassend sind in Abbildung 6.11b Schritt 1 bis Schritt 3 sowie Schritt 5 und Schritt 7 der in Abschnitt 5.2.4 definierten Methode zur Erstellung eines Fuzzyinferenzsystems beispielhaft dargestellt.

Abbildung 6.11c zeigt die Definition der in Abschnitt 5.2.3 beschriebenen Regelbasen der drei Inferenzstufen. In den Blöcken RULEBLOCK latent\_variables\_rulebase und RULEBLOCK vehicles\_rulebase werden die Regelbasen zur Bewertung latenter Variablen und der Fortbewegungsmittel definiert. Diese Definition beschränkt sich auf die Festlegung der zu nutzenden t-Norm und t-Conorm zur Konjunktion, Disjunktion und Implikation, die Fuzzyregeln der beiden Regelbasen selbst werden innerhalb der Startszene einer Szenariobeschreibung definiert. Im Beispiel sind dies die Minimumfunktion (MIN) zur Konjunktion (AND) und Implikation (ACT) sowie die Maximumfunktion (MAX) zur Disjunktion (OR). Der im Block RULEBLOCK utility\_rulebase definierten Regelbasis zur Bewertung des Nutzens hingegen können neben der Definition der Junktoren gegebenenfalls auch einzelne Fuzzyregeln hinzugefügt werden, die zur Inferenz des Nutzens aus der Bewertung der Fortbewegungsmittel in der vorherigen Inferenzstufe genutzt werden. Diese sind gegebenenfalls einheitlich für die gesamte Szenariobeschreibung, sodass diese auch zentral in der FCL-Datei statt in der Startszene der Szenariobeschreibung definiert werden können. Im gezeigten Beispiel existiert für jeden linguistischen Term jeder linguistischen Variable der

zweiten Inferenzstufe eine Fuzzyregel, die den jeweiligen Term mit gutem oder schlechtem Nutzen in Verbindung bringt.

Insgesamt umfasst Abbildung 6.11c damit Schritt 4 und Schritt 8 der in Abschnitt 5.2.4 definierten Methode zur Erstellung eines Fuzzyinferenzsystems zumindest teilweise, Schritt 6 sogar vollständig.

### 6.2.2.2 Datenstruktur einer Startszene

Die Startszene als Teil der in Abschnitt 6.2.2 definierten Szenariobeschreibung ist ebenso wie die Wurzeldatei im JSON-Format zu definieren. Die einzelnen Objekte entsprechen der in Abschnitt 5.3 definierten Struktur. Abbildung 6.12 zeigt beispielhaft den Inhalt einer JSON-Datei für eine Startszene, auf die durch eine Szenariobeschreibung für den Prototyp, wie in Abbildung 6.10 dargestellt, verwiesen wird. Listen zur Aufzählung mehrerer Objekte sind in der Darstellung in eigene Teildarstellungen ausgelagert, um die Einzelteile einer vollständigen Startszene besser sichtbar zu machen.

In Abbildung 6.12a ist zunächst die Startszene (`startScene`) als Wurzelobjekt mit den ihr unmittelbar untergeordneten Objekten dargestellt. Dies sind zunächst die global geltenden entscheidungsrelevanten Attribute (`attributes`). Der tatsächliche Inhalt und Umfang mit konkreten Attributen und jeweiligen Werten eines solchen Objekts ist vom Anwender entsprechend des abzubildenden Fuzzyinferenzsystems zu gestalten. Im Beispiel ist ein Attribut für die Windgeschwindigkeit mit dem Wert 4 dargestellt. Es ist an dieser Stelle die Aufgabe des Anwenders, die für ein Attribut vorgesehene Skala korrekt abzubilden. Die Windgeschwindigkeit kann beispielsweise in Knoten, Kilometer pro Stunde oder gemäß der Beaufort-Skala anzugeben sein. Weiterhin enthält die Startszene die Agenten (`agents`) und soziale Systeme (`socialSystems`) in Form entsprechender Listen.

Abbildung 6.12d stellt die Struktur eines sozialen Systems aus der Liste für soziale Systeme der Startszene dar. Diese enthält den eindeutigen Namen des sozialen Systems zur Auflösung der Zugehörigkeit von Agenten sowie eine Liste der dazugehörigen Fuzzyregeln (`fuzzyRules`).

In Abbildung 6.12b ist die Struktur eines Agenten der Agentenliste der Startszene genauer dargestellt. Die Angabe von Längen- und Breitengrad sowie der Zeitzone dient zur Beschreibung des Wohnortes des Agenten, alle entscheidungsrelevanten Attribute sind in einem dedizierten Objekt abgebildet. Die Listen für Aktivitäten (`activities`), Fortbewegungsmittel (`vehicles`) und Fuzzyregeln werden erneut separat dargestellt. Die Liste für soziale Systeme eines Agenten verweist auf die eindeutigen Namen der sozialen Systeme, denen der Agent zuzuordnen ist.

Abbildung 6.12f zeigt beispielhaft den Inhalt einer Liste für Fuzzyregeln, wie sie zur Beschreibung eines sozialen Systems oder eines Agenten genutzt wird. Die einzelnen Fuzzyregeln sind textuell abzubilden. Die Zuordnung von Fuzzyregeln zu entweder einem Agenten oder einem sozialen System umfasst damit die Definition der eigentlichen Fuzzyregeln in Schritt 4 und Schritt 8 der in Abschnitt 5.2.4 definierten Methode zur Erstellung eines Fuzzyinferenzsystems. Die Definition konkreter t-Normen und t-Conormen der zu nutzenden

```
"startScene": {
  "attributes": {
    "windSpeed": 4.0
  },
  "agents": [
  ],
  "socialSystems": [
  ]
}
```

(a) Startszene.

```
"activities": [
  {
    "lat": 53.147501,
    "lon": 8.182254,
    "zone": "Europe/Berlin",
    "start": "08:00",
    "duration": "8H",
    "dayOfWeek": "MONDAY",
    "attributes": {
      "purpose": "work"
    }
  }
]
```

(c) Aktivitäten.

```
"vehicles": [
  {
    "vehicleType": "car",
    "restrictionType": "MOTOR",
    "attributes": {
      "maxSpeed": 130.0
    }
  }
]
```

(e) Fortbewegungsmittel.

```
"agents": [
  {
    "lat": 53.152290,
    "lon": 8.185914,
    "zone": "Europe/Berlin",
    "attributes": {
      "age": 21.0,
      "income": 649.0
    },
    "activities": [
    ],
    "fuzzyRules": [
    ],
    "vehicles": [
    ],
    "socialSystems": [
      "students"
    ]
  }
]
```

(b) Agenten.

```
"socialSystems": [
  {
    "name": "students",
    "fuzzyRules": [
    ]
  }
]
```

(d) Soziale Systeme.

```
"fuzzyRules": [
  "if age is old then car is accepted",
  "if age is old then bike is rejected"
]
```

(f) Fuzzyregeln.

**Abbildung 6.12:** Beispielhafte Datenstruktur einer Startszene mit dazugehörigen Agenten, Aktivitäten, sozialen Systemen, Fortbewegungsmitteln und Fuzzyregeln.

Junktoren erfolgt, wie in Abschnitt 6.2.2.1 beschrieben, in der FCL-Datei einer Szenariobeschreibung.

In Abbildung 6.12c ist exemplarisch eine Aktivität innerhalb der Liste für Aktivitäten dargestellt. Um den Ort der Aktivität zu identifizieren, muss auch dieser der Längen- und Breitengrad sowie die Zeitzone zugeordnet werden. Weiterhin sind der Aktivität ihre lokale Startzeit, ihre Dauer sowie ihr Wochentag zuzuordnen. Diese Zeitangaben nutzen ebenfalls die Date/Time-Programmierschnittstelle von Java 8. Diese Attribute sind zur Initialisierung einer Aktivität zwingend erforderlich, weitere entscheidungsrelevante Attribute können auch

für eine Aktivität im entsprechenden Objekt anhand von Bezeichner und Wert hinterlegt werden. Um Erstellung und Lesbarkeit einer Startszene zu erleichtern, können entscheidungsrelevante Attribute auch nicht-numerische Werte annehmen, wenn Attribut und Wert, wie in Abschnitt 6.2.2.1 beschrieben, zuvor bereits als linguistische Variable und linguistischer Term mit Singleton als Zugehörigkeitsfunktion abgebildet wurden. Im Beispiel wird für das exemplarisch gezeigte Attribut Zweck (purpose) die Zeichenkette ‚work‘ eingesetzt, die korrekte Zuordnung von Attribut und Wert zu linguistischer Variable und linguistischem Term erfolgt automatisch.

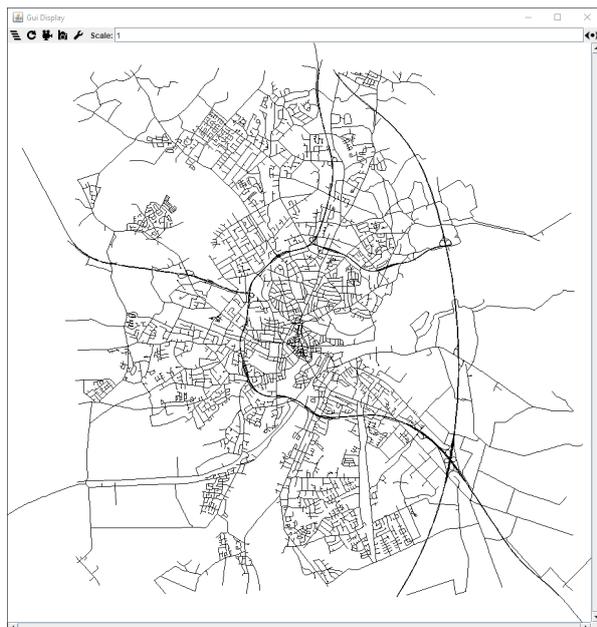
Abbildung 6.12e zeigt abschließend die Struktur eines Fortbewegungsmittels in der entsprechenden Liste. Zwingend angegeben werden muss der Typ eines Fortbewegungsmittels (vehicleType) so, wie das Fortbewegungsmittel bei der Entscheidungsfindung interpretiert werden soll, und der Beschränkungstyp (restrictionType) gemäß eines der sechs in Abschnitt 6.1.2.2 benannten und in Abbildung 6.7 dargestellten Beschränkungstypen für Kanten des Graphen des Straßen- und Wegenetzes. Weitere entscheidungsrelevante Attribute werden im entsprechenden Objekt angegeben und können, wie mit der im Beispiel gezeigten gewünschten Höchstgeschwindigkeit des Fortbewegungsmittels, gegebenenfalls auch für die Anpassung der in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen simulationsinternen Schnittstelle zur Erzeugung von Mobilitätsoptionen genutzt werden.

### 6.2.3 Grafische Benutzeroberfläche des Prototyps

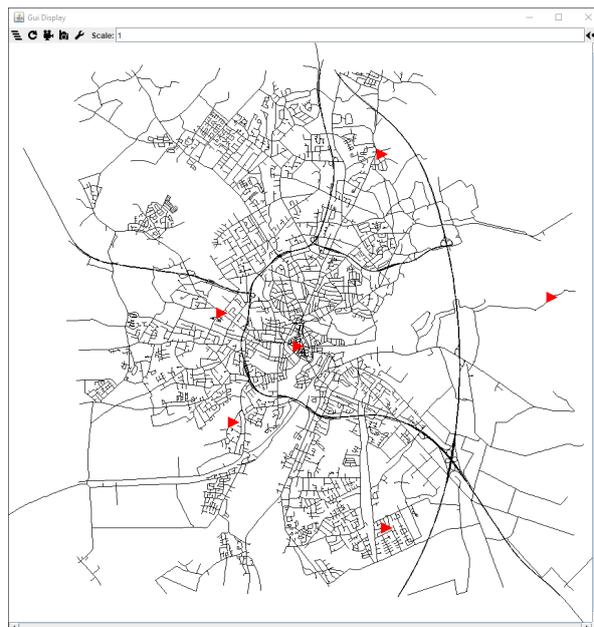
Die mit den Software-Bibliotheken MASON und GeoMason implementierte grafische Benutzeroberfläche des Prototyps stellt die Agenten innerhalb ihrer physischen Umwelt und mit dem Nutzen ihrer gewählten Mobilitätsoptionen während der Durchführung eines Simulationsexperiments grafisch dar. Diese ist vollständig optional, der Prototyp kann auch ohne grafische Benutzeroberfläche gestartet werden und Simulationsexperimente durchführen.

In Abbildung 6.13 sind anhand eines Minimalbeispiels die unterschiedlichen Informationen dargestellt, die mit der grafischen Benutzeroberfläche bereits während eines Simulationsexperiments beobachtet werden können. Das Minimalbeispiel zeigt exemplarisch in vier Szenen sechs Simulationsagenten innerhalb der Stadt Oldenburg, die sich im Verlauf des Simulationsexperiments zum Stadtzentrum bewegen wollen.

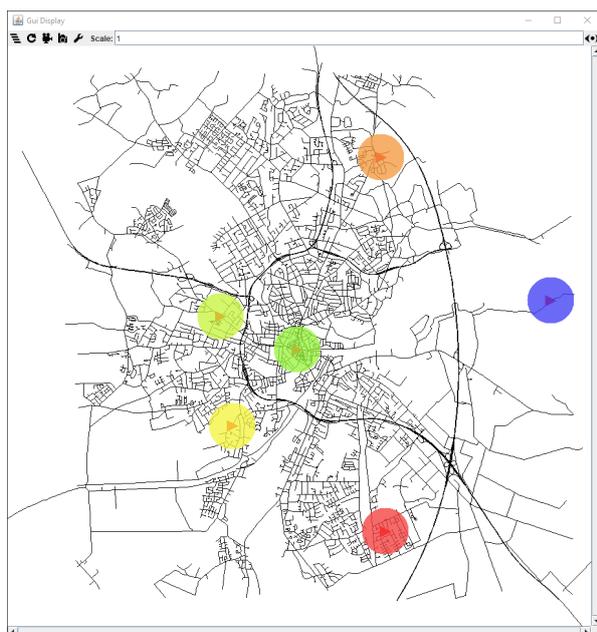
Abbildung 6.13a zeigt am Beispiel der Stadt Oldenburg die grafische Repräsentation der Geometrien eines hinterlegten Shapefiles nach der Initialisierung der Umwelt. Erweitert wird diese Ansicht in Abbildung 6.13b nach der Initialisierung der Simulationsagenten durch ihre jeweilige Position, repräsentiert durch rote Dreiecke an entsprechender Stelle. Abbildung 6.13c zeigt exemplarisch den Nutzen der Agenten, nachdem sich diese während des Simulationsexperiments für eine Mobilitätsoption für einen Trip zum Stadtzentrum entschieden haben. Der Nutzen ist durch den Farbgradienten der transparenten Bereiche an der Ausgangsposition der Agenten repräsentiert. Eine Farbe zwischen gelb und grün zeigt einen zunehmend guten Nutzen der Mobilitätsoption, eine Farbe zwischen gelb und rot einen zunehmend schlechten Nutzen. Stehen einem Agenten für einen Trip überhaupt keine Mobilitätsoptionen zur Verfügung, wird dies mit der Farbe blau angezeigt. Die sechs dargestellten



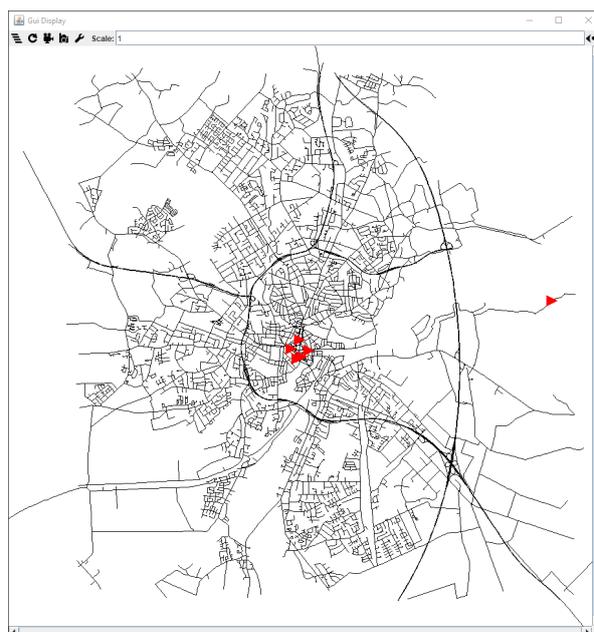
(a) Initialisierung des Straßen- und Wegenetzes anhand seiner Geometrien.



(b) Initialisierung der Simulationsagenten innerhalb des Straßen- und Wegenetzes.



(c) Farbliche Repräsentation des Nutzens der gewählten Mobilitätsoptionen der Simulationsagenten.



(d) Veränderung der Agentenpositionen nach einem Trip.

**Abbildung 6.13:** Grafische Benutzeroberfläche des Prototyps. Dargestellt sind exemplarisch vier Szenen zu unterschiedlichen Zeitpunkten und mit unterschiedlichen Informationen des selben Simulationsexperiments.

Nutzen zeigen dazu exemplarisch fünf gleichmäßig verteilte Nutzen von grün über gelb zu rot sowie einen nicht erfüllbaren Mobilitätsbedarf in blau. In Abbildung 6.13d ist die aktualisierte Position der Agenten nach Ende ihrer jeweiligen Trips zum Stadtzentrum dargestellt. Der Agent ohne Mobilitätsoption befindet sich weiterhin an seiner Ausgangsposition.



# Kapitel 7

## Evaluation

Nachdem in Kapitel 6 der Prototyp des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems umgesetzt wurde, kann dieser zur Evaluation hinsichtlich der in Abschnitt 1.2 aufgestellten Leitfrage herangezogen werden. Im in Abschnitt 1.4 beschriebenen Software-Lebenszyklus nach BALZERT (2011) entspricht dieses Kapitel damit der Installationsphase und bildet die Voraussetzung für den Betrieb des Prototyps. Aus softwaretechnischer Sicht werden daher in Rahmen dieser Evaluation unterschiedliche Abnahmetests durchgeführt (BALZERT, 2011, S. 1 f.). Hinsichtlich der in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen und in Abbildung 2.3 dargestellten Simulationspipeline nach BUNGARTZ et al. (2013) entspricht dieses Kapitel hauptsächlich dem als Validierung bezeichneten fünften Schritt, umfasst jedoch zur Darstellung der Evaluationsergebnisse auch Teile des als Visualisierung bezeichneten vierten Schritts. Der als Einbettung bezeichnete sechste und letzte Schritt entspricht der Betriebsphase im Software-Lebenszyklus und ist daher nicht Teil dieser Evaluation.

Ziel dieses Kapitels ist die Verifikation und Validierung des Prototyps, indem die Erfüllung der Anforderungen überprüft und die grundsätzliche Eignung des Prototyps sowie dessen Performance messbar gemacht und untersucht werden (WASSON, 2006, S. 693; PARTSCH, 2010, S. 51; IEEE Std 1012-2016/Cor1-2017, S. 16; SAAM, 2009a, S. 506–510). Zur Erreichung dieses Ziels wird in diesem Kapitel auf wesentliche Inhalte und Ergebnisse aus dem NEMo Projekt Bezug genommen. Einerseits wird auf das in Abschnitt 6.2.1 beschriebene und an den Prototyp angeschlossene Fahrkreis-System des NEMo Projekts zur Erzeugung von Mobilitätsoptionen zurückgegriffen, andererseits werden im Rahmen des Projekts erstellte sozialwissenschaftliche Modelle und Ergebnisse zu Verkehrsmittelwahl zur Evaluation herangezogen.

Das Kapitel gliedert die Evaluation in drei separate Abschnitte. Zunächst wird in Abschnitt 7.1 die Eignung des Prototyps anhand zweier geeigneter Fallstudien szenariobasiert hinsichtlich der dort aufgestellten Evaluationshypothese untersucht. Jede dieser Fallstudien besteht dazu aus einer Beschreibung der Fallstudie und des Aufbaus der jeweiligen Simulationsexperimente, den Ergebnissen und deren Diskussion. Die erste dieser Fallstudien basiert auf einem quantitativen, sozialwissenschaftlichen Modell, die zweite auf einem qualitativen. Anschließend wird in Abschnitt 7.2 die Performance des Prototyps bei Nutzung

---

Teile von Kapitel 7 Evaluation sind im Rahmen dieser Arbeit von DÄHLMANN et al. in den Jahren 2019 und 2021 veröffentlicht worden.

unterschiedlicher Mobilitätsdienstleister sowie hinsichtlich der Laufzeiten einzelner Softwarekomponenten des Prototyps untersucht. Zum Abschluss des Kapitels wird in Abschnitt 7.3 die Erfüllung der in Kapitel 4 aufgestellten Anforderungen argumentativ überprüft und begründet.

## 7.1 Untersuchung der Eignung des Prototyps

Im Rahmen der Modellbildung wird in Abschnitt 5.1.3.1 die Agentenfunktion der Simulationsagenten in einer ersten Beschreibung spezifiziert. Dort wird dazu als wesentliches Maß zur Beschreibung der Güte eines Agenten in der in Tabelle 5.2 dargestellten PEAS-Beschreibung die Leistungsbewertung eines Agenten definiert. Der Anspruch an einen Agenten ist demnach ein realistisches Verhalten bei der Wahl seiner Mobilitätsoptionen im Vergleich zum Mobilitätsverhalten realer Personen.

Zusammen mit der in Abschnitt 1.1 festgelegten Leitfrage kann daher auf Grundlage der an einen Agenten gestellten Leistungsbewertung die folgende Evaluationshypothese für diese Arbeit formuliert werden, anhand derer der umgesetzte Prototyp des entwickelten Mobilitätssimulationssystems zu untersuchen ist.

### Evaluationshypothese

*Der umgesetzte Prototyp ist geeignet, um reale Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten agentenbasiert zu simulieren.*

Die besondere Herausforderung bei der Untersuchung der Eignung des Prototyps für den genannten Zweck ist die Identifikation geeigneter, aussagekräftiger Simulationsszenarien. Um reales und simuliertes Verhalten zu diesem Untersuchungsgegenstand sinnvoll vergleichen zu können, wird eine Datengrundlage benötigt, die sowohl Informationen zum Verhalten realer Personen enthält als auch zur Ableitung eines sozialwissenschaftlichen Modells aus der Datengrundlage geeignet ist. Falls soziodemografische Eigenschaften für das sozialwissenschaftliche Modell wesentlich sind, muss die Datengrundlage auch diese bereitstellen. Eine solche Datengrundlage erlaubt es, eine Szenariobeschreibung zu erstellen, deren Agenten auf den realen Personen basieren und die mit dem Entscheidungsverhalten der realen Personen ausgestattet sind. Durch den Vergleich zwischen Simulationsverhalten und -ergebnissen einerseits und dem Verhalten realer Personen andererseits unter derartigen Laborbedingungen kann die Eignung des Prototyps zuverlässig messbar gemacht werden. Durch die Gestaltung des Prototyps als Mikrosimulation können Realität und Simulation durch den paarweisen Vergleich zwischen realen Personen und korrespondierenden Agenten gegenübergestellt werden.

Vor dem Hintergrund der in der Leitfrage dieser Arbeit thematisierten Unterstützung sozialwissenschaftlicher Primärforschung wird die Untersuchung der Eignung des Prototyps daher anhand geeigneter sozialwissenschaftlicher Fallstudien zum Thema Verkehrsmittelwahl durchgeführt (YIN, 2003, S. 1–3). Die beiden in dieser Arbeit genutzten Fallstudien sind

so ausgewählt, dass diese einen möglichst großen Teil des Funktionsumfangs des Prototyps abdecken, um möglichst verlässliche Aussagen über die Eignung des Prototyps zuzulassen (YIN, 2003, S. 19 f.; RIDDER, 2017).

### 7.1.1 Fallstudie mit einem quantitativen Modell

Die erste zur Untersuchung der Evaluationshypothese herangezogene Fallstudie basiert auf einem quantitativen Modell zur Beschreibung der Nutzungsintention von Ridesharing-Angeboten.

Grundlage des Modells ist eine im Jahr 2017 vom Lehrstuhl für Dienstleistungsmanagement am Institut für Automobilwirtschaft und Industrielle Produktion der Technischen Universität Braunschweig im Rahmen des NEMo Projekts unter Einwohnern des Landkreises Wesermarsch und dessen umliegenden Regionen durchgeführte webbasierte Umfrage. Insgesamt wurden 194 Teilnehmer befragt, der Altersdurchschnitt der Teilnehmer betrug 38,54 Jahre (DÄHLMANN et al., 2021, S. 65). Die Umfrage erfasste anhand jeweils mehrerer symmetrischer, siebenstufiger Likert-Items<sup>75</sup> die Zustimmung oder Ablehnung verschiedener einzelner Motive und Hemmnisse bei der Nutzung von Ridesharing-Angeboten sowie die zusammenfassende Nutzungsintention hinsichtlich Ridesharing-Angeboten.

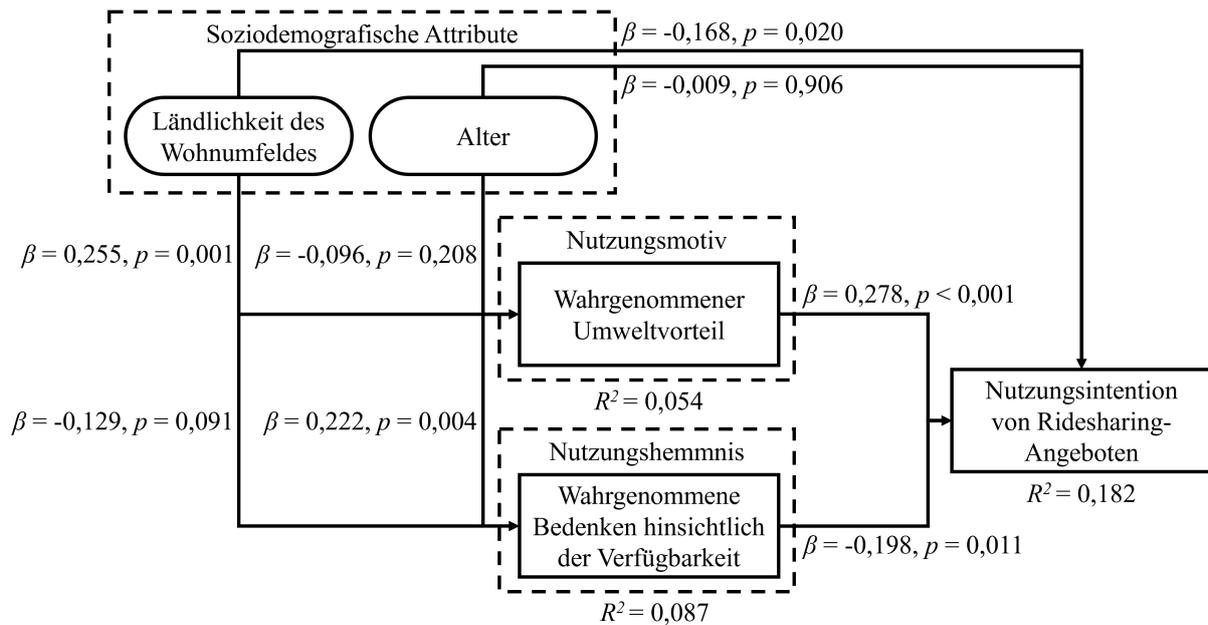
Diese Arbeit verwendet zur leichteren Nachvollziehbarkeit ein vereinfachtes, vom Lehrstuhl für Dienstleistungsmanagement aus den Umfrageergebnissen durch Strukturgleichungsmodellierung berechnetes Modell, das lediglich zwei unabhängige Variablen sowie ein Motiv und ein Hemmnis zur Beschreibung der Nutzungsintention von Ridesharing-Angeboten enthält. Das Modell ist in Abbildung 7.1 dargestellt.

Das Modell enthält als unabhängige Variablen die beiden soziodemografischen Attribute für die Ländlichkeit des Wohnumfeldes und das Alter einer Person. Als Nutzungsmotiv enthält das Modell den wahrgenommenen Umweltvorteil von Ridesharing-Angeboten, als Hemmnis die wahrgenommenen Bedenken hinsichtlich der Verfügbarkeit von Ridesharing-Angeboten. Anhand der Bestimmtheitsmaße  $R^2$  des Modells kann, für diese Evaluation jedoch nicht weiter wesentlich, erkannt werden, dass die Variablen 18,2 % der Nutzungsintention von Ridesharing-Angeboten beziehungsweise 5,4 % und 8,7 % des wahrgenommenen Umweltvorteils und der wahrgenommenen Bedenken hinsichtlich der Verfügbarkeit erklären (DÄHLMANN et al., 2021, S. 67; AICHHOLZER, 2017, S. 42).

Als Ausgangspunkt des Modells können die beiden soziodemografischen Attribute für die Ländlichkeit des Wohnumfeldes und das Alter einer Person angesehen werden. Von den beiden Attributen hat nur die Ländlichkeit des Wohnumfeldes einen direkten signifikanten Einfluss auf die Nutzungsintention von Ridesharing-Angeboten. Maßgeblich ist dazu der Signifikanzwert  $p$ , der in dem vorliegenden Modell ab einem Wert  $p < 0,05$  auf einen signifi-

---

<sup>75</sup>Mit einem Likert-Item wird die Zustimmung oder Ablehnung eines Probanden zu einer Aussage in gleichmäßigen Abstufungen erfasst, bei einem symmetrischen Likert-Item befindet sich die neutrale Position in der Mitte der Auswahlmöglichkeiten (LIKERT, 1932; BURNS und BUSH, 2008, S. 250 f.).



**Abbildung 7.1:** Quantitatives Evaluationsmodell, basierend auf DÄHLMANN et al. (2021, S. 67).

kanten Einfluss schließen lässt<sup>76</sup>. Die an jedem Pfad angegebenen  $\beta$ -Regressionskoeffizienten beschreiben dazu standardisiert die Stärke des Einflusses der Variable am Anfang des Pfades auf die Variable am Ende (AICHHOLZER, 2017, S. 31 f.). Eine zunehmende Ländlichkeit des Wohnumfeldes hat damit einen negativen Einfluss auf die Nutzungsintention von Ridesharing-Angeboten. Weiterhin hat die Ländlichkeit des Wohnumfeldes einen signifikanten Einfluss auf die wahrgenommenen Bedenken hinsichtlich der Verfügbarkeit und erhöht diese bei zunehmender Ländlichkeit, zunehmendes Alter hat einen signifikanten Einfluss auf den wahrgenommenen Umweltvorteil und erhöht diesen ebenfalls. Abschließend hat ein zunehmender wahrgenommener Umweltvorteil als Motiv einen positiven Einfluss und zunehmende wahrgenommene Bedenken hinsichtlich der Verfügbarkeit als Hemmnis einen negativen Einfluss auf die Nutzungsintention von Ridesharing-Angeboten.

### 7.1.1.1 Erstellung des Fuzzyinferenzsystems

Da das in Abbildung 7.1 dargestellte sozialwissenschaftliche Modell ausschließlich soziodemografische Attribute, jedoch keine dynamischen einer Mobilitätsoption berücksichtigt, ist eine Evaluation mit dem vollständigen Prototyp nicht erforderlich. Stattdessen dient diese erste Fallstudie gezielt ausschließlich der Evaluation des entwickelten generischen Inferenzmodells zur Entscheidungsfindung mittels Fuzzyinferenz.

Das vorliegende sozialwissenschaftliche Modell kann verwendet werden, um ein entsprechendes Fuzzyinferenzsystem zur Bestimmung des Nutzens von Ridesharing-Angeboten anhand der enthaltenen Variablen zu erstellen. Dazu werden die neun in Abschnitt 5.2.4 de-

<sup>76</sup>Ein  $p < 0,05$  entspricht einer Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 5%, das heißt, das Ergebnis bzw. der identifizierte Zusammenhang ist mit weniger als fünfprozentiger Irrtumswahrscheinlichkeit nicht zufällig.

finierten Schritte der Methode zur Erstellung eines Fuzzyinferenzsystems durchlaufen. Das vollständige Ergebnis der Schritte ist in Anhang A gemäß der in Abschnitt 6.2.2.1 beschriebenen Struktur einer FCL-Datei dargestellt.

**Schritt 1: Funktion zur Defuzzifizierung** Als Funktion zur Defuzzifizierung kommen prinzipiell sowohl die gewichtete Summe als auch der gewichtete Mittelwert in Betracht. Die Wahl der Funktion zur Defuzzifizierung hat in diesem Fall keinen Einfluss auf den Punkt, an dem ein neutraler Nutzen inferiert würde, sodass gleiche Eingaben in beiden Fällen entweder beide zu einem guten oder beide zu einem schlechten Nutzen führen, die Funktion zur Defuzzifizierung beeinflusst allerdings die Größe des Nutzens. In diesem Fall wird die gewichtete Summe gewählt, da diese dem gegebenen Modell durch die im Vergleich zum gewichteten Mittelwert fehlende Mittelwertbildung ähnlicher ist.

**Schritt 2: Variable der dritten Inferenzstufe** Die dritte Inferenzstufe enthält die linguistische Variable für den Nutzen, bestehend aus den beiden linguistischen Termen gut und schlecht. Repräsentiert werden diese durch die Singletons 1 für gut und  $-1$  für schlecht.

**Schritt 3: Aggregationsfunktion** Als t-Conorm für die Aggregationsfunktion wird eine Summenfunktion genutzt, um das vorliegende Modell nicht zu verändern. Eine Maximumfunktion würde demgegenüber dazu führen, dass nur der stärkste Einfluss bei der Inferenz berücksichtigt würde, was im vorliegenden Fall nicht gewünscht ist. Auch eine nach oben beschränkte Summe könnte das vorliegende Modell potenziell verfälschen. Die linguistische Variable für den Nutzen als Ergebnis von Schritt 1 bis 3 ist in Anhang A in Abbildung A.2 dargestellt.

**Schritt 4: Zweite Regelbasis** Die Fuzzyregeln für die Regelbasis der zweiten Inferenzstufe können anhand aller signifikanten Pfade auf die Nutzungsintention von Ridesharing-Angeboten im gegebenen Modell formuliert werden, dies sind die Pfade von der Ländlichkeit des Wohnumfeldes, dem wahrgenommenen Umweltvorteil und den wahrgenommenen Bedenken hinsichtlich der Verfügbarkeit auf die Nutzungsintention. Nicht signifikante Pfade sollten bei der Erstellung der Regelbasis ignoriert werden. Um eine korrekte Funktionsweise des Fuzzyinferenzsystems für alle Eingaben zu gewährleisten, werden für jeden Pfad zwei Fuzzyregeln angelegt, eine, die den Pfad beschreibt, und eine, die bei negiertem Antezedens eine negierte Konsequenz beschreibt. Die  $\beta$ -Regressionskoeffizienten werden dazu als Regelgewichte eingesetzt. Da Regelgewichte von Fuzzyregeln größer als 0 sein müssen, sind Teile der Regeln so zu formulieren und gegebenenfalls zu negieren, dass positive Regelgewichte gewährleistet werden können. Die negative Auswirkung bei existierenden wahrgenommenen Bedenken hinsichtlich der Verfügbarkeit kann beispielsweise zu einer positiven Auswirkung bei nicht existierenden Bedenken umformuliert werden. Die Regeln für dieses Beispiel lauten damit ‚wenn Bedenken hinsichtlich der Verfügbarkeit existieren, dann wird Ridesharing abgelehnt mit einem Regelgewicht von 0,198‘ und dementsprechend ebenso ‚wenn Bedenken

hinsichtlich der Verfügbarkeit nicht existieren, dann wird Ridesharing akzeptiert mit einem Regelgewicht von 0,198'. Konjunktionen oder Disjunktionen sind in den Regeln des vorliegenden Modells nicht erforderlich. Die vollständige Regelbasis der zweiten Inferenzstufe ist in Anhang A in Abbildung A.3 dargestellt.

**Schritt 5: Variablen der zweiten Inferenzstufe** Die zweite Inferenzstufe enthält lediglich eine linguistische Variable, die auf der Nutzungsintention für Ridesharing-Angebote basiert. Diese Intention wird mit den durch Singletons beschriebenen linguistischen Termen für Akzeptanz und Ablehnung von Ridesharing abgebildet. Die linguistische Variable der zweiten Inferenzstufe ist in Anhang A in Abbildung A.2 dargestellt.

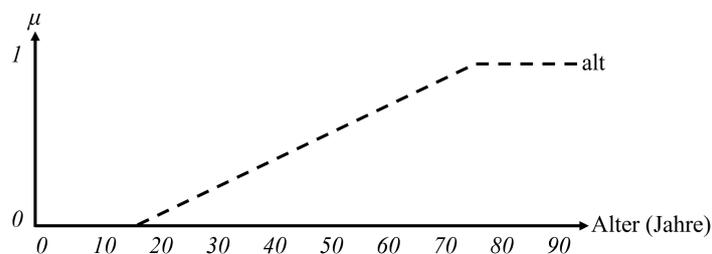
**Schritt 6: Dritte Regelbasis** Die Regelbasis der dritten Inferenzstufe enthält lediglich zwei Fuzzyregeln: ‚wenn Ridesharing akzeptiert ist, dann ist der Nutzen gut‘ und ‚wenn Ridesharing abgelehnt ist, dann ist der Nutzen schlecht‘. Regelgewichte sind für diese Fuzzyregeln nicht erforderlich. Diese Regelbasis ist in Anhang A in Abbildung A.3 dargestellt.

**Schritt 7: Variablen der ersten Inferenzstufe** Das vorliegende Modell enthält zwei linguistische Variablen für die erste Inferenzstufe, basierend auf den wahrgenommenen Bedenken hinsichtlich der Verfügbarkeit und dem wahrgenommenen Umweltvorteil, die im vorliegenden Modell jeweils einer latenten Variable entsprechen. Beide Variablen werden durch jeweils zwei Singletons beschrieben, einen für die Existenz der jeweiligen Wahrnehmung und einen für ihre Nicht-Existenz. Die linguistischen Variablen der ersten Inferenzstufe sind in Anhang A in Abbildung A.2 dargestellt.

**Schritt 8: Erste Regelbasis** Die Regelbasis der ersten Inferenzstufe zur Operationalisierung der latenten Variablen aus Schritt 7 beruht auf den signifikanten Pfaden von den beiden unabhängigen Variablen Ländlichkeit des Wohnumfelds und Alter auf die wahrgenommenen Bedenken hinsichtlich der Verfügbarkeit und des wahrgenommenen Umweltvorteils im vorliegenden Modell. Wie auch bei der Regelbasis der zweiten Inferenzstufe in Schritt 4 werden für jeden Pfad zwei Fuzzyregeln angelegt, eine für den Pfad und eine mit negiertem Antezedens und negierter Konsequenz. Die  $\beta$ -Regressionskoeffizienten der Pfade werden auch hier zur Gewichtung der Fuzzyregeln genutzt. Beispiele für Regeln der ersten Inferenzstufe sind ‚wenn die Ländlichkeit des Wohnumfelds ländlich ist, dann existieren Bedenken hinsichtlich der Verfügbarkeit mit einem Regelgewicht von 0,255‘ und dementsprechend ‚wenn die Ländlichkeit des Wohnumfelds nicht ländlich ist, dann existieren keine Bedenken hinsichtlich der Verfügbarkeit mit einem Regelgewicht von 0,255‘. Die vollständige Regelbasis der ersten Inferenzstufe ist in Anhang A in Abbildung A.3 dargestellt.

**Schritt 9: Variablen zur Fuzzifizierung** Das vorliegende Modell enthält lediglich zwei unabhängige Variablen, die als entscheidungsrelevante Attribute dienen und im Rahmen der Fuzzifizierung auf passende linguistische Terme abzubilden sind, die Ländlichkeit des Wohnumfeldes und Alter. Das Alter der Teilnehmer der dem vorliegenden Modell

zugrunde liegenden Umfrage wurde direkt erfasst, die Ländlichkeit des Wohnumfeldes wurde anhand der gängigen sieben Abstufungen von 1 für eine große Großstadt bis 7 für eine Landgemeinde umfassenden Skala des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumplanung quantifiziert (BBSR, 2017). Der jüngste Teilnehmer war 16 und der älteste 77, das Wohnumfeld der Teilnehmer umfasste die Werte 2 für eine kleinere Großstadt bis 7 für eine Landgemeinde, da im Landkreis Wesermarsch und dessen umliegenden Regionen keine große Großstadt mit mindestens 500.000 Einwohnern existiert. Die Zugehörigkeitsfunktion für den linguistischen Term ländlich der linguistischen Variable Ländlichkeit des Wohnumfeldes ist dementsprechend so definiert, dass diese bei Werten unter 2 konstant 0 und bei Werten über 7 konstant 1 ist, dazwischen ist sie linear. Die Zugehörigkeitsfunktion für den linguistischen Term alt der linguistischen Variable Alter ist bei Werten unter 16 konstant 0 und bei Werten über 77 konstant 1, dazwischen ebenfalls linear. Abbildung 7.2 zeigt exemplarisch die linguistische Variable Alter mit dem dazugehörigen linguistischen Term alt.



**Abbildung 7.2:** Linguistische Variable Alter mit dem dazugehörigen linguistischen Term alt.

Die Nutzung linearer Funktionsabschnitte zwischen den kleinst- und größtmöglichen Ausprägungen der unabhängigen Variablen ist an dieser Stelle angemessen, da die zur Erstellung des vorliegenden Modells genutzte Strukturgleichungsmodellierung lineare Regression zur Beschreibung identifizierter Zusammenhänge nutzt. Die genaue Definition der linguistischen Variablen zur Fuzzifizierung ist in Anhang A in Abbildung A.1 dargestellt.

### 7.1.1.2 Ergebnisse der Fuzzyinferenz

Das in Abschnitt 7.1.1.1 beschriebene Fuzzyinferenzsystem kann nun eingesetzt werden, um den abstrakten Nutzen von Ridesharing-Angeboten für jeden der 194 Teilnehmer der in Abschnitt 7.1.1 beschriebenen Umfrage anhand der beiden gegebenen soziodemografischen entscheidungsrelevanten Attribute Ländlichkeit des Wohnumfeldes und Alter zu inferieren. Inferierter Nutzen und reale Nutzungsintention von Ridesharing-Angeboten der Teilnehmer der Umfrage werden anschließend verglichen, um Aussagen über die Eignung des umgesetzten Prototyps gemäß der in Abschnitt 7.1 aufgestellten Evaluationshypothese dieser Arbeit treffen zu können. Drei Items der Umfrage erfragen in unterschiedlichen Formulierungen direkt die Nutzungsintention von Ridesharing-Angeboten der Teilnehmer. Die reale Nut-

zungszintention eines Teilnehmers ergibt sich daher aus dem Mittelwert dieser drei Items. Auch diese wurden mit symmetrischen siebenstufigen Likert-Items abgefragt, sodass der Wert 4 einer neutralen Nutzungszintention von Ridesharing-Angeboten entspricht und Werte  $< 4$  bis inklusive 1 einer negativen beziehungsweise Werte  $> 4$  bis inklusive 7 einer positiven Nutzungszintention entsprechen.

In Tabelle 7.1 sind Nutzungszintentionen der Teilnehmer sowie die durch Fuzzyinferenz bestimmten Nutzen anhand der drei grundsätzlichen Einstellungen positiv beziehungsweise gut, negativ beziehungsweise schlecht und neutral aggregiert dargestellt.

**Tabelle 7.1:** Anzahl der positiven, negativen, und neutralen Nutzungszintentionen (NI) der Teilnehmer und ihrer inferierten, guten, schlechten und neutralen Nutzen von Ridesharing-Angeboten.

Teilnehmer mit positiver NI	Teilnehmer mit negativer NI	Teilnehmer mit neutraler NI	Teilnehmer mit gutem Nutzen	Teilnehmer mit schlechtem Nutzen	Teilnehmer mit neutralem Nutzen
120 (61,9%)	61 (31,4%)	13 (6,7%)	115 (59,3%)	79 (40,7%)	0 (0%)

Insgesamt 120 Teilnehmer haben eine positive Nutzungszintention von Ridesharing-Angeboten artikuliert und 61 Teilnehmer eine negative. Die übrigen 13 Teilnehmer sind nicht eindeutig zuzuordnen, da diese mit einer Nutzungszintention von genau 4 eine neutrale Position vertreten. Nach der Inferenz der abstrakten Nutzen von Ridesharing für jeden der Teilnehmer anhand seiner entscheidungsrelevanten Attribute Ländlichkeit des Wohnumfeldes und Alter ergibt sich für 115 Teilnehmer ein guter Nutzen, während für 79 Teilnehmer ein schlechter Nutzen inferiert wurde. Für keinen der Teilnehmer wurde ein vollständig neutraler Nutzen bestimmt. Die Anzahl positiver Nutzungszintentionen und guter Nutzen weicht damit um 5 Teilnehmer (2,6%), die Anzahl negativer Nutzungszintentionen und schlechter Nutzen um 18 Teilnehmer (9,3%) voneinander ab.

Da 13 Teilnehmer eine exakt neutrale Nutzungszintention in der Umfrage artikuliert haben, sind diese nicht eindeutig einer positiven oder negativen Nutzungszintention von Ridesharing-Angeboten zuzuordnen. Weitere 24 Teilnehmer liegen in ihrer Nutzungszintention zwischen den Werten 3 und 5 und sind ebenfalls nur beschränkt zuverlässig einer eindeutig positiven oder negativen Nutzungszintention zuzuordnen. Es ist somit empfehlenswert, das für die in Tabelle 7.1 dargestellten Ergebnisse durchgeführte Experiment mit unterschiedlichen Auswahlen der Teilnehmer zu wiederholen. Daher wurden zwei weitere Experimente durchgeführt, eines ohne die Teilnehmer mit einer Nutzungszintention von genau 4 und ein weiteres ohne die Teilnehmer mit einer Nutzungszintention zwischen 3 und 5. Die Anzahl der abgebildeten Teilnehmer reduziert sich damit von 194 auf 181 für das zweite beziehungsweise 157 Teilnehmer für das dritte Experiment.

Die Ergebnisse aller drei Experimente sind in Tabelle 7.2 dargestellt. Die Ergebnisse des ersten Experiments mit 194 Teilnehmern entsprechen denen aus Tabelle 7.1. Im Gegensatz

zu Tabelle 7.1 wurde die letzte Spalte zu der Anzahl der Teilnehmer mit neutralem Nutzen weggelassen, da für keinen Teilnehmer in keinem Experiment ein neutraler Nutzen inferiert wurde.

**Tabelle 7.2:** Anzahl der positiven, negativen, und neutralen Nutzungsintentionen (NI) der Teilnehmer und ihrer inferierten, guten und schlechten Nutzen von Ridesharing-Angeboten für drei Experimente bei unterschiedlichen Teilnehmerauswahlen.

Auswahl der abgebildeten Teilnehmer	davon mit positiver NI	davon mit negativer NI	davon mit neutraler NI	davon mit gutem Nutzen	davon mit schlechtem Nutzen
alle (n=194)	120 (61,9 %)	61 (31,4 %)	13 (6,7 %)	115 (59,3 %)	79 (40,7 %)
alle mit NI $\neq$ 4 (n=181)	120 (66,3 %)	61 (33,7 %)	0 (0 %)	109 (60,2 %)	72 (39,8 %)
alle mit NI $\leq$ 3 oder $\geq$ 5 (n=157)	103 (65,6 %)	54 (34,4 %)	0 (0 %)	96 (61,1 %)	61 (38,9 %)

Das zweite Experiment mit 181 Teilnehmern umfasst die gleiche Anzahl an Teilnehmern mit positiver oder negativer Nutzungsintention wie das erste Experiment, erneut 120 beziehungsweise 61 Teilnehmer. Durch die ausgelassenen Teilnehmer mit neutraler Nutzungsintention verändern sich jedoch die relativen Anteile zu 66,3 % positiver und 33,7 % negativer Nutzungsintention. Für 109 Teilnehmer wurde ein guter und für 72 Teilnehmer ein schlechter Nutzen von Ridesharing-Angeboten inferiert. Die Differenz zum ersten Experiment ergibt sich aus den fehlenden 13 Teilnehmern mit neutraler Nutzungsintention. Die Anzahl positiver Nutzungsintentionen beziehungsweise guter Nutzen und negativer Nutzungsintentionen beziehungsweise schlechter Nutzen weicht damit im zweiten Experiment um 11 Teilnehmer (6,1 %) voneinander ab.

Das dritte Experiment mit 157 Teilnehmern beinhaltet 103 Teilnehmer mit positiver und 54 Teilnehmer mit negativer Nutzungsintention. Die Anzahl von Teilnehmern mit gutem Nutzen reduziert sich im dritten Experiment auf 96 Teilnehmer, die mit schlechtem Nutzen auf 61 Teilnehmer. Die Anzahl positiver Nutzungsintentionen beziehungsweise guter Nutzen und negativer Nutzungsintentionen beziehungsweise schlechter Nutzen weicht damit im dritten Experiment um lediglich 7 Teilnehmer (4,5 %) voneinander ab.

Über die in Tabelle 7.1 dargestellten Ergebnisse hinaus kann auch die korrekte Zuordnung von Nutzungsintention und inferiertem Nutzen für jeden Teilnehmer einzeln betrachtet werden. Vergleicht man die Nutzungsintention der Teilnehmer mit ihrem jeweilig inferierten Nutzen, wurde beim ersten Experiment für 114 Teilnehmer (58,8 %) ein Nutzen bestimmt, der in seiner grundsätzlichen Ausrichtung der individuellen Nutzungsintention des jeweiligen

Teilnehmers entspricht und für 67 Teilnehmer (34,5 %) ein gegensätzlicher Nutzen bestimmt. Für die 13 Teilnehmer (6,7 %) mit neutraler Nutzungsintention kann ein Vergleich der Ausrichtung von Nutzungsintention und Nutzen nicht sicher durchgeführt werden. Beim zweiten Experiment steigt der Anteil korrekter Zuordnungen bei gleichbleibender absoluter Anzahl von 114 korrekten Zuordnungen auf 63,0 %, der Anteil abweichender Zuordnungen sinkt dementsprechend auf 37,0 % mit 67 abweichenden Zuordnungen. Beim dritten Experiment erhöht sich der Anteil korrekter Zuordnungen weiter auf 63,7 % bei 100 korrekten Zuordnungen und der Anteil abweichender Zuordnungen sinkt auf 36,3 % bei 57 abweichenden Zuordnungen.

### 7.1.1.3 Diskussion

Die in Abschnitt 7.1.1.2 dargestellten Ergebnisse der Fallstudie mit einem quantitativen Modell zeigen je nach Auswahl der abgebildeten Teilnehmer der Umfrage unterschiedliche Übereinstimmungen zwischen artikulierter Nutzungsintention und inferiertem Nutzen von Ridesharing-Angeboten.

Insbesondere beim ersten Experiment mit allen 194 Teilnehmern wird eine verlässliche Aussage durch die 13 Teilnehmer mit neutraler Nutzungsintention erschwert, da diese nicht sicher einer positiven oder negativen Nutzungsintention zugeordnet werden können. Während die Anzahl positiver Nutzungsintentionen beziehungsweise guter Nutzen in diesem Experiment um lediglich 2,6 % abweicht, liegt der Unterschied bei der Anzahl negativer Nutzungsintentionen beziehungsweise schlechter Nutzen bei deutlichen 9,3 %. Es ist also davon auszugehen, dass für den Großteil der Teilnehmer mit neutraler Nutzungsintention ein schlechter Nutzen inferiert wurde. Bei Einsatz in einer Simulation würde das abgebildete Fuzzyinferenzsystem daher zu einer etwas geringeren Nutzung von Ridesharing-Angeboten führen, als durch die alleinige Nutzungsintentionen der Teilnehmer zu erwarten wäre.

Zu unterscheiden ist an dieser Stelle jedoch die in der Umfrage artikulierten Nutzungsintention der Teilnehmer von ihrer zukünftigen, tatsächlichen Nutzung von Ridesharing-Angeboten. Es ist beispielsweise denkbar, dass Teilnehmer bei direkten Fragen nach der Nutzungsintention von Ridesharing-Angeboten sozial erwünscht<sup>77</sup> geantwortet haben und ihre Bereitschaft zur Nutzung von Ridesharing-Angeboten bewusst oder unbewusst höher eingeschätzt haben als diese tatsächlich ist. Vor dem Hintergrund einer auf vergleichsweise nachhaltige Ridesharing-Angebote ausgerichteten Umfrage sind beispielsweise Framing-Effekte denkbar, die Teilnehmer dazu verleiten, ökologisch progressivere Antworten zu geben als sie tatsächlich vertreten.

Um potenziellen Verfälschungen durch sozial erwünschte Antworten bei der Nutzungsintention entgegenzuwirken, wurden das zweite und dritte Experiment mit nur 181 beziehungsweise 157 Teilnehmern durchgeführt. Durch das Auslassen von Teilnehmern mit neutraler beziehungsweise annähernd neutraler Nutzungsintention von Ridesharing-Angeboten sollten sozial erwünschte Antworten im Übergangsbereich zwischen positiver und negativer

<sup>77</sup>Eine sozial erwünschte Antwort liegt vor, wenn ein Teilnehmer nicht wahrheitsgemäß, sondern im Sinne gesellschaftlicher Normen antwortet (HLAWATSCH und KRICKL, 2019, S. 358).

Nutzungsintention ausgeschlossen werden. Die Unterschiede zwischen der Anzahl positiver Nutzungsintentionen beziehungsweise guter Nutzen und negativer Nutzungsintentionen beziehungsweise schlechter Nutzen der Teilnehmer liegen im zweiten Experiment bei 6,1% und im dritten bei 4,5% und unterscheiden sich daher um lediglich 1,6%. Insgesamt wird diese Ähnlichkeit zwischen den Nutzungsintentionen der Teilnehmer und ihren inferierten Nutzen als ausreichend ähnlich angesehen, um eine Eignung des entwickelten Konzepts zur Entscheidungsfindung mit Fuzzyinferenz im Sinne der in Abschnitt 7.1 formulierten Evaluationshypothese zu erkennen.

Da es sich bei dem vorliegenden Modell um ein aggregiertes Modell handelt, ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich Aussagen zur Eignung in diesem Fall lediglich auf makroskopischer Ebene treffen lassen. Betrachtet man die Anzahl der in Abschnitt 7.1.1.2 dargestellten korrekten Zuordnungen von Nutzungsintention und Nutzen individuell für jeden Teilnehmer, so ist festzustellen, dass die Anzahl korrekter Zuordnungen mit 58,8%, 63,0% beziehungsweise 63,7% in allen drei Experimenten weder besonders hoch ist noch sich wesentlich unterscheidet. Dieses Verhalten ist daher zu erwarten und zeigt deutlich, dass ein derartiges, einzelnes Gesamtmodell, ohne Submodelle für unterschiedliche Bevölkerungsgruppen, nur für makroskopische Aussagen herangezogen werden sollte. Für eine in allen Fällen korrekte Inferenz einzelner Nutzen und damit Entscheidungen sollten Submodelle für einzelne repräsentative Bevölkerungsteile im Rahmen von Primärforschung gebildet werden.

### 7.1.2 Fallstudie mit einem qualitativen Modell

Die zweite zur Untersuchung der in Abschnitt 7.1 aufgestellten Evaluationshypothese herangezogene Fallstudie ist aus den Ergebnissen eines Interviews zur Nutzung unterschiedlicher Verkehrsmittel abgeleitet.

Das in der Fallstudie genutzte Interview ist Teil einer Reihe von ethnografischen Feldaufenthalten und leitfadengestützten Interviews, die 2016 vom Institut für Soziologie und Kulturorganisation der Leuphana Universität Lüneburg im Rahmen des NEMO Projekts mit Einwohnern in und um den Landkreis Wesermarsch durchgeführt wurden. Zu Forschungszwecken können derartige qualitative Interviews beispielsweise zur Typenbildung herangezogen werden, indem Gemeinsamkeiten verschiedener Teilnehmer identifiziert und Idealtypen sozialer Rollen bestimmt werden (KUCKARTZ, 2010, S. 554–556). Eine derartige Typenbildung ist für diese Evaluation allerdings nicht erforderlich.

Diese Arbeit nutzt das zwanzigseitige Transkript des Interviews, um aus diesem ein das Entscheidungsverhalten der Interviewteilnehmerin repräsentierendes Fuzzyinferenzsystem abzuleiten. Die für die Entwicklung des Fuzzyinferenzsystems wesentlichen Aussagen des Interviews sind in Anhang B dargestellt. Eine Typenbildung im oben genannten Sinne ist daher nicht erforderlich, da die Teilnehmerin möglichst genau in ihren individuellen Entscheidungsgründen und Aktivitäten abgebildet werden soll, um einen Vergleich zwischen realer und simulierter Verkehrsmittelwahl zu ermöglichen.

### 7.1.2.1 Erstellung der Szenariobeschreibung

Im Gegensatz zur in Abschnitt 7.1.1 dargestellten Fallstudie mit einem quantitativ bestimmten Modell nutzt diese Fallstudie den vollständigen Funktionsumfang des Prototyps. Daher muss für diese Fallstudie eine vollständige Szenariobeschreibung gemäß der in Abschnitt 6.2.2 dargestellten Datenstruktur definiert werden, die sowohl das aus dem Interviewtranskript abgeleitete Fuzzyinferenzsystem als auch die Teilnehmerin des Interviews mit ihren entscheidungsrelevanten Attributen, Aktivitäten, Fortbewegungsmitteln und Fuzzyregeln als Agent abbildet.

Im Folgenden wird zunächst das Fuzzyinferenzsystem aus den in Anhang B dargestellten Interviewzitate mithilfe der in Abschnitt 5.2.4 beschriebenen Methode abgeleitet.

**Schritt 1: Funktion zur Defuzzifizierung** Als Funktion zur Defuzzifizierung wird in dieser Fallstudie der gewichtete Mittelwert genutzt, da davon ausgegangen werden muss, dass den unterschiedlichen Fortbewegungsmitteln eine potenziell unterschiedliche Anzahl an Fuzzyregeln zuzuordnen ist. Insbesondere bei der Bewertung von intermodalen Verkehrsketten ist eine Defuzzifizierung durch einen gewichteten Mittelwert daher besser geeignet, um die Gründe für und gegen die dazugehörigen Fortbewegungsmittel gleichwertig zu berücksichtigen.

**Schritt 2: Variable der dritten Inferenzstufe** Die dritte Inferenzstufe enthält ebenso wie bei der Fallstudie mit einem quantitativen Modell die linguistische Variable für den Nutzen, bestehend aus den beiden linguistischen Termen gut und schlecht. Repräsentiert werden diese durch die Singletons 1 für gut und  $-1$  für schlecht. Vor dem Hintergrund der Nutzung eines gewichteten Mittelwerts zur Defuzzifizierung wird der Definitionsbereich der linguistischen Variable für den Nutzen auf das Intervall  $[-1, 1]$  beschränkt.

**Schritt 3: Aggregationsfunktion** Als t-Conorm für die Aggregationsfunktion wird eine Summenfunktion genutzt. Eine Maximumfunktion würde demgegenüber dazu führen, dass nur der stärkste Einfluss bei der Inferenz berücksichtigt wird und weniger stark ausgeprägte Gründe dementsprechend nicht berücksichtigt würden. Da alle Entscheidungsgründe gleichermaßen berücksichtigt werden sollen, ist auch eine nach oben beschränkte Summe in diesem Fall ungeeignet. Die linguistische Variable für den Nutzen als Ergebnis von Schritt 1 bis 3 ist in Anhang C in Abbildung C.3 dargestellt.

**Schritt 4: Zweite Regelbasis** Die Fuzzyregeln für die Regelbasis der zweiten Inferenzstufe können aus den in Anhang B dargestellten Interviewzitate abgeleitet werden. Die Interviewzitate sind dazu thematisch zusammengefasst und werden im Rahmen dieses Schrittes entsprechend abgebildet.

Die Teilnehmerin erwähnt, dass sie Fußwege, abgesehen von solchen mit kurzer Dauer, möglichst meide. Als Regeln können daher festgehalten werden: ‚wenn die Dauer eines Fußweges kurz ist, dann ist Gehen zu Fuß akzeptiert‘ und ‚wenn die Dauer eines Fußweges lang ist, dann ist Gehen zu Fuß abgelehnt‘.

Bezüglich Radwegen sagt die Teilnehmerin aus, dass sie kurze Strecken zwar mit dem Fahrrad zurücklege, bei längeren Strecken jedoch die Nutzung eines Fahrrades meide. Als Regeln ergeben sich somit: ‚wenn die Strecke eines Radweges kurz ist, dann ist Radfahren akzeptiert‘ und ‚wenn die Strecke eines Radweges lang ist, dann ist Radfahren abgelehnt‘.

Über die Nutzung von öffentlichem Verkehr erwähnt die Teilnehmerin neben allgemein empfundenem Komfort von Bus- oder Zugfahrten, dass der Besitz eines Studententickets sich positiv auf ihre Akzeptanz von öffentlichem Verkehr auswirke. Darüber hinaus gibt die Teilnehmerin jedoch an, dass die Tatsache, ob sie alleine oder mit Partner unterwegs sei, ihre Einstellung zu öffentlichem Verkehr beeinflusse. Da der Partner kein Semesterticket besitze und im Gegensatz zur Teilnehmerin gerne Autofahre, werde bei gemeinsamen Fahrten das Auto bevorzugt. Diese Umstände werden durch zwei Regeln abgebildet: ‚wenn der Partner nicht dabei ist und wenn kein Semesterticket vorhanden ist, dann ist öffentlicher Verkehr akzeptiert‘ und ‚wenn der Partner dabei ist, dann ist Autofahren akzeptiert‘.

Ein die Einstellung der Teilnehmerin zu öffentlichem Verkehr wesentlich beeinflussender Faktor ist außerdem die Pünktlichkeit beziehungsweise die damit verbundenen Wartezeiten. Die Teilnehmerin sagt aus, dass eine gute Taktung und damit verbundene Bequemlichkeit des öffentlichen Verkehrs dessen Akzeptanz förderten, dass lange Wartezeiten jedoch als unbequem wahrgenommen würden und zur Ablehnung von öffentlichem Verkehr führten. Weiterhin stellt die Teilnehmerin fest, dass die Ankunfts- und Abfahrtszeiten von öffentlichen Verkehrsmitteln bei Familienbesuchen keine Rolle spielten, da sie die Besuchszeiten am Angebot des öffentlichen Verkehrs ausrichte. Als Regeln abgebildet bedeutet dies: ‚wenn die Pünktlichkeit bequem und der Zweck kein Familienbesuch sind oder der Zweck ein Familienbesuch ist, dann ist öffentlicher Verkehr akzeptiert‘ und ‚wenn die Pünktlichkeit unbequem und der Zweck kein Familienbesuch sind, dann ist öffentlicher Verkehr abgelehnt‘. Einen Sonderfall bildet die Pünktlichkeit bei der Verbindung mit beruflicher Tätigkeit. Da die Teilnehmerin für ihre beruflichen Tätigkeiten weder zu spät an der Arbeitsstätte ankommen noch diese früher verlassen kann, ist dieser Umstand durch zwei weitere Fuzzyregeln abzubilden. Handelt es sich bei dem Trip um eine Hinfahrt zur Arbeit, darf die Ankunftszeit an der Arbeitsstätte auf keinen Fall nach Arbeitsbeginn liegen, bei einer Rückfahrt von der Arbeitsstätte darf der Trip nicht vor Arbeitsende angetreten werden. Um diese harten Randbedingungen entsprechend durchzusetzen, werden diese beiden Fuzzyregeln im Gegensatz zu allen anderen mit einem Regelgewicht von 2.147.483.647 versehen<sup>78</sup>. Als Regeln formuliert: ‚wenn die Pünktlichkeit zu spät, der Trip eine Hinfahrt und der Zweck Arbeit sind, dann ist öffentlicher Verkehr abgelehnt mit einem Regelgewicht von 2.147.483.647‘ und ‚wenn die Pünktlichkeit zu früh, der Trip eine Rückfahrt und

<sup>78</sup>Die Zahl 2.147.483.647 bzw.  $2^{31} - 1$  ist der größtmögliche Wert, den eine 32-Bit Integer-Variable annehmen kann.

der Zweck Arbeit sind, dann ist öffentlicher Verkehr abgelehnt mit einem Regelgewicht von 2.147.483.647:

Als letzten Entscheidungsgrund gibt die Teilnehmerin an, dass ihr Sicherheitsgefühl ihre Verkehrsmittelwahl beim Einkaufen beeinflusse: ‚wenn das Sicherheitsgefühl schlecht und der Zweck Einkaufen sind, dann ist Autofahren akzeptiert‘.

Die genutzte t-Norm für Fuzzyregeln mit Konjunktion ist eine Minimumfunktion, die t-Conorm für Disjunktionen ist die Maximumfunktion. Die vollständige Regelbasis der zweiten Inferenzstufe ist in Anhang C in Abbildung C.7 dargestellt, die Definitionen der Minimum- und Maximumfunktion erfolgen in Abbildung C.4.

**Schritt 5: Variablen der zweiten Inferenzstufe** Die zweite Inferenzstufe muss linguistische Variablen für Gehen zu Fuß, Fahrradfahren, Autofahren und öffentlichen Verkehr enthalten, dies geht aus der in Schritt 4 erstellten Regelbasis hervor. Jede dieser vier linguistischen Variablen enthält zwei durch Singletons beschriebene linguistische Terme, einen für Akzeptanz und einen für Ablehnung des jeweiligen Fortbewegungsmittels. Die linguistischen Variablen der zweiten Inferenzstufe sind in Anhang C in Abbildung C.3 dargestellt.

**Schritt 6: Dritte Regelbasis** Die Regelbasis der dritten Inferenzstufe ergibt sich aus den vier linguistischen Variablen aus Schritt 5 und enthält dementsprechend acht Fuzzyregeln. Bei Akzeptanz von Gehen zu Fuß, Fahrradfahren, Autofahren oder öffentlichem Verkehr ist auch der Nutzen gut, bei Ablehnung ist der Nutzen schlecht. Am Beispiel des Autofahrens: ‚wenn Autofahren akzeptiert ist, dann ist der Nutzen gut‘ und ‚wenn Autofahren abgelehnt ist, dann ist der Nutzen schlecht‘. Regelgewichte sind für diese Fuzzyregeln nicht erforderlich. Da diese Fuzzyregeln nicht spezifisch für den abzubildenden Agenten sind, sondern, auch wenn diese nur einen Agenten enthält, einheitlich für die ganze Szenariobeschreibung, werden sie, wie in Abschnitt 6.2.2.1 beschrieben, direkt in der zur Szenariobeschreibung gehörigen FCL-Datei definiert. Diese ist in Anhang C in Abbildung C.4 dargestellt.

**Schritt 7: Variablen der ersten Inferenzstufe** Die erste Inferenzstufe enthält lediglich eine linguistische Variable. Das in Schritt 4 erwähnte Sicherheitsgefühl der Teilnehmerin ist die latente Variable, die an dieser Stelle mit einer entsprechenden linguistischen Variable abgebildet wird. Auf Grundlage der in Schritt 4 festgelegten Regelbasis der zweiten Inferenzstufe genügt dieser linguistischen Variable ein einzelner linguistischer Term für ein schlechtes Sicherheitsgefühl, der entsprechend als Singleton abgebildet wird. Die linguistische Variable der ersten Inferenzstufe ist in Anhang C in Abbildung C.3 dargestellt.

**Schritt 8: Erste Regelbasis** Die Regelbasis der ersten Inferenzstufe enthält lediglich eine Fuzzyregel zur Operationalisierung der latenten Variable aus Schritt 7. Im entsprechenden Interviewzitat zum Sicherheitsgefühl in Anhang B gibt die Teilnehmerin an, dass ihr Sicherheitsgefühl von der Dunkelheit auf dem Weg zum Einkaufen abhängig

sei. Ob es Nacht und damit dunkel ist, hängt sowohl von der Tages- als auch der Jahreszeit ab, für die entsprechende Fuzzyregel genügt es jedoch festzuhalten, dass das Sicherheitsgefühl schlecht ist, wenn die Tageszeit bereits Nacht ist: ‚wenn die Tageszeit Nacht ist, dann ist das Sicherheitsgefühl schlecht‘. Diese Fuzzyregel ist in Anhang C in Abbildung C.7 dargestellt.

**Schritt 9: Variablen zur Fuzzifizierung** Das in den Schritten 1 bis 8 erstellte Fuzzyinferenzsystem erfordert insgesamt acht linguistische Variablen zur Fuzzifizierung der jeweiligen entscheidungsrelevanten Attribute. Diese Attribute gehören entweder direkt zum Agenten, zu seinen Aktivitäten oder zur zu bewertenden Mobilitätsoption. Zu einem Fortbewegungsmittel gehörende oder global geltende entscheidungsrelevante Attribute sind nicht erforderlich.

Das einzige entscheidungsrelevante Attribut des Agenten selbst ist, wie in Schritt 4 erkannt, der Besitz eines Studententickets, die entsprechende linguistische Variable enthält zwei Singletons für Besitz und Nicht-Besitz eines Studententickets.

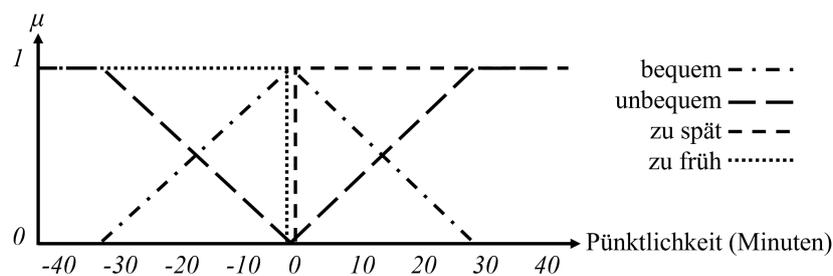
Hinsichtlich der Attribute einer Aktivität ist zunächst ihr Zweck wesentlich. Es sind aus Schritt 4 wenigstens die Zwecke Arbeit, Einkaufen und Familienbesuch zu unterscheiden, da bei Arbeitswegen zusätzlich auf Pünktlichkeit und beim Einkaufen zusätzlich das Sicherheitsgefühl zu berücksichtigen sind, während bei Familienbesuchen die Pünktlichkeit des öffentlichen Verkehrs keine Rolle spielt, da die Teilnehmerin sich bei der genauen Dauer des Aufenthalts nach den Ankunfts- und Abfahrtszeiten richtet. Die linguistische Variable ist daher mit drei Singletons für die drei genannten Zwecke anzulegen. Um insbesondere im Fall der Arbeitswege Hin- und Rückfahrt unterscheiden zu können, ist weiterhin eine linguistische Variable für den Trip anzulegen, die anhand zweier Singletons abbildet, ob es sich bei einem Trip um eine Hinfahrt oder eine Rückfahrt handelt. Da die Anwesenheit des Partners eine Rolle bei der Entscheidungsfindung spielt, ist diese als boolesches Attribut einer Aktivität abzubilden und durch eine entsprechende linguistische Variable mit zwei Singletons für Ab- oder Anwesenheit des Partners bei der Aktivität abzubilden.

Die übrigen entscheidungsrelevanten Attribute gehören zu den zu bewertenden Mobilitätsoptionen, die erforderlichen linguistischen Terme ergeben sich auch hier aus Schritt 4 beziehungsweise Schritt 8. Die Dauer eines Fußweges ist mit den linguistischen Termen kurz und lang zu beschreiben, die entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen ergeben sich aus den Interviewzitate zu Fußwegen in Anhang B. Die Teilnehmerin benennt zehn Minuten als konkreten Wert für zu lange Fußwege, der linguistische Term lang wird daher durch eine abschnittsweise definierte Zugehörigkeitsfunktion abgebildet mit steigender Zugehörigkeit von 0 bis 10 Minuten, danach konstant. Die Zugehörigkeitsfunktion für den linguistischen Term kurz fällt linear von 0 bis 10 Minuten und ist danach ebenfalls konstant.

Zu Radwegen benennt die Teilnehmerin drei beziehungsweise dreieinhalb Kilometer als Grenze, genutzt wird in dieser Arbeit die kleinere der beiden Angaben. Vergleichbar

mit den Fußwegen ist die Zugehörigkeitsfunktion für den linguistischen Term lang eine von 0 bis 3 Kilometer linear steigende und danach konstante Funktion, die für den linguistischen Term kurz invers dazu eine von 0 bis 3 Kilometer linear fallende und danach konstante Funktion.

Die linguistische Variable für Pünktlichkeit nutzt als Eingabewert die Differenz zwischen Beginn der verfolgten Aktivität und Ankunftszeit bei Hinfahrten und Ende der verfolgten Aktivität und Abfahrtszeit bei Rückfahrten, um die Pünktlichkeit zu fuzzifizieren. Gemäß der Angaben der Teilnehmerin werden 30 bis 35 Minuten Differenz als unbequem empfunden, erneut wird an dieser Stelle die kleinere der Angaben genutzt. Die Zugehörigkeitsfunktion für den linguistischen Term unbequem fällt daher linear von  $-30$  bis  $0$  Minuten Differenz und steigt anschließend linear von  $0$  bis  $30$  Minuten, außerhalb des Intervalls  $[-30, 30]$  ist die Funktion konstant  $1$ . Die Zugehörigkeitsfunktion für den linguistischen Term bequem verhält sich invers und steigt linear von  $-30$  bis  $0$  Minuten Differenz, fällt linear von  $0$  bis  $30$  Minuten Differenz und ist außerhalb des Intervalls konstant. Weiterhin werden die linguistischen Terme zu spät und zu früh definiert, um bei Arbeitswegen eine zu späte Ankunft und ein zu frühes Aufbrechen erkennen zu können. Die Zugehörigkeitsfunktion für zu spät ist eine Stufenfunktion, die ab einer Differenz von  $1$  Minute, also einer Verspätung von einer Minute, konstant  $1$  ist, vorher konstant  $0$ . Die Zugehörigkeitsfunktion für zu früh ist analog dazu bis zu einer Differenz von  $-1$  Minuten konstant  $1$ , danach konstant  $0$ . Die linguistischen Terme zu spät und zu früh treten damit vergleichbar mit Singletons abrupt auf und haben keinen unscharfen Übergangsbereich. Abbildung 7.3 zeigt für die Fallstudie mit einem qualitativen Modell exemplarisch die linguistische Variable Pünktlichkeit mit den dazugehörigen linguistischen Termen.



**Abbildung 7.3:** Linguistische Variable Pünktlichkeit mit den dazugehörigen linguistischen Termen bequem, unbequem, zu spät und zu früh.

Die letzte benötigte linguistische Variable ist die Tageszeit mit dem linguistischen Term Nacht und damit verbundener Dunkelheit. Ein Term für den Tag ist mit der in Schritt 8 definierten Regelbasis der ersten Inferenzstufe nicht erforderlich. Da zur Erkennung, ob es sich bei einer Tageszeit um Nacht handelt, jedoch auch die Jahreszeit beziehungsweise die Länge des Tages berücksichtigt werden muss, erfordert die linguistische Variable Tageszeit nicht nur eine scharfe Tageszeit zwischen  $0$  und  $24$  Uhr, sondern auch die Länge des Tages im Jahr. Da der umgesetzte Prototyp

reale Zeitstempel nutzt, kann anhand des Datums einer Mobilitätsoption die Länge des Tages als zusätzliches Attribut der Mobilitätsoption bestimmt werden. Die Länge eines Tages wird dazu auf einer Skala von 0 für den 21. Dezember bis 182 für den 21. Juni abgebildet. Um mit der Uhrzeit als scharfem Eingabewert die Zugehörigkeit zum Term Nacht zu bestimmen, wird somit die Zugehörigkeitsfunktion dieses Terms dynamisch mit dem Wert zwischen 0 und 182 skaliert, um an jedem Tag im Jahr eine möglichst plausible Zugehörigkeit zu liefern. Zur Fuzzifizierung einer Tageszeit zum linguistischen Term Nacht werden dazu die nautische Dämmerung und der Sonnenaufgang beziehungsweise Sonnenuntergang herangezogen. Nach Ende der nautischen Abenddämmerung bis zum Beginn der nautischen Morgendämmerung ist die Zugehörigkeitsfunktion konstant 1, zwischen Sonnenaufgang und -untergang konstant 0, dazwischen linear. Die detaillierte Herleitung der Zugehörigkeitsfunktion Nacht ist in Anhang D beschrieben.

Die genaue Definition der linguistischen Variablen zur Fuzzifizierung ist in Anhang C in Abbildung C.2 dargestellt.

Die Startszene der Szenariobeschreibung dieser Fallstudie enthält einen Agenten, der die Teilnehmerin des Interviews repräsentiert. Das einzige entscheidungsrelevante Attribut des Agenten ist, wie in Schritt 9 beschrieben, der Besitz oder Nicht-Besitz eines Studententickets. Die Startszene ist in Anhang C in Abbildung C.5 detailliert dargestellt.

Insgesamt werden für diese Fallstudie fünf Aktivitäten abgebildet, die durch den Agenten zu verfolgen sind. Diese wurden ausgewählt, da die Teilnehmerin für jede dieser Aktivitäten, abhängig von der jeweiligen konkreten Entscheidungssituation, jeweils unterschiedliche Fortbewegungsmittel nutzt. Diese Aktivitäten bieten damit ein besonders großes Potenzial für Aussagen über die Eignung des umgesetzten Prototyps, da nicht nur geprüft werden kann, ob sich der abgebildete Agent für die gleichen Fortbewegungsmittel wie die Teilnehmerin entscheidet, sondern auch, ob die gleichen Veränderungen an der Entscheidungssituation zu den gleichen Veränderungen im Entscheidungsverhalten führen. Bei den fünf Aktivitäten handelt es sich um zwei unterschiedliche berufliche Tätigkeiten nördlich beziehungsweise westlich des Wohnorts, zwei Familienbesuche innerorts beziehungsweise außerorts sowie einen Einkauf beim nahegelegenen Supermarkt. Die genaue Definition dieser fünf Aktivitäten ist in Anhang C in Abbildung C.6 dargestellt<sup>79</sup>.

Als Fortbewegungsmittel im eigenen Besitz stehen dem Agenten, basierend auf den Aussagen der Teilnehmerin, das Gehen zu Fuß, ein Fahrrad sowie ein Auto zur Verfügung. Die genaue Definition dieser drei Fortbewegungsmittel ist in Anhang C in Abbildung C.8 dargestellt.

Das abgeleitete Fuzzyinferenzsystem sowie die beschriebene Startszene sind Teile der Szenariobeschreibung für diese Fallstudie. Die Szenariobeschreibung umfasst fünf Simulationstage für die fünf zu untersuchenden Aktivitäten und erfordert kein wiederholtes Planungs-

<sup>79</sup>Die Erfassung der exakten Orte, Uhrzeiten und Dauern der fünf Aktivitäten war nicht Teil des ursprünglichen Interviews zur Nutzung unterschiedlicher Verkehrsmittel und wurde daher nachträglich im Rahmen dieser Evaluation durchgeführt.

tervall, da die Fortbewegungsmittel des Agenten sowie etwaige Verbindungen mit dem öffentlichen Verkehr unabhängig vom Zeitpunkt der Suche nach Mobilitätsoptionen als beständig anzunehmen sind. Die Planung von Hin- und Rückfahren wird vom Agenten gleichzeitig durchgeführt, da dies dem Planungsverhalten der Teilnehmerin entspricht. Als Mobilitätsdienstleister wird die Fahrkreis-Schnittstelle genutzt, da diese neben Individualverkehr auch Mobilitätsangebote des öffentlichen Verkehrs bereitstellen kann. Die detaillierte Definition dieser Szenariobeschreibung ist in Anhang C in Abbildung C.1 dargestellt.

### 7.1.2.2 Simulationsverhalten und -ergebnisse

Die Beschreibung der Simulationsergebnisse erfolgt anhand der fünf in Abschnitt 7.1.2.1 genannten Aktivitäten des Agenten. Dazu werden simulatives Verhalten des Agenten und reales Verhalten der Teilnehmerin gegenübergestellt und auch hinsichtlich einer Änderung des Verhaltens bei veränderter Entscheidungssituation beschrieben.

**Arbeit nördlich des Wohnorts** Die erste zu betrachtende Aktivität ist die berufliche Tätigkeit der Teilnehmerin an ihrer Arbeitsstelle in einem Ort nördlich ihres Wohnortes. Die Teilnehmerin gab im Gespräch an, dass ihr zu Beginn der Tätigkeit kein Auto zur Verfügung gestanden und sie die Hin- und Rückfahrten daher mit dem Angebot des öffentlichen Verkehrs durchführt habe. Das habe sich als problematisch erwiesen, da bei der Hinfahrt die Verbindung mit der Bahn wenige Minuten zu spät am Zielort angekommen sei und die Teilnehmerin die Arbeitsstätte nicht rechtzeitig erreichen können. Sie habe daher den Überlandbus nutzen müssen, der mehr als eine halbe Stunde zu früh am Ziel einträte. Um den Überlandbus im Wohnort zu erreichen, sei der Stadtbus genutzt worden, am Zielort sei der Weg von der Bushaltestelle zur Arbeitsstätte zu Fuß zurückgelegt worden. Für die Rückfahrt gab die Teilnehmerin an, sie habe nach Arbeitsende ebenfalls mehr als eine halbe Stunde warten müssen, bevor der erste Bus zurück ins Zentrum ihres Wohnorts abfahre, um von dort den Stadtbus nach Hause nutzen zu können. Aus diesem Grund nutze die Teilnehmerin ein Auto immer dann, wenn es ihr zu Verfügung stünde, da dies insgesamt als angenehmer empfunden würde. Dieser variable Simulationsparameter ist in der in Abbildung C.8 in Anhang C dargestellten Szenariobeschreibung berücksichtigt.

In Tabelle 7.3 sind die während des Simulationsexperiments über die Fahrkreis-Schnittstelle abgerufenen Mobilitätsoptionen dargestellt, die dem Agenten zur Durchführung der Aktivität zur Verfügung stehen. Dargestellt sind die verfügbaren Mobilitätsoptionen anhand der dazugehörigen Fortbewegungsmittel und die jeweils entscheidungsrelevanten Attribute als Eingabewerte in das hinterlegte Fuzzyinferenzsystem sowie die inferierten Nutzen der einzelnen Trips und die Summe der Nutzen für gültige Touren. Enthält eine Mobilitätsoption im Sinne einer intermodalen Verkehrskette mehr als ein Fortbewegungsmittel, sind diese in der Reihenfolge ihres Auftretens angegeben. Tritt ein entscheidungsrelevantes Attribut mehrfach auf, beispielsweise bei

mehreren Fußwegen innerhalb einer Mobilitätsoption, ist jeweils der größte Wert angegeben.

**Tabelle 7.3:** Mögliche Hin- und Rückfahrten für die Arbeit nördlich des Wohnorts.

	Mobilitäts- option	Lauf- dauer	Fahrrad- strecke	Pünkt- lichkeit	Studen- tenticket	Einzel- nutzen	Summe Nutzen
Hinfahrten							
a)	Auto	—	—	—	—	0,0	a) + f) 0,0
b)	Gehen Stadtbus Landbus Gehen	10 min	—	-35 min	ja	-0,333	b) + g) -0,666
c)	Fahrrad Landbus Gehen	10 min	3,655 km	-35 min	ja	-0,457	c) + h) -0,923
d)	Gehen Stadtbus Bahn Gehen	17 min	—	+2 min	ja	-1,0	d) + g) -1,333
e)	Fahrrad Bahn Gehen	17 min	4,253 km	+2 min	ja	-1,0	e) + i) -1,5
Rückfahrten							
f)	Auto	—	—	—	—	0,0	s. o.
g)	Gehen Landbus Stadtbus Gehen	10 min	—	+38 min	ja	-0,333	s. o.
h)	Gehen Landbus Fahrrad	10 min	3,731 km	+38 min	ja	-0,466	s. o.
i)	Gehen Landbus Gehen Fahrrad	12 min	4,319 km	+38 min	ja	-0,5	s. o.

Während der Simulation wurden fünf mögliche Hinfahrten und vier mögliche Rückfahrten identifiziert. Wenn dem Agenten innerhalb der Szenariobeschreibung ein Auto zur Verfügung gestellt wurde, wurde mit Hinfahrt a) und Rückfahrt f) eine gültige Tour mit dem Auto identifiziert. Da für diese Aktivität keine entscheidungsrelevan-

ten Attribute vorliegen, welche die Entscheidung für das Auto beeinflussen, werden sowohl Hin- als auch Rückfahrt mit dem Auto mit einem Nutzen von 0,0 bewertet, der Gesamtnutzen der Tour ist damit ebenfalls 0,0. Die übrigen Mobilitätsoptionen sind intermodale Verkehrsketten, bei denen wenigstens ein Abschnitt durch öffentliche Verkehrsmittel bewältigt wird. Die Tour aus Hinfahrt b) und Rückfahrt g) entspricht der von der Teilnehmerin genutzten Tour, wenn ihr kein Auto zur Verfügung stand, und hat einen Gesamtnutzen von  $-0,666$ . Der längste Fußweg fällt bei dieser Mobilitätsoption am Ende an, weiterhin erreicht der Agent 35 Minuten zu früh das Ziel. Bei der Rückfahrt liegt mit 38 Minuten ebenfalls eine durch die Taktung des Überlandbusses ausgelöste, erhebliche Verzögerung vor, bevor diese angetreten werden kann. Die Tour c) + h) ähnelt dieser, allerdings sind die Fußwege zum beziehungsweise vom Stadtbus sowie die Stadtbusfahrt durch Fahrradfahrten ersetzt. Durch die vom Agenten als lang wahrgenommene Fahrradstrecke liegt der Gesamtnutzen dieser Tour mit  $-0,923$  unter dem der Tour b) + g). Die Tour d) + g) ersetzt bei der Hinfahrt den Überlandbus durch die Bahn, diese kommt allerdings zwei Minuten zu spät am Ziel an, sodass der Nutzen der Hinfahrt daher bei  $-1$  und der Gesamtnutzen der Tour somit bei  $-1,333$  liegt. Die Rückfahrt dieser Tour entspricht der von Tour b) + g), da hier keine vergleichbare Mobilitätsoption mit Bahnnutzung durch die Fahrkreisschnittstelle identifiziert werden konnte. Die Tour e) + i) nutzt erneut das Fahrrad, um die Bahn zu erreichen, als Konsequenz daraus muss das Fahrrad auf dem Rückweg nach der Nutzung des Überlandbusses zu Fuß vom Bahnhof abgeholt werden, der Gesamtnutzen dieser Tour fällt mit  $-1,5$  am schlechtesten aus.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Agent ein Auto nutzte, wenn ihm dieses zur Verfügung stand, da die Tour aus Hin- und Rückfahrt mit dem Auto mit 0,0 den besten Nutzen vorweist. Wurde das Auto in einem zweiten Simulationsexperiment in der Szenariobeschreibung aus der Liste der Fortbewegungsmittel des Agenten entfernt, so wählte dieser eine intermodale Verkehrskette, bestehend aus Fußwegen sowie dem Stadt- und Landbus für die Hin- und Rückfahrt. Dieses Verhalten entspricht dem tatsächlichen Verhalten der Teilnehmerin.

**Arbeit westlich des Wohnorts** Die zweite berufliche Tätigkeit der Teilnehmerin befindet sich westlich ihres Wohnortes. Die Teilnehmerin gab an, dass sie diese Arbeitsstätte anfänglich mit einer intermodalen Verkehrskette aus Fußwegen sowie Stadt- und Überlandbus erreicht habe, dieses Verhalten jedoch geändert habe, nachdem ihr Studententicket aufgrund des abgeschlossenen Studiums abgelaufen sei. Nachdem ihre Fahrten nicht mehr durch das Studententicket kostenlos gewesen seien, habe sie das Auto genutzt, um ihre Arbeitsstätte zu erreichen. Dieser variable Simulationsparameter ist in der in Abbildung C.5 in Anhang C dargestellten Szenariobeschreibung berücksichtigt.

In Tabelle 7.4 sind die abgerufenen Mobilitätsoptionen dargestellt, die dem Agenten zur Durchführung dieser Aktivität zur Verfügung stehen.

**Tabelle 7.4:** Mögliche Hin- und Rückfahrten für die Arbeit westlich des Wohnorts.

	Mobilitäts- option	Lauf- dauer	Fahrrad- strecke	Pünkt- lichkeit	Studen- tenticket	Einzel- nutzen	Summe Nutzen
Hinfahrten							
a)	Auto	—	—	—	—	0,0	a) + f) 0,0
b)	Gehen Stadtbus	8 min	—	-7 min	ja	0,311	b) + g) 0,111
	Landbus Gehen						
c)	Fahrrad Landbus	8 min	3,161 km	-7 min	ja	-0,017	c) + h) -0,417
	Gehen						
d)	Gehen Stadtbus	8 min	—	-7 min	nein	-0,033	d) + i) -0,833
	Landbus Gehen						
e)	Fahrrad Landbus	8 min	3,161 km	-7 min	nein	-0,356	e) + j) -1,223
	Gehen						
Rückfahrten							
f)	Auto	—	—	—	—	0,0	s. o.
g)	Gehen Landbus	8 min	—	+36 min	ja	-0,2	s. o.
	Stadtbus Gehen						
h)	Gehen Landbus	8 min	3,161 km	+36 min	ja	-0,4	s. o.
	Fahrrad						
i)	Gehen Landbus	8 min	—	+36 min	nein	-0,8	s. o.
	Stadtbus Gehen						
j)	Gehen Landbus	8 min	3,161 km	+36 min	nein	-0,867	s. o.
	Fahrrad						

Während der Simulation wurden jeweils drei mögliche Hin- und Rückfahrten identifiziert. Da der Besitz eines Studententickets jedoch den Nutzen jeweils zweier Hin- und Rückfahrten beeinflusst, sind insgesamt jeweils fünf Hin- und Rückfahrten dargestellt, um den Nutzen der Mobilitätsoptionen, die wenigstens einen Abschnitt mit

öffentlichem Verkehr vorsehen, mit und ohne Studententicket vergleichbar zu machen. Ebenso wie bei der vorherigen Aktivität wird die Nutzung des Autos bei Tour a) + f) mit einem Gesamtnutzen von 0,0 bewertet, da auch hier keine entscheidungsrelevanten Attribute die Bewertung des Autos beeinflussen. Die Tour b) + g) nutzt für Hin- und Rückfahrt den Stadt- und Überlandbus zusammen mit Fußwegen zum und vom Bus. Die Laufdauer liegt mit acht Minuten etwas unter der in Abschnitt 7.1.2.1 identifizierten Obergrenze, die Pünktlichkeit wird mit einer Ankunft von lediglich sieben Minuten vor Arbeitsbeginn positiv bewertet. Wenngleich die Wartezeit nach Arbeitsende bis zum Antritt der Rückfahrt mit 36 Minuten hoch ist, wird die Tour als Ganze mit einem Gesamtnutzen von 0,111 etwas besser als die Tour mit dem Auto eingeschätzt. Für Tour c) + h) ist der gleiche Überlandbus vorgesehen, allerdings wird beim Abschnitt im Wohnort des Agenten der Stadtbus durch eine Fahrradfahrt ersetzt. Diese Tour wird mit einem Gesamtnutzen von  $-0,417$  schlechter als Tour b) + g) bewertet, da die zusätzlichen Fahrradstrecken negativ bewertet werden und keine positive Auswirkung auf beispielsweise Laufwege an der Arbeitsstätte oder die Pünktlichkeit haben. Die weiteren Mobilitätsoptionen d) und e) sowie i) und j) zeigen das Entscheidungsverhalten des Agenten in einem zweiten Simulationsexperiment, in dem in der Szenariobeschreibung das Studententicket aus den Attributen des Agenten entfernt wurde. Die Tour d) + i) entspricht damit der Tour b) + g), wird allerdings durch den ausbleibenden ökonomischen Vorteil durch das fehlende Studententicket mit  $-0,833$  schlechter bewertet. Ebenso wird die Tour e) + j), von den Mobilitätsoptionen der Tour c) + h) entsprechend, mit  $-1,223$  schlechter bewertet.

Insgesamt ist festzuhalten, dass der Agent eine intermodale Verkehrskette, bestehend aus Fußwegen sowie dem Stadt- und Landbus, nutzte, solange ihm ein Studententicket zur Verfügung stand. Nachdem das Studententicket aus der Szenariobeschreibung entfernt und das Simulationsexperiment erneut durchgeführt wurde, wurden die Mobilitätsoptionen mit öffentlichem Verkehr insgesamt schlechter als die Autonutzung bewertet, sodass der Agent in diesem Simulationsexperiment das Auto für Hin- und Rückfahrt nutzte. Dieses Verhalten entspricht dem tatsächlichen Verhalten der Teilnehmerin.

**Familienbesuch innerorts** Die dritte Aktivität der Teilnehmerin ist ein Familienbesuch innerhalb ihres Wohnortes. Die Teilnehmerin gab dazu an, dass sie ihre Familie mit dem Bus besuche, wenn sie alleine unterwegs sei, jedoch das Auto nutze, wenn sie gemeinsam mit ihrem Partner unterwegs sei, da dieser Autofahren bevorzuge. Dies ist durch den variablen Simulationsparameter in der in Abbildung C.6 in Anhang C dargestellten Szenariobeschreibung berücksichtigt.

In Tabelle 7.5 sind die abgerufenen Mobilitätsoptionen dargestellt, die dem Agenten zur Durchführung dieser Aktivität zur Verfügung stehen.

Während der Simulation wurden jeweils drei mögliche Hin- und Rückfahrten identifiziert. Da die Tatsache, ob es sich um eine Tour gemeinsam mit dem Partner handelt

**Tabelle 7.5:** Mögliche Hin- und Rückfahrten für Familienbesuche innerorts.

Mobilitäts- option	Lauf- dauer	Fahrrad- strecke	Studen- tenticket	mit Partner	Einzel- nutzen	Summe Nutzen
Hinfahrten						
a) Fahrrad	—	6,045 km	—	—	-1,0	a) + f) -2,0
b) Auto	—	—	—	nein	0,0	b) + g) 0,0
c) Gehen Stadtbus Gehen	8 min	—	ja	nein	0,467	c) + h) 0,934
d) Auto	—	—	—	ja	1,0	d) + i) 2,0
e) Gehen Stadtbus Gehen	8 min	—	ja	ja	0,2	e) + j) 0,4
Rückfahrten						
f) Fahrrad	—	5,560 km	—	—	-1,0	s. o.
g) Auto	—	—	—	nein	0,0	s. o.
h) Gehen Stadtbus Gehen	8 min	—	ja	nein	0,467	s. o.
i) Auto	—	—	—	ja	1,0	s. o.
j) Gehen Stadtbus Gehen	8 min	—	ja	ja	0,2	s. o.

oder nicht, jedoch den Nutzen jeweils zweier Hin- und Rückfahrten beeinflusst, sind insgesamt jeweils fünf Hin- und Rückfahrten dargestellt, um den Nutzen der Mobilitätsoptionen mit Änderung dieses entscheidungsrelevanten Attributes vergleichbar zu machen. Da es sich im Gegensatz zu den beiden vorherigen um eine vergleichsweise nahegelegene Aktivität innerorts handelt, werden bei der Tour a) + f) erstmalig Hin- und Rückfahrten mit ausschließlicher Nutzung des Fahrrades durch die Fahrkreisschnittstelle vorgeschlagen. Da die Fahrradstrecke jedoch als zu lang wahrgenommen wird, sind Hin- und Rückfahrt jeweils mit einem Nutzen von  $-1$  bewertet, die Tour daher mit einem Gesamtnutzen von  $-2$ . Die Tour b) + g) mit dem Auto wird, wenn der Agent der Aktivität ohne Partner nachgeht, ebenso wie bei den vorherigen beiden Aktivitäten mit einem Gesamtnutzen von  $0,0$  bewertet. Bei der dritten Tour c) + h) handelt es sich um eine intermodale Verkehrskette, bestehend aus Fußwegen sowie

dem Stadtbus. Da Pünktlichkeit bei Familienbesuchen, wie in Abschnitt 7.1.2.1 beschrieben, keine Rolle spielt und öffentlicher Verkehr bei diesen Aktivitäten immer als bequem empfunden wird, hat lediglich die mit acht Minuten als lang empfundene Dauer des Fußweges zum beziehungsweise vom Elternhaus eine negative Auswirkung auf den Nutzen der Hin- und Rückfahrt. Der Gesamtnutzen dieser Tour liegt damit bei 0,934. Die weiteren Mobilitätsoptionen d) und e) sowie i) und j) zeigen das Entscheidungsverhalten des Agenten in einem zweiten Simulationsexperiment, in dem der Familienbesuch gemeinsam mit dem Partner durchgeführt werden soll, dazu wird das entsprechende entscheidungsrelevante Attribut der Aktivität in der Szenariobeschreibung angepasst. Die Tour d) + i) entspricht damit der Tour b) + g) mit dem Auto, wird in diesem veränderten Simulationsexperiment jedoch mit einem Gesamtnutzen von 2 bestmöglich bewertet. Im Gegensatz dazu wird die Tour e) + j), die den öffentlichen Verkehr nutzt, mit einem Gesamtnutzen von 0,4 schlechter bewertet als bei der Verfolgung der Aktivität ohne Partner.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Agent eine intermodale Verkehrskette aus Fußwegen und Stadtbus nutzte, wenn er der Aktivität alleine nachging, jedoch das Auto nutzte, wenn er zusammen mit dem Partner unterwegs war. Die Anwesenheit des Partners verbesserte nicht nur die Bewertung des Autos, sie verschlechterte auch die des öffentlichen Verkehrs. Dieses Verhalten entspricht dem tatsächlichen Verhalten der Teilnehmerin.

**Familienbesuch außerorts** Die vierte Aktivität der Teilnehmerin ist ein weiterer Familienbesuch, in diesem Fall außerhalb ihres Wohnortes. Die Teilnehmerin gab zu dieser Aktivität das gleiche Verhalten wie beim Familienbesuch innerorts an, nämlich dass sie die Familie mit dem Bus besuche, wenn sie alleine unterwegs sei, jedoch das Auto nutze, wenn sie gemeinsam mit ihrem Partner unterwegs sei. Dies ist durch den variablen Simulationsparameter in der in Abbildung C.6 in Anhang C dargestellten Szenariobeschreibung berücksichtigt.

In Tabelle 7.6 sind die abgerufenen Mobilitätsoptionen dargestellt, die dem Agenten zur Durchführung dieser Aktivität zur Verfügung stehen.

Während der Simulation wurden jeweils zwei mögliche Hin- und Rückfahrten identifiziert. Wie auch bei der vorherigen Aktivität zum Familienbesuch innerorts existiert jeweils eine Hin- und Rückfahrt mit dem Auto und eine mit dem öffentlichen Verkehr. Eine Tour mit dem Fahrrad wurde bei dieser Aktivität nicht durch die Fahrkreisschnittstelle vorgeschlagen, da die Distanz zwischen den beiden Orten zu groß ist. Die beiden übrigen Hin- und Rückfahrten zeigen erneut den Nutzen der Mobilitätsoptionen in einem zweiten Simulationsexperiment, bei dem die Aktivität gemeinsam mit dem Partner durchgeführt wird. Die Tour a) + e) mit dem Auto wird erneut mit einem Gesamtnutzen von 0,0 bewertet, wenn der Agent der Aktivität ohne Partner nachgeht. Im Vergleich zur vorherigen Aktivität wird die Tour b) + f), bestehend aus einer intermodalen Verkehrskette aus Fußwegen sowie dem Stadt- und Überlandbus,

**Tabelle 7.6:** Mögliche Hin- und Rückfahrten für Familienbesuche außerorts.

	Mobilitäts- option	Lauf- dauer	Fahrrad- strecke	Studen- tenticket	mit Partner	Einzel- nutzen	Summe Nutzen
Hinfahrten							
a)	Auto	—	—	—	nein	0,0	a) + e) 0,0
b)	Gehen Stadtbus Landbus Gehen	3 min	—	ja	nein	0,8	b) + f) 1,6
c)	Auto	—	—	—	ja	1,0	c) + g) 2,0
d)	Gehen Stadtbus Landbus Gehen	3 min	—	ja	ja	0,7	d) + h) 1,4
Rückfahrten							
e)	Auto	—	—	—	nein	0,0	s. o.
f)	Gehen Landbus Stadtbus Gehen	3 min	—	ja	nein	0,8	s. o.
g)	Auto	—	—	—	ja	1,0	s. o.
h)	Gehen Landbus Stadtbus Gehen	3 min	—	ja	ja	0,7	s. o.

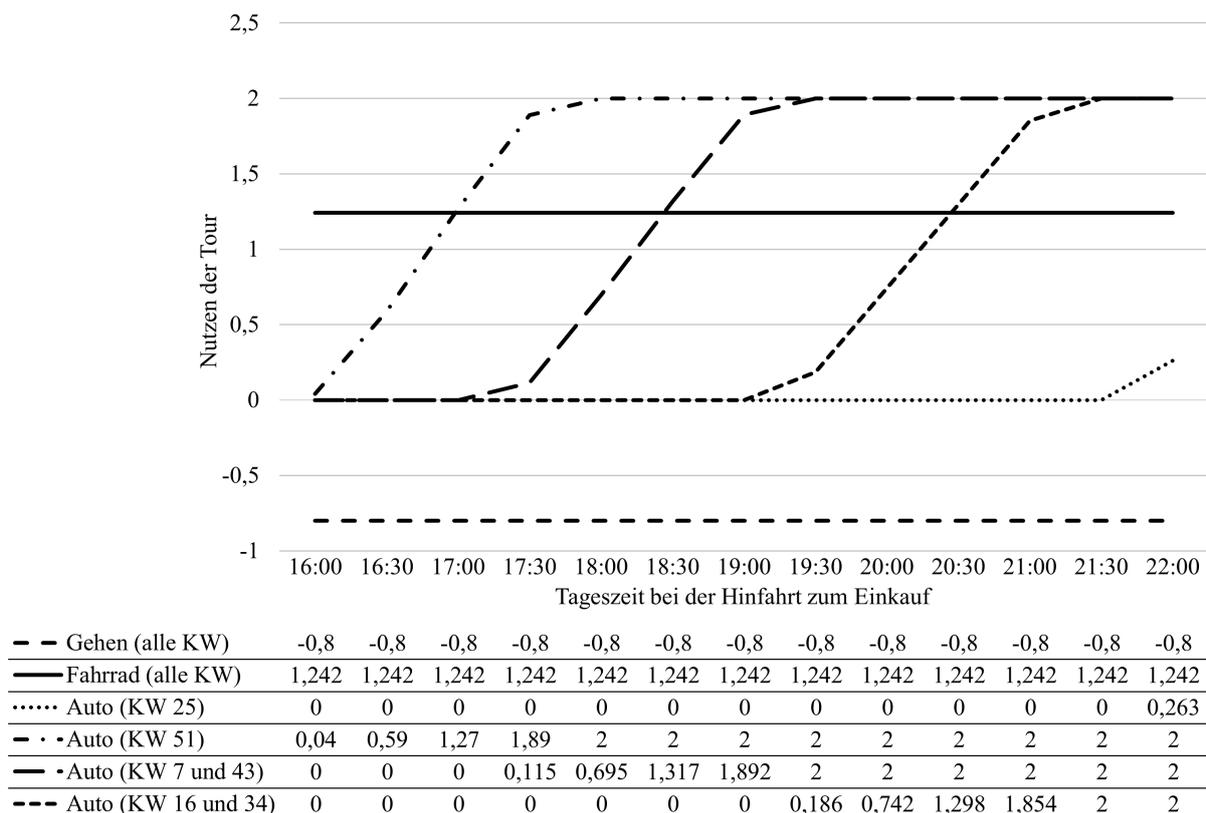
durch die sehr kurzen Fußwege von maximal drei Minuten als besonders positiv wahrgenommen, der Gesamtnutzen dieser Tour ist mit 1,6 gut bewertet. Erneut stellen die Hin- und Rückfahrten c) und d) sowie g) und h) die Ergebnisse eines zweiten Simulationsexperiments dar, bei dem die Szenariobeschreibung angepasst wurde, damit der Agent der Aktivität zusammen mit dem Partner und nicht alleine nachgeht. Unter diesen veränderten Bedingungen wird Tour c) + g) mit dem Auto mit einem Gesamtnutzen von 2 bestmöglich bewertet. Tour d) + h) hingegen wird durch die Anwesenheit des Partners etwas schlechter wahrgenommen, sodass diese mit einem Gesamtnutzen von nur noch 1,4 bewertet wird.

Insgesamt kann auch bei der vierten Aktivität festgestellt werden, dass der Agent eine intermodale Verkehrskette aus Fußwegen sowie dem Stadt- und Überlandbus nutzte,

wenn er der Aktivität alleine nachging, jedoch erneut das Auto nutzte, wenn er zusammen mit dem Partner unterwegs war. Dieses Verhalten entspricht dem tatsächlichen Verhalten der Teilnehmerin.

**Einkaufen** Die fünfte und letzte Aktivität, der die Teilnehmerin nachgeht, ist ein regelmäßiger Einkauf in einem nahegelegenen Supermarkt. Die Teilnehmerin gab im Interview an, dass sie die Entscheidung für ein Fortbewegungsmittel von ihrem Sicherheitsgefühl abhängig mache, das, wie in Abschnitt 7.1.2.1 beschrieben, von der Dunkelheit zum Zeitpunkt der Tour abhängig sei.

In Abbildung 7.4 sind die Gesamtnutzen der Hin- und Rückfahrten der abgerufenen Mobilitätsoptionen dargestellt, die dem Agenten zur Durchführung dieser Aktivität zur Verfügung stehen. Da für diese Aktivität, wie in Abbildung C.1 und Abbildung C.6 in Anhang C dargestellt, insgesamt 78 Simulationsexperimente, nämlich jeweils an sechs verschiedenen Tagen im Jahr und zu jeweils 13 verschiedenen Tageszeiten an jedem dieser Tage, durchgeführt wurden, werden die Ergebnisse nicht tabellarisch mit den in der Entscheidungssituation geltenden entscheidungsrelevanten Attributen, sondern grafisch dargestellt.



**Abbildung 7.4:** Nutzen der möglichen Touren zum Einkauf in Abhängigkeit von der Jahreszeit anhand verschiedener Kalenderwochen (KW) sowie der Tageszeit.

Die sechs Tage im Jahr, die in den verschiedenen Simulationsexperimenten untersucht wurden, lagen auf einem Freitag in unterschiedlichen Kalenderwochen des simulierten Jahres. Tatsächlich handelt es sich bei dem Freitag in Kalenderwoche 25 um den

längsten Tag im Jahr und bei dem Freitag in Kalenderwoche 51 um den kürzesten. Die übrigen vier Tage liegen in den Kalenderwochen 7 und 43 jeweils 119 Tage vor oder nach dem längsten Tag und in den Kalenderwochen 16 und 34 jeweils 56 Tage vor oder nach dem längsten Tag, um das Jahr mit insgesamt sechs simulierten Stichtagen möglichst gleichmäßig abzudecken. Die 13 Tageszeiten liegen in halbstündigem Abstand zwischen 16 Uhr und 22 Uhr als Ankunftszeit beim Supermarkt und einer Abfahrtszeit jeweils 15 Minuten später.

Bei jedem der 78 Simulationsexperimente wurden jeweils drei mögliche Touren aus zueinander passenden Hin- und Rückfahrten durch die Fahrkreis-Schnittstelle vorgeschlagen. Der Agent kann entweder zu Fuß gehen, mit dem Fahrrad oder mit dem Auto fahren. Da die Tages- und Jahreszeit mit den für diese Fallstudie gegebenen Fuzzyregeln keine Auswirkungen auf die Bewertung der Touren zu Fuß oder mit dem Fahrrad haben, ist deren Bewertung dementsprechend über alle Simulationsexperimente hinweg konstant. Eine Tour mit dem Fahrrad ist aufgrund der eher kurzen Strecke von 568 Metern mit einem Gesamtnutzen von 1,242 gut bewertet, eine Tour zu Fuß aufgrund der eher langen Dauer von sieben Minuten ist mit einem Gesamtnutzen von  $-0,8$  schlecht bewertet. Fahrradfahren wird also dem Gehen zu Fuß vorgezogen.

Der Nutzen des Autos hingegen wird sowohl durch die Tageszeit als auch durch die Jahreszeit beeinflusst. Am kürzesten Tag im Jahr in Kalenderwoche 51 tritt die Dämmerung so früh ein, dass bereits um etwa 17 Uhr der Nutzen des Autos den des Fahrrades übersteigt, und der Agent das Auto bevorzugt. Am längsten Tag in Kalenderwoche 25 hingegen nutzt der Agent zu keiner Zeit das Auto, da der Gesamtnutzen zu jeder Tageszeit unter dem des Fahrrades liegt. In Kalenderwoche 7 und 43 hat sich der Zeitpunkt des Wechsels vom Fahrrad auf das Auto im Vergleich zu Kalenderwoche 51 um ungefähr 90 Minuten verschoben und liegt in diesen Simulationsexperimenten bei etwa 18:30 Uhr. In Kalenderwoche 16 und 34 verschiebt sich der Wechsel vom Fahrrad auf das Auto um weitere zwei Stunden und liegt an diesen Tagen bei ungefähr 20:30 Uhr.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Tageszeit, zu welcher der Agent vom Fahrrad auf das Auto wechselt, um den Einkauf durchzuführen, von der Jahreszeit beziehungsweise der Länge des Tages im Jahr abhängig ist. Trotz des gleichmäßigen Abstands der sechs in den Simulationsexperimenten untersuchten Tage unterscheiden sich die Abstände zwischen den Schnittpunkten der Gesamtnutzen von Fahrrad und Auto. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass sich mit der Länge des Tages nicht nur der Beginn der Dämmerung verschiebt, sondern auch die Dauer der Dämmerung verlängert.

### 7.1.2.3 Diskussion

Die in Abschnitt 7.1.2.2 dargestellten Ergebnisse der Fallstudie mit einem qualitativen Modell zeigen in den ersten vier Aktivitäten ein Agentenverhalten, das dem Verhalten der

Teilnehmerin des zugrunde liegenden Interviews entspricht. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich bei den Experimentalparametern der ersten vier Aktivitäten, der Besitz eines Studententickets, das Vorhandensein eines Autos als auch die Gegenwart des Partners bei einer Aktivität, jeweils um binäre Parameter handelt, die entweder erfüllt sind oder nicht. Aus diesem Grund fallen die Unterschiede in den inferierten Nutzen zwischen den Simulationsexperimenten entsprechend deutlich aus, da es sich in allen Fällen um eine deutliche Änderung der Entscheidungssituation handelt. Da jedoch mit den Möglichkeiten eines Interviews lediglich derartig binäre Experimentalparameter sinnvoll artikuliert werden können, ist die überwiegende Nutzung binärer Experimentalparameter in dieser Evaluation als angemessen anzusehen.

Im Gegensatz zu den ersten vier Aktivitäten existiert für die fünfte Aktivität, das Einkaufen, keine exakte Angabe der Interviewteilnehmerin, wann beziehungsweise bei welchem Grad der Dunkelheit sie das genutzte Fortbewegungsmittel wechselt, da derartige Angaben ohne ein detailliertes Reisetagebuch nicht plausibel in einem Interview gemacht werden können. Die Simulationsergebnisse zur fünften Aktivität dienen daher vorrangig zur Einschätzung der Plausibilität sowie zur Beschreibung des Simulationsverhaltens bei kontinuierlichen Veränderungen von kardinalen entscheidungsrelevanten Attributen in der Szenariobeschreibung. Die Simulationsergebnisse zur fünften Aktivität zeigen darüber hinaus exemplarisch, dass der subjektive Kontext der Entscheidungssituation, in dieser Fallstudie das Sicherheitsgefühl, mithilfe geeigneter linguistischer Variablen aus bereits wenigen zur Verfügung stehenden entscheidungsrelevanten Attributen erfolgreich inferiert werden kann.

Insgesamt ist es grundsätzlich gelungen, die Entscheidungsgründe der Teilnehmerin auf Grundlage des Interviewtranskripts zu identifizieren und als Fuzzyregeln zu formulieren. Die erforderlichen linguistischen Variablen und linguistischen Terme konnten ebenfalls anhand des Transkripts bestimmt werden. Das simulative Verhalten des Agenten und das reale Verhalten der Interviewteilnehmerin entsprechen sich in allen betrachteten Simulationsexperimenten, sodass eine Eignung des umgesetzten Prototyps im Sinne der in Abschnitt 7.1 formulierten Evaluationshypothese zu erkennen ist.

Als besondere Herausforderung bei der Erstellung eines Fuzzyinferenzsystems auf Grundlage qualitativer Interviewdaten ist jedoch festzuhalten, dass es nicht immer eindeutig ist, ob artikuliert Entscheidungsgründe in lediglich eine oder in mehrere gegensätzliche Fuzzyregeln zu überführen sind. Im für diese Fallstudie genutzten Interviewtranskript beschreibt die Teilnehmerin beispielsweise keinerlei Faktoren, die zu einem explizit guten Sicherheitsgefühl führen. Das Sicherheitsgefühl kann also lediglich bei Dunkelheit negativ beeinflusst werden, der Standardfall in allen anderen Situationen ist ein neutrales Sicherheitsgefühl, das keinerlei Einfluss auf das Entscheidungsverhalten hat. Dementsprechend genügt eine Fuzzyregel, um explizit schlechtes Sicherheitsgefühl zu inferieren. Nach dem gleichen Prinzip sind auch die Fuzzyregeln zur Einstellung zum öffentlichen Verkehr bei Besitz eines Studententickets und die Fuzzyregel zur Einstellung zum Autofahren bei Aktivitäten mit dem Partner erstellt worden. Demgegenüber sind die übrigen Entscheidungsgründe mit jeweils zwei Fuzzyregeln abgebildet, eine für explizit positive und eine für explizit negative Einstellungen. Da bei-

spielsweise öffentlicher Verkehr bei Pünktlichkeit explizit als bequem empfunden wird, bei starken Verspätungen jedoch explizit als unbequem, ist dies durch zwei Fuzzyregeln zu repräsentieren. Weiterhin ist bei der Erstellung einer Fuzzyregel zu berücksichtigen, welche Teilaussagen des Interviews in der Regel zu berücksichtigen sind. Dies ist beispielsweise bei der Einstellung zum öffentlichen Verkehr der Fall, die sowohl durch das Studententicket als auch durch die Anwesenheit des Partners bei der Aktivität beeinflusst wird.

## 7.2 Performance des Prototyps

Neben der in Abschnitt 7.1 durchgeführten Untersuchung der Eignung des Prototyps wird dieser auch hinsichtlich seiner Performance evaluiert. Dazu werden sowohl die Auswirkungen der beiden in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen und angebotenen Mobilitätsdienstleister auf die Performance des Prototyps als auch die Laufzeiten der wesentlichen Komponenten des Prototyps untersucht.

### 7.2.1 Vergleich der angebotenen Mobilitätsdienstleister

Für den umgesetzten Prototyp wurden, wie in Abschnitt 6.2.1 beschrieben, zwei Schnittstellen zu zwei unterschiedlichen Mobilitätsdienstleistern implementiert, die Fahrkreis-Schnittstelle und die interne Schnittstelle. Für die zur Evaluation der Eignung in Abschnitt 7.1.2 durchgeführte Fallstudie wurde die Fahrkreis-Schnittstelle genutzt, da diese im Gegensatz zur internen Schnittstelle neben Individualverkehr auch öffentlichen Verkehr unterstützt.

Im Rahmen dieser Evaluation ist es jedoch sinnvoll, die beiden Mobilitätsdienstleister hinsichtlich ihrer Ergebnisse zu vergleichen. Aus diesem Grund wird die in Abschnitt 7.1.2 durchgeführte Fallstudie mit den fünf identifizierten Aktivitäten des Agenten unter Nutzung der internen Schnittstelle wiederholt, um die Mobilitätsoptionen der beiden Mobilitätsdienstleister zu vergleichen.

In Tabelle 7.7 sind dazu die Strecken und die Dauern der Hin- und Rückfahrten der fünf Aktivitäten jeweils für die Fahrkreis-Schnittstelle und die interne Schnittstelle dargestellt. Zu vergleichen sind jeweils paarweise die Zeilen mit der gleichen Mobilitätsoption. Zur Bestimmung der Dauern der Mobilitätsoptionen aus der internen Schnittstelle wurden die in Abbildung C.8 in Anhang C angegebenen Maximalgeschwindigkeiten der Fortbewegungsmittel unter Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten auf den Routenabschnitten genutzt.

Beim Vergleich der korrespondierenden Hin- und Rückfahrten mit dem Auto fällt auf, dass die interne Schnittstelle bei ähnlichen Streckenlängen eine moderat kürzere Zeitschätzung trifft als die Fahrkreis-Schnittstelle. Bei den drei Aktivitäten außerorts unterscheidet sich die Zeitschätzung um drei bis vier Minuten, je nach Länge der Strecke. Beim Familienbesuch innerorts unterscheidet sich die Zeitschätzung, je nachdem, ob es sich um Hin- oder Rückfahrt handelt, bereits um eine bis rund drei Minuten und selbst auf dem vergleichsweise kurzen

**Tabelle 7.7:** Vergleich zwischen Fahrkreis-Schnittstelle und interner Schnittstelle anhand der Strecken und Dauern der Mobilitätsoptionen des Individualverkehrs zu den Aktivitäten der in Abschnitt 7.1.2 durchgeführten Fallstudie.

Mobilitäts- option	Arbeit nördlich des Wohnorts	Arbeit westlich des Wohnorts	Familien- besuch innerorts	Familien- besuch außerorts	Einkaufen
<b>Fahrkreis-Schnittstelle</b>					
Hinfahrt Auto	18,165 km 18 min	18,020 km 22 min	5,650 km 8 min	36,051 km 35 min	0,568 km 2 min
Rückfahrt Auto	19,741 km 18 m	18,330 km 22 min	7,130 km 10 min	37,726 km 35 min	0,568 km 2 min
Hinfahrt Fahrrad	—	—	6,045 km 20 min	—	0,568 km 2 min
Rückfahrt Fahrrad	—	—	5,560 km 18 min	—	0,568 km 2 min
Hinfahrt Gehen	—	—	—	—	0,568 km 7 min
Rückfahrt Gehen	—	—	—	—	0,568 km 7 min
<b>Interne Schnittstelle</b>					
Hinfahrt Auto	17,937 km 14 min, 23 s	18,193 km 18 min, 40 s	5,579 km 6 min, 30 s	36,726 km 30 min, 44 s	0,558 km 50 s
Rückfahrt Auto	18,129 km 14 min, 22 s	18,193 km 18 min, 40 s	5,667 km 6 min, 46 s	36,900 km 30 min, 53 s	0,558 km 50 s
Hinfahrt Fahrrad	—	—	5,342 km 18 min, 19 s	—	0,558 km 1 min, 55 s
Rückfahrt Fahrrad	—	—	5,342 km 18 min, 19 s	—	0,558 km 1 min, 55 s
Hinfahrt Gehen	—	—	—	—	0,558 km 6 min, 42 s
Rückfahrt Gehen	—	—	—	—	0,558 km 6 min, 42 s

Weg zum Einkaufen unterscheiden sich die Zeitschätzungen zwischen Fahrkreis-Schnittstelle und interner Schnittstelle um eine Minute. Deutliche Abweichungen in der Berechnung der Strecke gibt es mit 8,9% beziehungsweise 25,8% bei den Mobilitätsoptionen mit dem Auto nur bei den Rückfahrten von der Arbeit nördlich und dem Familienbesuch innerorts, die übrigen Abweichungen liegen zwischen 1% und 2,2%. Bei den Mobilitätsoptionen mit dem Fahrrad liefert die interne Schnittstelle beim Familienbesuch innerorts einen Unterschied von

zwei Minuten bei der Zeitschätzung und 13,2% bei der Streckenlänge der Hinfahrt, während die Rückfahrt in Zeitschätzung und Strecke den Ergebnissen der Fahrkreis-Schnittstelle entspricht. Die Zeitschätzungen und Strecken der beiden Mobilitätsdienstleister für die Mobilitätsoptionen zum Einkaufen sind sich ebenfalls sehr ähnlich. Beim Einkaufen als einziger Aktivität, die auch zu Fuß durchgeführt werden kann, zeigt sich ebenfalls eine hohe Ähnlichkeit zwischen den Ergebnissen der Fahrkreis-Schnittstelle und der internen Schnittstelle.

Insgesamt besteht bei den Mobilitätsoptionen mit dem Fahrrad und zu Fuß kein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Mobilitätsdienstleistern, lediglich bei der Hinfahrt zum Familienbesuch innerorts mit dem Fahrrad unterscheiden sich die Ergebnisse deutlich. Dieser Unterschied ist bei genauer Betrachtung der Routen der beiden Mobilitätsdienstleister durch eine Einbahnstraße zu erklären, die auf dem Hinweg umfahren werden muss. Dabei handelt es sich anzunehmenderweise um eine Unzulänglichkeit der Fahrkreis-Schnittstelle beziehungsweise der von ihr genutzten Dienste, da die Einbahnstraßenbeschränkung in diesem speziellen Fall nur für Autos, nicht jedoch für Fahrräder, gilt. Auch die Unterschiede zwischen den beiden Mobilitätsdienstleistern bei den Rückwegen mit dem Auto von der Arbeit nördlich des Wohnorts sowie von den Familienbesuchen sind bei genauer Analyse durch eine im Vergleich zur Hinfahrt veränderte Route im letzten Teil der Rückfahrt bei den Mobilitätsoptionen der Fahrkreis-Schnittstelle zu erklären. Der Grund für diese veränderte Route ist nicht sicher identifizierbar, es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass dadurch ein häufiges Linksabbiegen an Kreuzungen ohne Ampel vermieden werden soll. Die optimistischere Zeitschätzung der internen Schnittstelle kann durch den im Vergleich zur Fahrkreis-Schnittstelle als naiver anzunehmenden Ansatz der Routenfindung erklärt werden. Die interne Schnittstelle nutzt beispielsweise keine zusätzlichen Informationen zu Wartezeiten an Ampeln und beim Abbiegen, sodass die längeren Zeitschätzungen der Fahrkreis-Schnittstelle potenziell realistischer sind. Zusammenfassend erscheinen jedoch beide Mobilitätsdienstleister zur Erzeugung von Mobilitätsoptionen geeignet, da beide Schnittstellen grundsätzlich plausibel und sich nicht wesentlich unterscheidende Ergebnisse liefern. Im praktischen Einsatz des umgesetzten Prototyps sollte jedoch von der gleichzeitigen Nutzung verschiedener Mobilitätsdienstleister abgesehen werden, wenn sich diese auf die gleichen Fortbewegungsmittel beziehen, da Simulationsagenten nicht ohne Weiteres zwischen optimistischen und realistischen Mobilitätsoptionen unterscheiden können und somit stets Mobilitätsangebote naiverer Mobilitätsdienstleister bevorzugen würden.

### 7.2.2 Laufzeiten der Komponenten

Die Laufzeit eines Simulationsexperiments wird durch verschiedene Faktoren, wie beispielsweise die Anzahl der Aktivitäten und Fortbewegungsmittel und das Planungsintervall der Agenten, die Komplexität des Fuzzyinferenzsystems oder die Länge des zu simulierenden Zeitraums, beeinflusst. Diese Faktoren betreffen unterschiedliche Komponenten des umgesetzten Prototyps, sodass die Auswirkungen dieser Faktoren auf die Laufzeit der Komponenten einzeln evaluiert werden. Alle Experimente wurden mit einem Computer mit einem 3,4-Gigahertz-Prozessor mit vier Kernen und acht Gigabyte Speicher durchgeführt.

### 7.2.2.1 Laufzeiten des Fuzzyinferenzsystems

Die Dauer zur Inferenz eines Nutzens für eine beliebige Mobilitätsoption während eines Simulationsexperiments mit dem umgesetzten Prototyp ist im Wesentlichen von der Komplexität des in der Szenariobeschreibung hinterlegten Fuzzyinferenzsystems abhängig. Die beiden in Abschnitt 7.1.1 beziehungsweise Abschnitt 7.1.2 durchgeführten Fallstudien beschreiben zwei unterschiedlich komplexe Fuzzyinferenzsysteme, die in ihrer Laufzeit verglichen werden können. Das Fuzzyinferenzsystem aus der Fallstudie mit einem quantitativen Modell weist eine Laufzeit von unter einer Millisekunde pro Mobilitätsoption auf, während das komplexere Fuzzyinferenzsystem aus der Fallstudie mit einem qualitativen Modell eine Zeit von 1 bis 15 Millisekunden benötigt, um den Nutzen jeweils einer Mobilitätsoption der für die Fallstudie identifizierten Aktivitäten zu inferieren. Die Unterschiede in den Laufzeiten bei der zweiten Fallstudie liegen in der unterschiedlichen Komplexität der Entscheidungssituationen begründet und werden beispielsweise durch die Anzahl entscheidungsrelevanter Attribute, die Anzahl der zu einer Mobilitätsoption gehörigen Fortbewegungsmittel und insbesondere durch die etwaige Notwendigkeit zur Inferenz latenter Variablen beeinflusst. Um den vollständigen Zeitanteil der Entscheidungsfindung an der Laufzeit eines jeden Simulationsexperiments abzuschätzen, kann daher das Produkt aus durchschnittlicher Laufzeit zur Inferenz eines einzelnen Nutzens, der Anzahl insgesamt zu simulierender Aktivitäten aller Agenten, der Anzahl pro Aktivität ermittelter Mobilitätsoptionen und der sich aus gewähltem Planungshorizont, -intervall und -ende ergebenden Anzahl an Suchen nach Mobilitätsoptionen pro Aktivität mit dem in der Szenariobeschreibung definierten Mobilitätsdienstleister gebildet werden.

Neben der Tatsache, dass die in den beiden Fallstudien genutzten Fuzzyinferenzsysteme nicht übermäßig umfangreich sind, trägt auch bereits das in Abschnitt 5.2.3 beschriebene Konzept und die konkrete technische Umsetzung des Prototyps zu den in den meisten Fällen sehr kurzen Laufzeiten bei. Zwar basiert der umgesetzte Prototyp durch die Nutzung der Softwarebibliothek `jfuzzylite` und gemäß der in Abschnitt 6.2.2.1 beschriebenen Datenstruktur einer FCL-Datei auf Mamdani-Inferenz, diese ist jedoch durch die konsequente Nutzung von Singletons im Konzept funktional äquivalent zu Takagi-Sugeno-Inferenz mit ausschließlich konstanten Funktionen in den Konsequenzen der Fuzzyregeln. Da alle linguistischen Variablen, die nicht zur Fuzzifizierung genutzt werden, ausschließlich Singletons als linguistische Terme nutzen, ist eine rechenintensive Defuzzifizierung mit geometrischen Methoden wie der Flächenschwerpunktfunktion nicht erforderlich.

### 7.2.2.2 Laufzeiten der Schnittstellen der Mobilitätsdienstleister

Die Anzahl der Aktivitäten und Fortbewegungsmittel und das Planungsintervall der Agenten beeinflussen die Anzahl der Anfragen an den zu nutzenden Mobilitätsdienstleister über die jeweilige Schnittstelle. Zum Vergleich der Laufzeiten von Fahrkreis-Schnittstelle und interner Schnittstelle wird erneut die in Abschnitt 7.1.2 durchgeführte Fallstudie mit den dazugehörigen fünf Aktivitäten des Agenten herangezogen. In Tabelle 7.8 sind dazu die

Laufzeiten zum Abruf der verfügbaren Mobilitätsoptionen bei den beiden Mobilitätsdienstleistern dargestellt.

**Tabelle 7.8:** Durchschnittliche Laufzeiten von Fahrkreis-Schnittstelle und interner Schnittstelle zum Abruf von Mobilitätsoptionen des Individualverkehrs zu den Aktivitäten der in Abschnitt 7.1.2 durchgeführten Fallstudie.

Mobilitäts- option	Arbeit nördlich des Wohnorts	Arbeit westlich des Wohnorts	Familien- besuch innerorts	Familien- besuch außerorts	Einkaufen
Fahrkreis-Schnittstelle					
alle Mobilitäts- optionen gleichzeitig	12–13 s, unabhängig von der Aktivität oder der Anzahl der Mobilitätsoptionen				
Interne Schnittstelle					
Hinfahrt Auto	159 ms	170 ms	25 ms	308 ms	7 ms
Rückfahrt Auto	117 ms	44 ms	45 ms	168 ms	8 ms
Hinfahrt Fahrrad	—	—	24 ms	—	8 ms
Rückfahrt Fahrrad	—	—	31 ms	—	7 ms
Hinfahrt Gehen	—	—	—	—	7 ms
Rückfahrt Gehen	—	—	—	—	7 ms

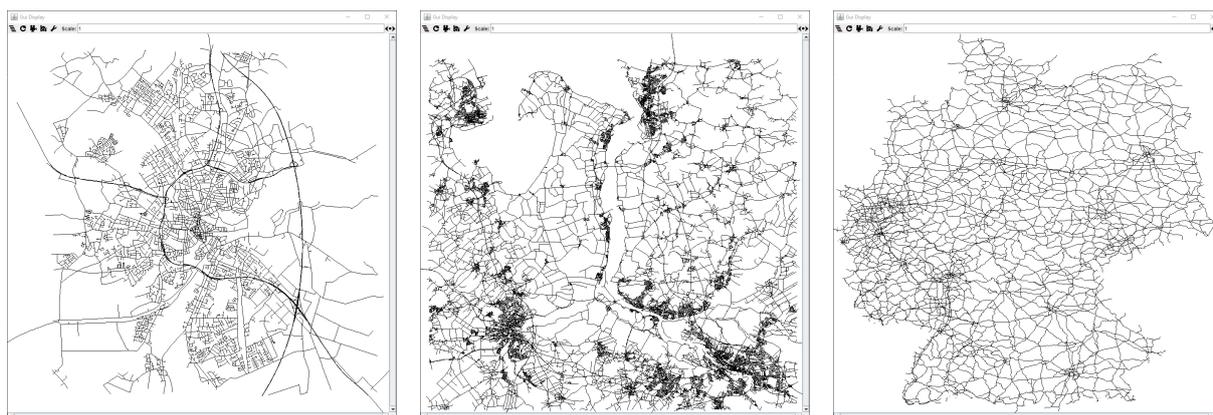
Bei Nutzung der Fahrkreis-Schnittstelle gibt es keine wesentlichen Unterschiede in der Laufzeit, unabhängig von der verfolgten Aktivität und der Anzahl der gefundenen Mobilitätsoptionen. Die Laufzeit liegt in allen Fällen bei 12 bis 13 Sekunden und beinhaltet alle verfügbaren Mobilitätsoptionen aus Individualverkehr, intermodalen Verkehrsketten mit öffentlichem Verkehr und, falls zum Zeitpunkt der Anfrage verfügbar, auch prosumerbasierten Peer-to-Peer-Ridesharing-Angeboten. Im Gegensatz zur Fahrkreis-Schnittstelle scheint die Laufzeit der internen Schnittstelle grob mit den Distanzen der in Abschnitt 7.2.1 dargestellten Mobilitätsoptionen zu korrelieren. Auffällig ist, dass sich die Laufzeiten zur Bestimmung der beiden Rückfahrten mit dem Auto von der Arbeit westlich des Wohnorts und vom Familienbesuch außerorts erheblich von Laufzeiten für die dazugehörigen Hinfahrten unterscheiden. Dieses Verhalten ist durch vermeintliche Umwege bei der Rückfahrt zu erklären, bei denen sich der Agent für die beste Route zunächst weiter von seinem Ziel entfernen muss,

um beispielsweise eine Autobahnauffahrt zu erreichen. Der für die interne Schnittstelle genutzte, in Abschnitt 6.2.1 beschriebene A\*-Algorithmus bezieht die physische Distanz zum Ziel bei der Heuristik zur Suche einer Route mit ein und sucht daher zunächst bevorzugt in die entsprechende Richtung, bevor Umwege mit einbezogen werden.

Insgesamt unterscheiden sich die beiden Mobilitätsdienstleister in ihren Laufzeiten deutlich, funktionieren jedoch auch unterschiedlich und bieten unterschiedliche Leistungen. Da es sich beim Fahrkreis-System um ein externes System handelt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich dessen Laufzeiten bei Weiterentwicklung in Zukunft verbessern werden.

### 7.2.2.3 Laufzeiten der grafischen Benutzeroberfläche

Die in Abschnitt 6.2.3 beschriebene grafische Benutzeroberfläche des Prototyps wirkt sich auf die Laufzeit eines Simulationsexperiments aus. Maßgeblich ist in diesem Zusammenhang insbesondere die Anzahl der zu visualisierenden Geometrien eines Shapefiles, um das Straßen- und Wegenetz eines Simulationsexperiments abzubilden. In Abbildung 7.5 sind dazu drei unterschiedliche Straßen- und Wegenetze dargestellt, anhand derer die Laufzeit der grafischen Benutzeroberfläche untersucht werden soll.



**(a)** Straßen- und Wegenetz der Stadt Oldenburg. **(b)** Straßen- und Wegenetz des Landkreises Wesermarsch. **(c)** Hauptverkehrsstraßen in Deutschland.

**Abbildung 7.5:** Visualisierung von drei unterschiedlichen Straßen- und Wegenetzen mit der grafischen Benutzeroberfläche des Prototyps.

Das in Abbildung 7.5a dargestellte Straßen- und Wegenetz der Stadt Oldenburg enthält 14.816 Geometrien, das in Abbildung 7.5b gezeigte des Landkreises Wesermarsch mit den größeren, umliegenden Städten bereits 114.386 Geometrien. Das in Abbildung 7.5c dargestellte, auf die Hauptverkehrsstraßen reduzierte Straßen- und Wegenetz von ganz Deutschland besteht aus 512.109 Geometrien.

In Tabelle 7.9 sind die Laufzeiten zur Erstellung des das Straßen- und Wegenetz repräsentierenden Graphen, zur Visualisierung der Geometrien und die durchschnittliche Laufzeit pro Simulationsschritt zur Aktualisierung der Visualisierung dargestellt.

Die Zeit zur Erstellung des Graphen des Straßen- und Wegenetzes fällt in allen Simulationsexperimenten an, unabhängig davon, ob diese mit oder ohne grafische Benutzeroberfläche

**Tabelle 7.9:** Laufzeiten von Simulationsexperimenten bei unterschiedlichen Gebieten.

Ausgewähltes Gebiet	Anzahl Geometrien	Erstellung des Graphen	Visualisierung der Geometrien	Aktualisierung pro Simulationsschritt
Stadt Oldenburg	14.816	717 ms	220 ms	14 ms
Landkreis Wesermarsch	114.386	9.835 ms	3.424 ms	91 ms
Deutschland	512.109	21.769 ms	12.607 ms	393 ms

durchgeführt werden, die Zeit zum Einlesen der Geometrien eines Shapefiles hingegen fällt nur dann an, wenn die grafische Benutzeroberfläche tatsächlich genutzt wird. Die benötigten Zeiten zur Erstellung eines Graphen und zum Einlesen von Geometrien steigen mit der Größe des Shapefiles beziehungsweise der darin enthaltenen Geometrien an. Dies betrifft sowohl die stets erforderliche Erstellung des Graphen als auch die nur optional anfallende Visualisierung der Geometrien. Vergleichsweise kleine Gebiete wie das der Stadt Oldenburg können somit in unter einer Sekunde eingelesen und visualisiert werden, während dieser Vorgang für den Landkreis Wesermarsch mit den umliegenden Städten bereits 13 Sekunden dauert. Für ganz Deutschland sind für das Einlesen und Visualisieren trotz Reduzierung auf lediglich Hauptverkehrswege mehr als 33 Sekunden erforderlich. Da die für den umgesetzten Prototyp genutzte, in Abschnitt 6.1.2.1 beschriebene Softwarebibliothek MASON zu jedem Simulationsschritt stets die gesamte Visualisierung aktualisiert, steigt mit der Anzahl der visualisierten Geometrien auch die Zeit, die pro Simulationsschritt durch die grafische Benutzeroberfläche eingenommen wird. Mit den angegebenen durchschnittlichen Zeiten für einen Simulationsschritt liegt der reine Zeitbedarf zur Aktualisierung der Visualisierung eines Simulationsexperiments bei Nutzung des Gebietes der Stadt Oldenburg bei rund 20 Sekunden, bei der Wesermarsch bei mehr als zwei Minuten und bei ganz Deutschland bei rund 9,5 Minuten. Auch diese Zeiten fallen jedoch nur bei tatsächlicher Nutzung der grafischen Benutzeroberfläche an. Wird diese, kurzzeitig und auch während eines Simulationsexperiments, deaktiviert, kann das Simulationsexperiment, je nach Größe des visualisierten Gebiets, erheblich beschleunigt werden. Insgesamt sind die Zeiten zum Einlesen und Aktualisieren als ausreichend einzuschätzen, da das Einlesen pro Simulationsexperiment nur einmalig notwendig ist und durch Deaktivierung der grafischen Benutzeroberfläche in seiner Dauer weiter reduziert werden kann.

## 7.3 Anforderungserfüllung des Prototyps

Die Untersuchung der Erfüllung der in Kapitel 4 aufgestellten Anforderungen erfolgt argumentativ. Dazu wird für jede Anforderung begründet, durch welche Designentscheidungen oder Eigenschaften des Prototyps diese erfüllt werden. Die Betrachtung der Anforderungen

erfolgt systematisch anhand der drei möglichen, in den Anforderungen auftretenden Bezüge, an je einen sich jede der Anforderungen richtet. Diese sind das Mobilitätssimulationssystem als Ganzes, das Simulationsmodell oder die Entscheidungsfindung.

Auf Grundlage der in Abschnitt 4.2 beschriebenen und in Abbildung 4.3 dargestellten Abhängigkeiten zwischen den in Abschnitt 1.2 aufgestellten Forschungsfragen, den in Abschnitt 1.3 formulierten Zielen und den Anforderungen dieser Arbeit kann mit der im Folgenden begründeten Erfüllung der Anforderungen auch eine Erreichung der Ziele und die erfolgreiche Untersuchung aller drei Teilfragen sowie der Leitfrage erklärt werden.

### 7.3.1 Anforderungen an das Mobilitätssimulationssystem

Sieben der in Abschnitt 4.1 aufgestellten Anforderungen beziehen sich auf das vollständige Mobilitätssimulationssystem. Die Erfüllung dieser Anforderungen ist daher vergleichsweise breit und in verschiedenen Kapiteln und Abschnitten begründet.

Die in Anforderung A01 geforderte Agentenbasierung ist durch die in Abschnitt 5.1.3 entwickelte Agentenarchitektur sowie das in Kapitel 6 umgesetzte Multiagentensystem erfolgreich adressiert. Der umgesetzte Prototyp ist in der Lage, das Mobilitätsverhalten von autonom agierenden Agenten zu simulieren. Perzepte und Aktionen sowie Agentenfunktion und das darauf basierende Agentenprogramm sind gemäß den in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Eigenschaften eines intelligenten Agenten gestaltet.

Anforderung A02 beschreibt die erforderliche Aktivitätsbasierung des Mobilitätssimulationssystems. Diese wird, aufbauend auf der Differenzierung alternativer Verkehrsmodelle in Abschnitt 5.1.1, in die in Abschnitt 5.1.2 herausgearbeiteten Modellelemente integriert und somit abgedeckt. Auf technischer Ebene werden Aktivitäten als die wesentlichen Ereignisse abgebildet, die für die Ziele und das Verhalten eines Agenten bei der Durchführung eines Simulationsexperiments mit dem umgesetzten Prototyp ursächlich sind.

Zur Beurteilung der in Anforderung A03 grundsätzlich geforderten Szenariobasierung des Mobilitätssimulationssystems ist es empfehlenswert, diese im Zusammenhang mit mit Anforderung A10 zur Trennung von Szenarioerstellung und -ausführung einerseits und Anforderung A11 zu den Schnittstellen zwischen Mobilitätssimulationssystem und Stakeholdern andererseits zu betrachten. Mit den in Abschnitt 5.3 festgelegten und in Abschnitt 6.2.2 technisch konkretisierten Inhalten einer Szenariobeschreibung ist die Möglichkeit zur Szenariobasierung gegeben. Durch die vom umgesetzten Prototyp unabhängige Persistierung einer Szenariobeschreibung im JSON-, FCL- und Shapefile-Format und die Übergabe dieser als Kommandozeilenparameter zur Durchführung eines Simulationsexperiments ist auch die Trennung von Szenarioerstellung und -ausführung sichergestellt. Das Format und die festgelegte inhaltliche Struktur einer Szenariobeschreibung bilden damit auch die Schnittstellen für Anwender und Entscheidungsträger zur Definition eines Szenarios. Indirekt stellt eine Szenariobeschreibung somit außerdem die Schnittstelle für den Sozialwissenschaftler zur Bereitstellung von unterschiedlichen sozialwissenschaftlichen Modellen dar, die Generizität dieser Schnittstelle ist durch die beiden in Abschnitt 7.1 durchgeführten Fallstudien gezeigt. Die Schnittstelle für einen Anwender zur Ausführung eines Szenarios ist beim un-

gesetzten Prototyp vergleichsweise einfach durch Übergabe einer Szenariobeschreibung als Kommandozeilenparameter zum Start eines Simulationsexperiments gelöst. Die technische Schnittstelle zur Anbindung unterschiedlicher Mobilitätsdienstleister ist in Abschnitt 6.2.1 adressiert, durch Anbindung zweier exemplarischer Mobilitätsdienstleister ist die Generizität der Schnittstelle gezeigt. Die grafische Benutzeroberfläche sowie der Datenlogger des umgesetzten Prototyps bilden die Schnittstelle zu einem an Simulationsverlauf und -ergebnissen interessierten Entscheidungsträger. Die technische Definition dieser Schnittstellen ist in Abschnitt 6.1.1.2 anhand der Systemarchitektur und ihrer Schnittstellen beschrieben.

Mit Anforderung A14 wird die Beobachtbarkeit und Analysierbarkeit des Mobilitätssimulationssystems hinsichtlich seines Verhaltens und seiner Ergebnisse gefordert. Die Erfüllung dieser Anforderung baut auf der umgesetzten Schnittstelle für Simulationsverlauf und -ergebnisse auf. Der grafischen Benutzeroberfläche können dazu unterschiedliche Ansichten hinzugefügt werden, um relevante Informationen bereits zur Laufzeit darzustellen. In Abschnitt 6.2.3 ist dazu exemplarisch die Implementierung einer Ansicht gezeigt, die den Nutzen der durch die Simulationsagenten gewählten Mobilitätsoptionen mit einem Farbgradienten visuell darstellt. Der vollständige Verlauf der Simulation wird durch den Datenlogger des umgesetzten Prototyps bereitgestellt. Dieser persistiert den Verlauf im CSV-Format für anschließende Analysen und Vergleiche mit anderen Simulationsexperimenten. Die detaillierte Analyse der Simulationsergebnisse kann damit unabhängig vom Mobilitätssimulationssystem mit dedizierten Anwendungen zur Datenanalyse durchgeführt werden.

Um die in Anforderung A15 geforderte Robustheit des Mobilitätssimulationssystems gegenüber beliebigen Mobilitätsoptionen und bereitgestellten sozialwissenschaftlichen Modellen zu gewährleisten, ist das in Abschnitt 5.2 entwickelte Verfahren zur Entscheidungsfindung so gestaltet, dass überflüssige oder fehlende Informationen die erfolgreiche Durchführung eines Simulationsexperiments nicht gefährden. Auf konzeptioneller Ebene werden dazu in Abschnitt 5.2.4 Maßnahmen beschrieben, die bei der Erstellung eines Fuzzyinferenzsystems getroffen werden können, um fehlende entscheidungsrelevante Attribute zu adressieren. Auf technischer Ebene prüft der umgesetzte Prototyp bei der Durchführung eines Simulationsexperiments, ob die gemäß Abschnitt 6.2.2.1 erstellte FCL-Datei einer Szenariobeschreibung kompatibel mit den durch den umgesetzten Prototyp bereitgestellten entscheidungsrelevanten Attributen ist. Dazu wird das Simulationsmodell nach der Initialisierung auf plausible Paare aus entscheidungsrelevanten Attributen, linguistischen Variablen und Fuzzyregeln geprüft. Überflüssige Informationen werden vom Fuzzyinferenzsystem ignoriert, bei fehlenden Informationen wird das Fuzzyinferenzsystem auf ein konsistentes und gültiges Teilsystem reduziert, das somit weiterhin zur Bestimmung des Nutzens einer Mobilitätsoption genutzt werden kann.

### 7.3.2 Anforderungen an das Simulationsmodell

Von den in Abschnitt 4.1 aufgestellten Anforderungen richten sich vier direkt an das Simulationsmodell des Mobilitätssimulationssystems, diese legen insbesondere den Umfang des Simulationsmodells fest. Alle vier Anforderungen werden aus konzeptioneller Sicht im We-

sentlichen in Abschnitt 5.1.2 zu den Modellelementen für das Mobilitätssimulationssystem adressiert.

Die Abbildung der in Anforderung A05 geforderten individuellen und normativen Entscheidungseinflüsse ist durch den in Abschnitt 5.1.2.3 beschriebenen Hypergraphen aus Agenten und sozialen Systemen mit den dazugehörigen Entscheidungsgründen berücksichtigt. Ein konkreter Entscheidungsgrund wird in diesem Zusammenhang durch eine entsprechende Fuzzyregel repräsentiert. Diese Struktur wird in einer gemäß Abschnitt 5.3 erstellten Szenariobeschreibung aufgegriffen, die technische Umsetzung ist in der in Abschnitt 6.1.2.2 dargestellten Klassenstruktur von Agenten, sozialen Systemen und Fuzzyregeln abgebildet.

Anforderung A06 und Anforderung A07 beziehen sich beide auf den Umfang der Modellierung einer Mobilitätsoption, die Erfüllung dieser Anforderungen wird aus diesem Grund gleichzeitig geprüft. Eine Mobilitätsoption muss demnach Individualverkehr und öffentlichen Personenverkehr mit intermodalen Verkehrsketten ebenso wie durch Privatpersonen angebotene Ridesharing-Angebote abbilden können. Beide Anforderungen sind konzeptionell durch die Unterscheidung zwischen Verkehrsmittel und Fortbewegungsmittel adressiert, die in den in Abschnitt 5.1.2.1 beschriebenen Modellelementen aus der Verkehrsplanung für das Mobilitätssimulationssystem beschrieben wird. Diese Beziehung ist, wie in Abschnitt 6.1.2.2 dargestellt, auch in der technischen Umsetzung berücksichtigt, indem die einer Mobilitätsoption zugeordneten Fortbewegungsmittel nicht notwendigerweise einem Simulationsagenten zugeordnet sein müssen. Im Fall der beiden in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen, für den umgesetzten Prototyp implementierten Mobilitätsdienstleister werden diese Abhängigkeiten bei der Erzeugung einer Mobilitätsoption angelegt. Ob in einem gegebenen Simulationsexperiment tatsächlich überhaupt alle Arten von Mobilitätsoptionen auftreten, hängt damit jedoch vom genutzten Mobilitätsdienstleister ab.

Die Erfüllung von Anforderung A08 zur Abbildung von Mobilitätsbedarfen ergibt sich aus der Aktivitätsbasierung des Simulationsmodells. Wie in Abschnitt 5.1.2.1 auf konzeptioneller Ebene dargestellt, ist einer Mobilitätsoption stets genau eine Aktivität zuzuordnen. Aus den Aktivitäten eines Agenten ergibt sich damit sein Mobilitätsbedarf, Mobilitätsoptionen ohne Aktivität als zugrunde liegender Zweck sind nicht möglich. Diese Beziehung ist, wie in Abschnitt 6.1.2.2 dargestellt, auch in der Umsetzung berücksichtigt, indem einer Mobilitätsoption genau ein Trip und einem Trip genau eine Aktivität zugeordnet sind.

### 7.3.3 Anforderungen an die Entscheidungsfindung

Die verbleibenden vier der in Abschnitt 4.1 aufgestellten Anforderungen richten sich direkt an das Konzept zur Entscheidungsfindung für die Simulationsagenten. Aus diesem Grund werden die Anforderungen insbesondere in Abschnitt 5.2 adressiert.

Anforderung A04 zum subjektiven Kontext der Entscheidungssituation und Anforderung A09 zum deterministischen Verhalten der Entscheidungsfindung sind unmittelbar in Abschnitt 5.2.2.1 als zwei der fünf Kriterien an das Entscheidungsverfahren aufgegriffen worden. Diese führen zu der in Abschnitt 5.2.2.2 getroffenen Entscheidung für Fuzzyinferenz als Verfahren für die Entscheidungsfindung. Durch die Operationalisierung latenter Variablen

in der ersten Inferenzstufe des in Abschnitt 5.2.3 entwickelten Konzepts für das Fuzzyinferenzsystem ist eine Abbildung subjektiver Wahrnehmungen in der Entscheidungsfindung ermöglicht. Da es sich bei Fuzzyinferenz um ein deterministisches Verfahren handelt, ist auch diese Anforderung erfüllt.

Das in Anforderung A12 geforderte generische Inferenzmodell zur Abbildung unterschiedlicher sozialwissenschaftlicher Modelle ist durch das in Abschnitt 5.2.3 beschriebene Konzept eines dreistufigen Fuzzyinferenzsystems adressiert, das zur Abbildung unterschiedlicher Entscheidungsgründe, wie in Abschnitt 7.1 durch die beiden Fallstudien gezeigt, geeignet ist. Durch die in Abschnitt 5.2.4 beschriebene Methode zur Erstellung eines solchen Fuzzyinferenzsystems wird die Nutzung dieses generischen Inferenzmodells erleichtert. Das Konzept ist für den umgesetzten Prototyp entsprechend umgesetzt worden, die in Abschnitt 6.2.2.1 beschriebene Datenstruktur einer FCL-Datei für eine Szenariobeschreibung spiegelt das generische Inferenzmodell entsprechend wider.

Die in Anforderung A13 geforderte Modellierung der Entscheidungsfindung als Discrete Choice-Entscheidungsproblem wird durch die Gestaltung des Fuzzyinferenzsystems als abstrakte Nutzenfunktion erfüllt. Nach der detaillierten Einordnung des vorliegenden Entscheidungsproblems in Abschnitt 5.2.1 sieht das in Abschnitt 5.2.3 beschriebene Konzept zur Fuzzyinferenz eine einzelne Bewertung jeder vorliegenden Mobilitätsoption anhand ihres Nutzens vor. In der Umsetzung wird dieses Konzept in der Beschreibung des Ablaufs eines Simulationsschritts in Abschnitt 6.1.1.3 deutlich. Für jede Mobilitätsoption eines Agenten initialisiert dieser ein separates Fuzzyinferenzsystem mit den für jede Mobilitätsoption spezifischen entscheidungsrelevanten Attributen, um diese individuell bewerten und vergleichen zu können.



# Kapitel 8

## Fazit

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf Grundlage ingenieurwissenschaftlicher Forschungsmethodik ein softwaretechnisches System zur Simulation von Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten entwickelt, prototypisch implementiert und evaluiert, um sozialwissenschaftliche Primärforschung zu Verkehrsmittelwahl und Nutzungsintention von Mobilitätsangeboten zu unterstützen. Zu den sich aus der Problemstellung ergebenden Forschungsfragen der Arbeit wurden fünf Ziele definiert, die in erster Näherung beschreiben, welche Eigenschaften das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem zu erfüllen hat.

Diese Ziele wurden in der detaillierten Analyse der verwandten Arbeiten eingesetzt, um bereits existierende Simulationssysteme hinsichtlich ihrer potenziellen Eignung zur Lösung der Problemstellung zu identifizieren. Zur Erhebung der verwandten Arbeiten wurde eine systematische Literatursuche nach wissenschaftlichen Veröffentlichungen mit der aus den Grundlagen dieser Arbeit bekannten, einschlägigen Terminologie durchgeführt. In der genauen Analyse der Ergebnisse der Literatursuche stellte sich heraus, dass keines der dem Stand der Technik entsprechenden Simulationssysteme alle fünf Ziele der Arbeit erfüllt. Aus dieser Tatsache begründete sich der weitere Handlungsbedarf zur Neuentwicklung eines entsprechenden Mobilitätssimulationssystems.

Daher wurden zunächst im Rahmen des ersten Teils der Spezifikationsphase im Software-Lebenszyklus die genauen Anforderungen an das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem erhoben, in die Erkenntnisse aus dem Stand der Technik, den Grundlagen dieser Arbeit sowie zu den Stakeholdern des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems einfließen. Diese Anforderungen wurden an die Ziele der Arbeit geknüpft, um die Evaluierbarkeit der Ziele und Forschungsfragen anhand der Anforderungen zu gestatten.

Im zweiten Teil der Spezifikationsphase wurde ein allgemeines Konzept für das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem formuliert. Dieses besteht aus der interdisziplinären Modellbildung für eine agentenbasierte, aktivitätsbasierte Simulation mit der Agentenarchitektur als wesentlichem Ergebnis, bei der die aus den Grundlagen bekannten unterschiedlichen Theorien und Modelle zu menschlichem Entscheidungsverhalten und Handeln aus den Sozialwissenschaften einbezogen wurden. Weiterhin wurde, nach dem systematischen Vergleich verschiedener, aus den Grundlagen bekannter Verfahren der Computational Intelligence, ein auf Fuzzyinferenz basierendes, generisches Inferenzmodell für die funktionale Entscheidungsfindung eines Simulationsagenten bestimmt, das auf Grundlage eines sozial-

wissenschaftlichen Modells zur Inferenz des Nutzens von Mobilitätsoptionen genutzt werden kann. Darüber hinaus wurden die erforderlichen Inhalte bei der Beschreibung eines Simulationsszenarios zur Durchführung eines Simulationsexperiments identifiziert und in der so bezeichneten Szenariobeschreibung hierarchisch strukturiert.

Für die Entwurfsphase im Software-Lebenszyklus wurde zunächst ein technologieagnostischer Grobentwurf erstellt, der die wesentlichen Gestaltungsentscheidungen, die Systemarchitektur mit ihren Schnittstellen und den Ablauf eines Simulationsexperiments mit dem entwickelten Prototyp unter Zuhilfenahme der Grundlagen der Arbeit beschreibt. Dieser Grobentwurf wurde im Rahmen des anschließenden Feinentwurfs für eine Implementierung in Java durch die Festlegung des zu nutzenden Technologiestacks und einer detaillierten Beschreibung der Klassenstruktur des Prototyps weiter konkretisiert. In der Implementierungsphase wurde der Prototyp programmiert und dabei durch die Anbindung zweier Mobilitätsdienstleister, die Definition der technischen Struktur einer Szenariobeschreibung zur Durchführung eines Simulationsexperiments und die Umsetzung einer grafischen Benutzeroberfläche für die anschließende Evaluation vorbereitet.

In der Evaluation des Prototyps wurde im Sinne von Abnahmetests in der Installationsphase im Software-Lebenszyklus die Untersuchung der Eignung des Prototyps vorgenommen, indem auf Grundlage zweier Fallstudien mit dem Prototyp erzeugte Simulationsergebnisse mit realem Mobilitätsverhalten verglichen wurden. Die Szenariobeschreibungen zu diesen Fallstudien wurden aus quantitativen und qualitativen Daten und Erkenntnissen zu Verkehrsmittelwahl und Nutzungsintention von Mobilitätsangeboten aus dem NEMo Projekt abgeleitet. Weiterhin wurde in der Evaluation die Performance des Prototyps bei Nutzung unterschiedlicher Mobilitätsdienstleister sowie hinsichtlich der Laufzeiten einzelner Softwarekomponenten untersucht. Zum Abschluss der Evaluation wurde die Erfüllung der Anforderungen argumentativ überprüft und begründet, um somit Rückschlüsse über die Erreichung der Ziele und die angemessene Untersuchung der Forschungsfragen der Arbeit zuzulassen.

## 8.1 Ergebnisse und wissenschaftlicher Beitrag

Zunächst kann die in Kapitel 7 durchgeführte Evaluation herangezogen werden, um die Ergebnisse dieser Arbeit zu beschreiben und zu beurteilen. In Abschnitt 7.1 konnte die Evaluationshypothese bestätigt und dazu in zwei Fallstudien gezeigt werden, dass der umgesetzte Prototyp grundsätzlich geeignet scheint, um reale Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsoptionen agentenbasiert zu simulieren.

In der ersten Fallstudie war es auf aggregierter Betrachtungsebene möglich, das genutzte quantitative Modell in ein Fuzzyinferenzsystem zu überführen und eine Verteilung von positiven und negativen Nutzen von Ridesharing-Angeboten zu bestimmen, die im Wesentlichen der Verteilung der Nutzungsintentionen der Teilnehmer der dem quantitativen Modell zugrunde liegenden Umfrage entspricht. Dieses grundsätzlich gute Ergebnis ist lediglich insofern einzuschränken, als die Verhalten einzelner Agenten nicht immer auch der Nutzungsintention ihrer jeweiligen Teilnehmer aus der Umfrage entsprechen. Da es sich bei dem in

der Fallstudie genutzten Modell jedoch um ein Regressionsmodell handelt, ist diese Tatsache nicht weiter verwunderlich oder negativ auszulegen, da die Aussagekraft des Modells sich auf makroskopische Aussagen beschränkt und die korrekte Erklärung von Einzelverhalten nicht Zweck des Modells ist.

In der zweiten Fallstudie konnte erfolgreich gezeigt werden, dass auch mit einer qualitativ erhobenen Datengrundlage aus natürlichsprachlichen Interviewzitatzen ein Fuzzyinferenzsystem und eine dem realen Mobilitätsverhalten der Interviewteilnehmerin entsprechende Simulation mit dem Prototyp durchgeführt werden kann. Der die Interviewteilnehmerin repräsentierende Simulationsagent hat für die identifizierten Aktivitäten die gleichen Mobilitätsoptionen gewählt wie diese und darüber hinaus bei Veränderung der Entscheidungssituation sein Entscheidungsverhalten in gleicher Form wie die Interviewteilnehmerin angepasst.

Weiterhin legt auch die in Abschnitt 7.2 durchgeführte Evaluation der Performance eine grundsätzliche Einsetzbarkeit des Prototyps nahe. Die Laufzeiten der systemeigenen Komponenten des Prototyps liegen typischerweise im unteren Millisekundenbereich und sind daher auch für den Einsatz größerer Agentenpopulationen geeignet.

Neben der Evaluation von Eignung und Performance des Prototyps zeigt die in Abschnitt 7.3 beschriebene Erfüllung aller Anforderungen, dass die den Anforderungen übergeordneten, in Abschnitt 1.3 beschriebenen Ziele der Arbeit erreicht werden konnten. Mit der Bestätigung der auf der Leitfrage der Arbeit basierenden Evaluationshypothese und der Erreichung der aus den Teilfragen der Arbeit abgeleiteten Ziele kann insgesamt eine erfolgreiche Untersuchung der Forschungsfragen dieser Arbeit begründet werden.

Anhand der erfolgreichen Evaluation des Prototyps kann über die unmittelbaren Ergebnisse der Arbeit hinaus auch der wissenschaftliche Beitrag hinsichtlich der entwickelten Konzepte und Methoden abschließend beurteilt werden. Es ist gelungen, an der Schnittstelle zwischen Informatik, Mobilitätsforschung und Sozialwissenschaften einen interdisziplinären Forschungsansatz zur Simulation von Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten zu entwickeln und umzusetzen. Es konnte gezeigt und begründet werden, dass der gewählte agentenbasierte, aktivitätsbasierte und szenariobasierte Ansatz grundsätzlich für diesen Zweck geeignet ist. Das dabei entstandene Simulationsmodell und die Architektur für einen nutzenmaximierenden Agenten können zukünftig als Vorschlag für vergleichbare Forschungsgegenstände herangezogen werden.

Ebenso konnte gezeigt werden, dass Fuzzyinferenz ein geeignetes Mittel zur Entscheidungsfindung eines Agenten bei der Bewertung von Mobilitätsoptionen sein kann, insbesondere, wenn der subjektive Kontext der Entscheidungssituation sowie individuelle und normative Entscheidungsgründe berücksichtigt werden können sollen. Das entwickelte generische Inferenzmodell für ein Fuzzyinferenzsystem zur regelbasierten Bestimmung des Nutzens von Mobilitätsoptionen sowie die dazugehörige Methode zur Erstellung eines solchen können zukünftig als Vorlage zur Lösung ähnlich gelagerter Discrete Choice-Entscheidungsprobleme eingesetzt werden.

Durch die erfolgreiche Implementierung des Prototyps erfahren die entwickelten Konzepte zusätzliche Legitimation, da somit auch die tatsächliche Umsetzbarkeit dieser gezeigt werden

konnte. Aus insbesondere ingenieurwissenschaftlicher Sicht ist damit auch das entstandene technische Artefakt ein wesentlicher wissenschaftlicher Beitrag, da dieses die konkrete Lösung der Problemstellung darstellt.

## 8.2 Grenzen der entwickelten Lösung

Die entwickelten Konzepte und der umgesetzte Prototyp sind auf Grundlage der in Kapitel 4 erhobenen Anforderungen zur Lösung der in Abschnitt 1.1 beschriebenen Problemstellung entwickelt worden. Die expliziten und in Kapitel 7 evaluierten Funktionen sind damit auf diese Problemstellung begrenzt. Anwendungsmöglichkeiten über die Problemstellung dieser Arbeit hinaus sind nicht grundsätzlich auszuschließen, jedoch zu keinem Zeitpunkt Ziel dieser Entwicklung gewesen.

So sieht das Simulationsmodell keine Abbildung von Haushaltsstrukturen vor, Fortbewegungsmittel sind damit nicht Haushalten, sondern einzelnen Agenten zugewiesen. Somit können Wechselwirkungen auf Haushaltsebene, beispielsweise die spontane Verfügbarkeit eines Autos für den einen Agenten durch die Nutzung des öffentlichen Verkehrs durch einen anderen, bisher nicht abgebildet werden. Zwar können die Agenten eines Haushalts durch Zugehörigkeit zu einem sozialen System mit für diesen Haushalt spezifischen normativen Entscheidungsgründen zusammengefasst werden, dies ermöglicht jedoch noch nicht ohne Weiteres die Weitergabe von Fortbewegungsmitteln innerhalb des Haushalts. Eine simulative Analyse von Mobilitätsverhalten bei unterschiedlichen Verfügbarkeiten bestimmter Fortbewegungsmittel ist daher mit dem umgesetzten Prototyp nur durch unterschiedliche Simulationsexperimente mit entsprechend unterschiedlichen Szenariobeschreibungen möglich. Sollen demgegenüber also insbesondere und explizit Haushaltsbeziehungen und Wechselwirkungen innerhalb eines Simulationsexperiments untersucht werden, so wären für diesen Zweck viele der in Abschnitt 3.3 beschriebenen, dem Stand der Technik entsprechenden Simulationssysteme besser geeignet.

Weiterhin ist der Prototyp durch die Aktivitätsbasierung mit Fokus auf sättigbare Mobilitätsbedarfe nur für die Simulation zweckgebundener Mobilität sinnvoll einsetzbar, zurückzuführen ist dies auf den in Kapitel 1 beschriebenen Hintergrund und die Problemstellung dieser Arbeit im Allgemeinen und Anforderung A02 im Speziellen. Mobilität zum Selbstzweck ohne festes Ziel, beispielsweise ein Spaziergang oder eine Radtour, ist mit dem umgesetzten Prototyp nicht plausibel abbildbar, da die durch die Agenten zu verfolgenden Aktivitäten stets durch einen Ort sowie eine Startzeit und eine Dauer zu beschreiben sind. Zwar könnte ein solches Verhalten im Falle eines intrinsischen Mobilitätsbedürfnisses beispielsweise durch die Entscheidung für Mobilitätsoptionen mit möglichst langer Dauer angenähert werden, allerdings wäre der Prototyp dennoch nicht explizit für derartige Untersuchungsgegenstände geeignet.

Auch ist der umgesetzte Prototyp vorrangig für kurzfristige Alltagsmobilität im Personenverkehr entwickelt worden, sodass zeitlich weit auseinander liegende Trips einer Tour, wie beispielsweise bei mehrwöchigem Urlaub, nicht betrachtet wurden. Zwar ist prinzipiell

denkbar, dass auch Anbieter von Flugreisen als Mobilitätsdienstleister an den Prototypen angeschlossen werden können, dies ist jedoch weder Ziel der Entwicklung gewesen noch evaluiert worden.

Über die konzeptionellen und technischen Grenzen hinaus ist weiterhin festzuhalten, dass der umgesetzte Prototyp zusammen mit einer Szenariobeschreibung nur zwei Teilschritte einer denkbaren möglichen Werkzeugkette für die Automatisierung verschiedener Simulationsexperimente darstellt. Szenariobeschreibungen müssen durch Anwender und Entscheidungsträger händisch erstellt werden, da ein automatisiertes System zur Erzeugung synthetischer Agentenbevölkerungen für unterschiedliche Szenariobeschreibungen und Simulationsexperimente, im Gegensatz zu einigen der in Abschnitt 3.3 beschriebenen, dem Stand der Technik entsprechenden Simulationssysteme, nicht Teil dieser Arbeit ist. Außerdem endet ein Simulationsexperiment mit der Ausgabe der Rohdaten der Simulationsergebnisse für den Entscheidungsträger, komplexe nachgelagerte Analyse- und Auswertungsverfahren, beispielsweise auf Grundlage eines Data Warehouse<sup>80</sup>, sind nicht Teil dieser Arbeit.

Weiterhin umfasst der umgesetzte Prototyp grundsätzlich keine Simulation von Landbeziehungsweise Flächennutzung (Englisch: land use). Der Unterscheidung von WEGENER und FUERST (2004) folgend, liegt der Fokus dieser Arbeit demnach ausschließlich auf der Simulation eines Transportsystems mit den dazugehörigen Aktivitäten, Hin- und Rückfahrten, Verkehrsmitteln und möglichen Routen, nicht jedoch auf der Simulation von Landnutzung, bestehend unter anderem aus Erschließung und Bauvorhaben durch Stadtplaner und Wohnortwahl durch Privatpersonen (WEGENER und FUERST, 2004, S. vii; MOECKEL et al., 2018).

## 8.3 Reflexion der Methodik

Da es sich bei der Verkehrsmittelwahl um ein vergleichsweise alltägliches und für viele dementsprechend zugängliches Thema handelt, stellte sich die in Abschnitt 5.1 durchgeführte Modellbildung als besonders herausfordernd dar. Die vielen, auch intuitiv erkennbaren Entscheidungsgründe und Sonderfälle bei der Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten mussten systematisch und grundlagengestützt aufgearbeitet werden, um ein konsistentes Modell zu bestimmen und um insbesondere Modellgrenzen eindeutig definieren zu können. Die in Abschnitt 8.2 beschriebenen Grenzen der entwickelten Lösung greifen in diesem Zusammenhang einen Teil dieser Modellgrenzen auf.

Der durch die Problemstellung erforderliche, interdisziplinäre Forschungsansatz dieser Arbeit an der Schnittstelle zwischen Informatik, Mobilitätsforschung und Sozialwissenschaften erschwerte die Modellbildung zusätzlich, da unterschiedliche Modelle und Methoden aus unterschiedlichen Forschungsdisziplinen zu harmonisieren waren. Im Gegensatz zu einem rein technischen oder naturwissenschaftlichen Forschungsgegenstand birgt ein sozialwissenschaftlicher Forschungsgegenstand stets das Potenzial, die soziale Realität durch die Untersuchung

---

<sup>80</sup>Ein Data Warehouse ist ein Softwaresystem zur Erzeugung und Analyse von aggregierten Kennzahlen aus operativen Daten (RAUTENSTRAUCH und SCHULZE, 2003, S. 322).

selbst zu verändern. Aus epistemischer Sicht bezeichnet GIDDENS (1997) diese Tatsache als doppelte Hermeneutik und sieht darin einen wesentlichen Unterschied zwischen natur- und sozialwissenschaftlicher Forschung. Da Menschen intellektuell zur Reflexion und Verhaltensänderung in der Lage sind, können diese durch sozialwissenschaftliche Forschungsergebnisse ihre eigene soziale Praxis verändern (GIDDENS, 1997, S. 49, 338, 429 f.).

Im Kontext dieser Arbeit bedeutet dies, dass die Ergebnisse einer sozialwissenschaftlich verankerten und begründeten Simulation von Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten das Potenzial bergen, das Mobilitätsverhalten von Menschen nachhaltig beeinflussen zu können. Mit dem Bewusstsein über das eigene Mobilitätsverhalten und seine Alternativen könnte so die soziale Praxis, in diesem Fall die Verkehrsmittelwahl bei Alltagsmobilität, nachhaltig verbessert werden.

## 8.4 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Einige inhaltliche Anknüpfungspunkte an diese Arbeit ergeben sich bereits unmittelbar aus den in Abschnitt 8.2 beschriebenen bisherigen Grenzen der entwickelten Lösung. Zunächst ist die Erweiterung des Simulationsmodells um Haushaltsstrukturen ein naheliegender nächster Schritt. Neben Anpassungen an den Datenstrukturen des bisherigen Prototyps sind in diesem Zusammenhang insbesondere unterschiedliche kollektive Vergabestrategien von Fortbewegungsmitteln, insbesondere von Autos, innerhalb von Haushalten zu erforschen und abzubilden. In diesem Zusammenhang müssten weiterhin mögliche Nebenbedingungen wie Führerscheinbesitz und möglicherweise fehlender Versicherungsschutz berücksichtigt und abgebildet werden.

Dieser potenzielle Anknüpfungspunkt ist methodisch eng verbunden mit einer Erweiterung des umgesetzten Prototyps um eine vollständige Werkzeugkette zur automatisierten Erzeugung von Simulationsszenarien und deren Ausführung. Insbesondere, wenn zusätzlich zur bisherigen Struktur eine Szenariobeschreibung auch Haushaltsstrukturen mit den erwähnten Nebenbedingungen simulativ berücksichtigt werden können sollen, ist zu erwarten, dass die bisher händische und damit aufwändige Erstellung von Simulationsszenarien nicht mehr in annehmbarer Zeit durchführbar sein wird. Hier könnte ein Verfahren zur automatisierten Synthese großer Agentenbevölkerungen, beispielsweise auf Grundlage hinterlegter soziodemografischer Daten, zukünftig die benötigte Zeit zur Erstellung einer Szenariobeschreibung reduzieren und damit den Durchsatz des Prototyps und die Reaktionsgeschwindigkeit zur Erzeugung von Ergebnissen für neue Fragestellungen erhöhen.

Neben der automatisierten Populationssynthese bietet auch die Untersuchung von Ansätzen zur automatisierten Erzeugung der für ein Simulationsexperiment erforderlichen Fuzzyinferenzsysteme das Potenzial für weiteren Forschungsbedarf. Während davon auszugehen ist, dass strukturierte numerische Umfragedaten vergleichsweise einfach automatisiert in ein Fuzzyinferenzsystem übersetzt werden können, stellen natürlichsprachliche Interviews eine ungleich größere Herausforderung dar. Denkbar ist in diesem Zusammenhang der Einsatz

von Text Mining<sup>81</sup>-Methoden, um linguistische Variablen oder Fuzzyregeln automatisch extrahieren zu können. In diesem Zusammenhang liegt auch eine genauere Betrachtung von geeigneten Ansätzen zur bereits in Abschnitt 5.2.2.2 kurz thematisierten Type-2-Fuzzyinferenz nahe, um neben Unschärfe auch durch uneinheitliche Interview- oder Umfrageinhalte begründete Unsicherheit in die Entscheidungsfindung mit aufzunehmen.

Im Rahmen der Entwicklung einer vollständigen Werkzeugkette zur Durchführung von Simulationsexperimenten liegt weiterhin die Gestaltung geeigneter Benutzeroberflächen nahe, die auch von technisch weniger versierten Stakeholdern zur Erstellung von Szenariobeschreibungen genutzt werden können. Sozialwissenschaftler und an Simulationsergebnissen interessierte Entscheidungsträger hätten so unmittelbar und ohne technische Unterstützung durch einen Anwender die Möglichkeit, Szenariobeschreibungen zu erzeugen und auszuführen.

Auch eine Erweiterung des umgesetzten Prototyps um eine dedizierte Verkehrssimulation ist denkbar. Im Rahmen einer Co-Simulation könnte der existierende Prototyp zur Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten mit einer geeigneten Verkehrssimulation wie beispielsweise SUMO<sup>82</sup> lose gekoppelt werden, um die von den Agenten getroffenen Entscheidungen innerhalb der separaten Verkehrssimulation mit hohem Detailgrad annähernd kontinuierlich ausführen zu können.

Hinsichtlich der Übertragbarkeit einzelner Konzepte dieser Arbeit auf andere Forschungs- und Anwendungsbereiche liegt, wie in Abschnitt 8.1 bereits kurz genannt, insbesondere der Einsatz des entwickelten generischen Inferenzmodells zur nutzenbasierten Entscheidungsfindung bei der Lösung anderer Discrete Choice-Entscheidungsprobleme nahe. Dabei könnte, falls im jeweiligen Anwendungskontext direkt von fuzzifizierten Eingaben oder latenten Variablen auf den Nutzen geschlossen werden kann, möglicherweise auf die zweite Inferenzstufe des generischen Inferenzmodells verzichtet werden. Weiterhin bietet sich das generische Inferenzmodell als Grundlage für eine Güte- beziehungsweise Fitnessfunktion für iterative Optimierungsverfahren wie simuliertes Abkühlen (Englisch: simulated annealing) oder evolutionäre Algorithmen an, um in jeder Iteration optimierte und bestehende Lösungen miteinander vergleichen zu können.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass trotz der in dieser Arbeit erzielten umfangreichen Ergebnisse weiteres Forschungspotenzial besteht. Sowohl die allgemeinen Konzepte als auch der umgesetzte Prototyp bieten dazu eine Vielzahl an thematischen Anknüpfungspunkten für zukünftige Forschungsarbeit zu Simulation von Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten.

---

<sup>81</sup>Text Mining beschreibt die Extraktion und Aufbereitung von Wissen aus unstrukturierten und typischerweise natürlichsprachlichen Texten (JO, 2019, S. 3 f.).

<sup>82</sup><https://sumo.dlr.de> (letzter Abruf: 27.02.2022).



# Literaturverzeichnis

- ADNAN, M., PEREIRA, F. C., LIMA AZEVEDO, C., BASAK, K., LOVRIC, M., RAVEAU FELIU, S., ZHU, Y., FERREIRA, J., ZEGRAS, C. und BEN-AKIVA, M. E. (2016). „SimMobility: A Multi-scale Integrated Agent-Based Simulation Platform“. In: *TRB 95<sup>th</sup> Annual Meeting Compendium of Papers*.
- AICHHOLZER, J. (2017). *Einführung in lineare Strukturgleichungsmodelle mit Stata*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- AJZEN, I. (1991). „The theory of planned behavior“. In: *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 50 (2), S. 179–211.
- ALBRECHT, S. V. und STONE, P. (2018). „Autonomous Agents Modelling Other Agents: A Comprehensive Survey and Open Problems“. In: *Artificial Intelligence* 258, S. 66–95.
- AMEY, A., ATTANUCCI, J. und MISHALANI, R. (2011). „Real-Time Ridesharing: Opportunities and Challenges in Using Mobile Phone Technology to Improve Rideshare Services“. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2217), S. 103–110.
- AMMOSER, H. und HOPPE, M. (2006). *Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften. Definitionen und Erläuterungen zu Begriffen des Transport- und Nachrichtenwesens*. Herausgeber: DIE PROFESSOREN DES INSTITUTS FÜR WIRTSCHAFT UND VERKEHR. Dresden, Deutschland.
- ANTÃO, R. (2017). *Type-2 Fuzzy Logic. Uncertain Systems' Modelling and Control*. Springer Nature.
- ARENTZE, T. A., HOFMAN, F., JOH, C. H. und TIMMERMANS, H. J. P. (1999). „The Development of ALBATROSS: Some Key Issues“. In: *Traffic and Mobility. Simulation – Economics – Environment*. Herausgeber: BRILON, W., HUBER, F., SCHRECKENBERG, M. und WALLENTOWITZ, H. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 57–72.
- ARENTZE, T. A., HOFMAN, F., VAN MOURIK, H. und TIMMERMANS, H. J. P. (2000). „ALBATROSS: Multiagent, Rule-Based Model of Activity Pattern Decisions“. In: *Transportation Research Record* 1706, S. 136–144.
- ARENTZE, T. A. und TIMMERMANS, H. J. P. (2000). *ALBATROSS. A Learning-Based Transportation Oriented Simulation System*. European Institute of Retailing and Services Studies.
- ARENTZE, T. A. und TIMMERMANS, H. J. P. (2004). „ALBATROSS – A learning-based transportation oriented simulation system“. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 38 (7), S. 613–633.

- ARENTZE, T. A., TIMMERMANS, H. J. P., JANSSENS, D. und WETS, G. (2008). „Modeling Short-Term Dynamics in Activity-Travel Patterns: From Aurora to Feathers“. In: *Innovations in Travel Demand Modeling, Volume 2: Papers*. Herausgeber: NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. The National Academic Press, S. 71–77.
- BÄCHLE, M. A., DAURER, S. und KOLB, A. (2018). *Einführung in die Wirtschaftsinformatik. Ein fallstudienbasiertes Lehrbuch*. 4. Auflage. De Gruyter.
- BALMER, M. (2007). „Travel demand modeling for multi-agent transport simulations. Algorithms and systems“. Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- BALMER, M., CETIN, N., NAGEL, K. und RANEY, B. (2004). „Towards Truly Agent-Based Traffic and Mobility Simulations“. In: *AAMAS '04: Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems – Volume 1*, S. 60–67.
- BALMER, M., MEISTER, K., RIESER, M., NAGEL, K. und AXHAUSEN, K. W. (2008). „Agent-based simulation of travel demand: Structure and computational performance of MatSIM-T“. In: *2<sup>nd</sup> TRB Conference on Innovations in Travel Modeling*.
- BALMER, M., RIESER, M., MEISTER, K., CHARYPAR, D., LEFEBVRE, N. und NAGEL, K. (2009). „MATSim-T: Architecture and Simulation Times“. In: *Multi-Agent System for Traffic and Transportation Engineering*. Herausgeber: BAZZAN, A. L. C. und KLÜGL, F. IGI Global, S. 57–78.
- BALZERT, H. (2011). *Lehrbuch der Softwaretechnik. Entwurf, Implementierung, Installation und Betrieb*. Spektrum Akademischer Verlag.
- BANDURA, A. (1971). *Social Learning Theory*. General Learning Press.
- BANDURA, A. (1977). „Self-efficacy: Toward a Unifying Theory of Behavioral Change“. In: *Psychological Review* 84 (2), S. 191–215.
- BANDURA, A. (1989). „Human Agency in Social Cognitive Theory“. In: *American Psychologist* 44 (9), S. 1175–1184.
- BANDURA, A. (2001a). „Social Cognitive Theory: An Agentic Perspective“. In: *Annual Review of Psychology* 52, S. 1–26.
- BANDURA, A. (2001b). „Social Cognitive Theory of Mass Communication“. In: *Mediapsychology* 3 (3), S. 265–299.
- BANKS, J., CARSON II, J. S., NELSON, B. L. und NICOL, D. M. (2005). *Discrete-Event System Simulation*. 4. Auflage. Prentice-Hall.
- BARR, N. (2012). *Economics of the Welfare State*. Oxford University Press.
- BARTHOLOMAE, F. und WIENS, M. (2016). *Spieltheorie. Ein anwendungsorientiertes Lehrbuch*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- BARTZ, F. M. (2015). „Mobilitätsbedürfnisse und ihre Satisfaktoren. Die Analyse von Mobilitätstypen im Rahmen eines internationalen Segmentierungsmodells“. Dissertation. Universität zu Köln.
- BASAK, K., PEREIRA, F. C., HETU, S., PEH, L.-S., ZEGRAS, C. und BEN-AKIVA, M. E. (2013). „SimMobility: Integrated activity based modeling“. In: *Proceedings of the 20<sup>th</sup> ITS World Congress*.

- BAYES, T. und PRICE, R. (1763). „An Essay towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances. By the Late Rev. Mr. Bayes, F. R. S. Communicated by Mr. Price, in a Letter to John Canton, A. M. F. R. S.“ In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 53, S. 370–418.
- BECK, H. (2014). *Behavioral Economics. Eine Einführung*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- BECKER, U. J. (2016). *Grundwissen Verkehrsökologie. Grundlagen, Handlungsfelder und Maßnahmen für die Verkehrswende*. oekom Verlag.
- BEIGE, S., HEINRICHS, M., KRAJZEWICZ, D. und CYGANSKI, R. (2017). „Who gets the key first? Car allocation in activity-based modelling“. In: *International Journal of Urban Sciences* 22 (2), S. 201–215.
- BELLEMANS, T., KOCHAN, B., JANSSENS, D., WETS, G., ARENTZE, T. A. und TIMMERMANS, H. J. P. (2010). „Implementation Framework and Development Trajectory of FEATHERS Activity-Based Simulation Platform“. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2175 (1), S. 111–119.
- BHAT, C. R. (2008). „Brief Description of CEMDAP: Comprehensive Econometric Microsimulator for Daily Activity-Travel Patterns“. In: *Innovations in Travel Demand Modeling, Volume 2: Papers*. Herausgeber: NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. The National Academic Press, S. 14–16.
- BHAT, C. R., GUO, J. Y., SRINIVASAN, S. und SIVAKUMAR, A. (2004). „A Comprehensive Econometric Micro-simulator for Daily Activity-travel Patterns“. In: *Transportation Research Record* 1894, S. 57–66.
- BHAT, C. R., PINJARI, A., ELURU, N., SENER, I., COPPERMAN, R., GUO, J. Y. und SRINIVASAN, S. (2008). „Comprehensive Econometric Microsimulator for Daily Activity-Travel Patterns: Recent Developments and Sensitivity Testing Results“. In: *Innovations in Travel Demand Modeling, Volume 2: Papers*. Herausgeber: NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. The National Academic Press, S. 78–81.
- BORTZ, J. und DÖRING, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation. Für Human- und Sozialwissenschaftler*. 4. Auflage. Springer Medizin Verlag.
- BOSSEL, H. (2004). *Systeme, Dynamik, Simulation. Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme*. Books on Demand GmbH.
- BOURDIEU, P. (1983). „Ökonomisches Kapital, kulturelles Kapital, soziales Kapital“. In: *Soziale Ungleichheiten*. Herausgeber: KRECKEL, R. Verlag Otto Schwartz & Co., S. 183–198.
- BOURDIEU, P. (1984). *Distinction. A Social Critique of the Judgement of Taste*. Harvard University Press.
- BOURDIEU, P. (1986). „The Forms of Capital“. In: *Handbook of Theory of Research for the Sociology of Education*. Herausgeber: RICHARDSON, J. G. Greenwood Publishing Group, S. 241–258.
- BOWMAN, J. L. und BEN-AKIVA, M. E. (2000). „Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules“. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 35, S. 1–28.

- BRANDT, H. (2020). „Exploratorische Faktorenanalyse (EFA)“. In: *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*. Herausgeber: MOOSBRUGGER, H. und KELAVA, A. Springer Verlag GmbH, S. 575–614.
- BRATMAN, M. E. (1987). *Intentions, Plans, and Practical Reason*. Harvard University Press.
- BRATMAN, M. E., ISRAEL, D. J. und POLLACK, M. E. (1988). „Plans and resource-bounded practical reasoning“. In: *Computational Intelligence* 4 (3), S. 349–355.
- BRAUN, N. (2009). „Rational Choice Theory“. In: *Handbuch Soziologische Theorien*. Herausgeber: KNEER, G. und SCHROER, M. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 395–418.
- BREIMAN, L. (2001). „Random Forests“. In: *Machine Learning* 45, S. 5–32.
- BREIMAN, L., FRIEDMAN, J., STONE, C. J. und OLSHEN, R. A. (1984). *Classification and Regression Trees*. Taylor & Francis.
- BRETTO, A. (2013). *Hypergraph Theory. An Introduction*. Springer International Publishing.
- BRINKKEMPER, S. (1996). „Method engineering: engineering of information systems development methods and tools“. In: *Information and Software Technology* 38, S. 275–280.
- BRINKMANN, M. (2018). „Physikalische Testfeld-Architektur für die Unterstützung der Entwicklung von automatisierten Schiffsführungssystemen“. Dissertation. Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.
- BROERSEN, J., DASTANI, M., HULSTIJN, J., HUANG, Z. und VAN DER TORRE, L. (2001). „The BOID architecture: conflicts between beliefs, obligations, intentions and desires“. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Autonomous Agents*, S. 9–16.
- BROOKS, R. A. (1986). „A Robust Layered Control System For A Mobile Robot“. In: *IEEE Journal of Robotics and Automation* 2 (1), S. 14–23.
- BRYANT, C. G. A. und JARY, D. (2003). „Anthony Giddens“. In: *The Blackwell Companion to Major Contemporary Social Theorists*. Herausgeber: RITZER, G. Blackwell Publishing, S. 247–273.
- BUNDESINSTITUT FÜR BAU-, STADT- UND RAUMFORSCHUNG (BBSR) (2020–2021). *Laufende Stadtbeobachtung - Raumabgrenzungen: Stadt- und Gemeindetypen in Deutschland*. Verfügbar unter: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/raumb Beobachtung/Raumabgrenzungen/deutschland/gemeinden/StadtGemeindetyp/StadtGemeindetyp.html> (letzter Abruf: 27.02.2022).
- BUNGARTZ, H.-J., ZIMMER, S., BUCHHOLZ, M. und PFLÜGER, D. (2013). *Modellbildung und Simulation. Eine anwendungsorientierte Einführung*. 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- BURNS, A. C. und BUSH, R. F. (2008). *Basic Marketing Research. Using Microsoft Excel Data Analysis*. 2. Auflage. Pearson.
- BÜSCHGES, G., ABRAHAM, M. und FUNK, W. (1998). *Grundzüge der Soziologie*. 3. Auflage. R. Oldenbourg Verlag.
- BUSSMANN, S., CIANCARINI, P., DECKER, K., HUHNS, M. und WOOLDRIDGE, M. (2000). „Agent-Oriented Software Engineering“. In: *Intelligent Agents VI. Agent Theories, Archi-*

- tectures, and Languages*. Herausgeber: JENNINGS, N. R. und LESPÉRANCE, Y. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 248–249.
- CALVERT, J. (2006). „What’s Special about Basic Research?“ In: *Science, Technology & Human Values* 31 (2), S. 199–220.
- CASCETTA, E. (2009). *Transportation Systems Analysis. Models and Applications*. 2. Auflage. Springer Science+Business Media.
- CASTIGLIONE, J., BRADLEY, M. und GLIEBE, J. (2015). *Activity-Based Travel Demand Models: A Primer*. Washington, D.C., USA.
- CHALMERS, A. F. (2007). *Wege der Wissenschaft. Einführung in die Wissenschaftstheorie*. Herausgeber: BERGEMANN, N. und ALTSTÖTTER-GLEICH, C. 6. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- CHEN, S.-J. und HWANG, C.-L. (1992). *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making. Methods and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- COLEMAN, J. S. (1986). „Social Theory, Social Research, and a Theory of Action“. In: *The American Journal of Sociology* 91 (6), S. 1309–1335.
- COLEMAN, J. S. (1987). „Microfoundations and Macrosocial Behavior“. In: *The Micro-Macro Link*. Herausgeber: ALEXANDER, J. C., GIESEN, B., MÜNCH, R. und SMELSER, N. J. University of California Press, S. 153–173.
- COLLAN, M. (2007). *Lazy User Behaviour*. Munich Personal RePEc Archive (MPRA) Paper No. 4330. Verfügbar unter: <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/4330> (letzter Abruf: 27.02.2022).
- COLLEDANCHISE, M. und ÖGREN, P. (2017). „How Behavior Trees Modularize Hybrid Control Systems and Generalize Sequential Behavior Compositions, the Subsumption Architecture, and Decision Trees“. In: *IEEE Transactions on Robotics* 33 (2), S. 372–389.
- COLLEDANCHISE, M. und ÖGREN, P. (2019). *Behavior Trees in Robotics and AI. An Introduction*. Taylor & Francis.
- COOPER, H. M. (1988). „Organizing Knowledge Syntheses: A Taxonomy of Literature Reviews“. In: *Knowledge, Technology & Policy* 1, S. 104–126.
- DÄHLMANN, K., JAHNS, M., PIEPER, N. und SAUER, J. (2021). „From Empirical Data to Operational Models: An Approach for the Development of a Decision-Making Component for an Agent-Based Mobility Simulation from Quantitative Survey Data“. In: *Progress in Sustainable Mobility Research. Interdisciplinary Approaches for Rural Areas*. Herausgeber: MARX GÓMEZ, J., HALBERSTADT, J., HENKEL, A., KÖSTER, F., SAUER, J., TAEGER, J., WINTER, A. und WOISETSCHLÄGER, D. M. Springer Nature, S. 53–78.
- DÄHLMANN, K., SAMLAND, U. und SAUER, J. (2019). „Developing Fuzzy Inference Systems from Qualitative Interviews for Travel Mode Choice in an Agent-based Mobility Simulation“. In: *KI 2019: Advances in Artificial Intelligence (LNAI 11793)*. Herausgeber: BENZMÜLLER, C. und STUCKENSCHMIDT, H. Springer International Publishing, S. 146–153.
- DÄHLMANN, K. und SAUER, J. (2018). „A Hybrid Fuzzy Controller for Human-like Decision Making in Modal Choice Situations“. In: *Adjunct Proceedings of the 32<sup>nd</sup> EnviroInfo*

- conference. Herausgeber: BUNGARTZ, H.-J., KRANZLMÜLLER, D., WEINBERG, V., WEISMÜLLER, J. und WOHLGEMUTH, V., S. 281–286.
- DÄHLMANN, K. und SAUER, J. (2019). „Towards an Integrated Agent and Environment Architecture for Simulation of Human Decision Making and Behavior“. In: *Smart Cities/Smart Regions – Technische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Innovationen. Konferenzband zu den 10. BUIS-Tagen*. Herausgeber: MARX GÓMEZ, J., SOLSBACH, A., KLENKE, T. und WOHLGEMUTH, V. Springer Vieweg, S. 241–255.
- DAVIS, F., BAGOZZI, P. und WARSHAW, P. (1989). „User acceptance of computer technology: a comparison of two theoretical models“. In: *Management Science* 35 (8), S. 982–1003.
- DE LANGE, N. (2020). *Geoinformatik in Theorie und Praxis. Grundlagen von Geoinformationssystemen, Fernerkundung und digitaler Bildverarbeitung*. 4. Auflage. Springer Verlag GmbH.
- DEFFNER, J. (2018). „Fuß- und Radverkehr“. In: *Verkehrspolitik. Eine Interdisziplinäre Einführung*. Herausgeber: SCHWEDES, O. Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 415–444.
- DELONE, W. H. und MCLEAN, E. R. (1992). „Information System Success: The Quest for the Dependent Variable“. In: *Information Systems Research* 3 (1), S. 60–95.
- DELONE, W. H. und MCLEAN, E. R. (2002). „Information Systems Success Revisited“. In: *Proceedings of the 35<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Sciences*, S. 2966–2976.
- DELONE, W. H. und MCLEAN, E. R. (2003). „The DeLone and McLean Model of Information Systems Success: A Ten-Year Update“. In: *Journal of Management Information Systems* 19 (4), S. 9–30.
- DZIEKAN, K. und ZISTEL, M. (2018). „Öffentlicher Verkehr“. In: *Verkehrspolitik. Eine Interdisziplinäre Einführung*. Herausgeber: SCHWEDES, O. Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 347–372.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI) (1998). *ESRI Shapefile Technical Description*.
- ESSER, H. (1999). *Soziologie. Allgemeine Grundlagen*. 3. Auflage. Campus Verlag.
- ETTEMA, D., BORGERS, A. und TIMMERMANS, H. (1996). „SMASH (Simulation Model of Activity Scheduling Heuristics): Some Simulations“. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1551 (1), S. 88–94.
- ETTEMA, D. F., BORGERS, A. W. J. und TIMMERMANS, H. J. P. (1993). „Simulation model of activity scheduling behavior“. In: *Transportation Research Record* 1413, S. 1–11.
- FAKLER, B. und JONAS, P. (2010). „Grundlagen zellulärer Erregbarkeit“. In: *Physiologie des Menschen. Mit Pathophysiologie*. Herausgeber: SCHMIDT, R. F., LANG, F. und HECKMANN, M. Springer Medizin Verlag, S. 49–75.
- FELSCH, A. (2010). *Organisationsdynamik. Zur Konstitution organisationaler Handlungssysteme als kollektive Akteure*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- FERBER, J. (2001). *Multiagentensysteme. Eine Einführung in die Verteilte Künstliche Intelligenz*. Addison-Wesley.

- FISCHER, K. und FLORIAN, M. (2005). „Contribution of Socionics to the Scalability of Complex Social Systems: Introduction“. In: *Socionics. Scalability of Complex Social Systems*. Herausgeber: FISCHER, K., FLORIAN, M. und MALSCH, T. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 1–14.
- FISHBEIN, M. und AJZEN, I. (1975). *Belief, Attitude, Intention and Behavior. An Introduction to Theory and Research*. Longman Higher Education.
- FISHBEIN, M. und AJZEN, I. (2010). *Predicting and Changing Behavior. The Reasoned Action Approach*. Taylor & Francis.
- FURUHATA, M., DESSOUKY, M., ORDÓÑEZ, F., BRUNET, M.-E., WANG, X. und KOENIG, S. (2013). „Ridesharing: The state-of-the-art and future directions“. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 57, S. 28–46.
- GIDDENS, A. (1997). *Die Konstitution der Gesellschaft*. Campus Verlag.
- GILBERT, N. und TROITZSCH, K. G. (2005). *Simulation for the Social Scientist*. 2. Auflage. Open University Press.
- GOODHUE, D. L. und THOMPSON, R. L. (1995). „Task-Technology Fit and Individual Performance“. In: *MIS Quarterly* 19 (2), S. 213–236.
- GÖTZ, K. und STEIN, M. (2018). „Freizeitmobilität und -verkehr“. In: *Verkehrspolitik. Eine Interdisziplinäre Einführung*. Herausgeber: SCHWEDES, O. Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 323–346.
- GRETHER, D., CHEN, Y., RIESER, M. und NAGEL, K. (2009). „Effects of a Simple Mode Choice Model in a Large-Scale Agent-Based Transport Simulation“. In: *Complexity and Spatial Networks. In Search of Simplicity*. Herausgeber: REGGIANI, A. und NIJKAMP, P. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 167–186.
- GUO, K. L. (2008). „DECIDE: A Decision-Making Model for More Effective Decision Making by Health Care Managers“. In: *The Health Care Manager* 27 (2), S. 118–127.
- HAMMER, A. und SCHEINER, J. (2006). „Lebensstile, Wohnmilieus, Raum und Mobilität – Der Untersuchungsansatz von StadtLeben“. In: *StadtLeben – Wohnen, Mobilität und Lebensstil. Neue Perspektiven für Raum und Verkehrsentwicklung*. Herausgeber: BECKMANN, K. J., HESSE, M., HOLZ-RAU, C. und HUNECKE, M. VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 15–30.
- HARBACH, H. (2012). *Computer und menschliches Verhalten. Informatik und die Zukunft der Soziologie*. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- HECKMANN, M. und DUDEL, J. (2010). „Synaptische Übertragung“. In: *Physiologie des Menschen. Mit Pathophysiologie*. Herausgeber: SCHMIDT, R. F., LANG, F. und HECKMANN, M. Springer Medizin Verlag, S. 76–97.
- HEINRICHS, M., KRAJZEWICZ, D., CYGANSKI, R. und SCHMIDT, A. von (2016). „Disaggregated car fleets in microscope travel demand modelling“. In: *Procedia Computer Science* 83, S. 155–162.
- HEINRICHS, M., KRAJZEWICZ, D., CYGANSKI, R. und SCHMIDT, A. von (2017). „Introduction of car sharing into existing car fleets in microscopic travel demand modelling“. In: *Personal and Ubiquitous Computing* 21, S. 1055–1065.

- HELBING, D. (2012). „Modeling of Socio-Economic Systems“. In: *Social Self-Organization. Agent-Based Simulations and Experiments to Study Emergent Social Behavior*. Herausgeber: HELBING, D. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 1–24.
- HEVNER, A. R., MARCH, S. T., PARK, J. und RAM, S. (2004). „Design Science in Information Systems Research“. In: *MIS Quarterly* 28 (1), S. 75–105.
- HILLEBRANDT, F. (2009). „Praxistheorie“. In: *Handbuch Soziologische Theorien*. Herausgeber: KNEER, G. und SCHROER, M. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 369–394.
- HLAWATSCH, A. und KRICKL, T. (2019). „Einstellungen zu Befragungen“. In: *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Herausgeber: BAUR, N. und BLASIUS, J. Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 357–364.
- HO, T. K. (1995). „Random Decision Forests“. In: *Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference on Document Analysis and Recognition*, S. 278–282.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE) COMPUTER SOCIETY (2017). *IEEE 1012-2016/Cor 1-2017 - IEEE Draft Standard for System, Software and Hardware Verification and Validation - Corrigendum 1*.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC) (2000). *IEC 61131-7:2000 Programmable controllers - Part 7: Fuzzy control programming*.
- INTERNET ENGINEERING TASK FORCE (IETF) (2017). *IETF STD 90, RFC 8259: The JavaScript Object Notation (JSON) Data Interchange Format*. Herausgeber: BRAY, T.
- JANSSENS, D., WETS, G., BRIJS, T., VANHOOF, K., ARENTZE, T. A. und TIMMERMANS, H. J. P. (2004). „Improving Performance of Multiagent Rule-Based Model for Activity Pattern Decisions with Bayesian Networks“. In: *Transportation Research Record* 1894, S. 75–83.
- JANSSENS, D., WETS, G., BRIJS, T., VANHOOF, K., ARENTZE, T. A. und TIMMERMANS, H. J. P. (2006). „Integrating Bayesian networks and decision trees in a sequential rule-based transportation model“. In: *European Journal of Operational Research* 175 (1), S. 16–34. ISSN: 03772217.
- JANZEN, M. und AXHAUSEN, K. W. (2017). „Destination and Mode Choice in an Agent-Based Simulation of Long-Distance Travel Demand“. In: *17<sup>th</sup> Swiss Transport Research Conference*.
- JANZEN, M. und AXHAUSEN, K. W. (2018). „Decision Making in an Agent-Based Simulation of Long-Distance Travel Demand“. In: *Procedia Computer Science* 130, S. 830–835.
- JANZEN, M., CHARYPAR, D. und AXHAUSEN, K. W. (2014). „Long Term Simulation of a Continuous Target-Based Model“. In: *14<sup>th</sup> Swiss Transport Research Conference*.
- JO, T. (2019). *Text Mining. Concepts, Implementation, and Big Data Challenge*. Springer International Publishing.
- KAGERMEIER, A. (2004). „Verkehrssystem- und Mobilitätsmanagement unter den Bedingungen des ländlichen Raumes“. In: *Verkehrssystem- und Mobilitätsmanagement im ländlichen Raum*. Herausgeber: KAGERMEIER, A. Verlag MetaGIS Infosysteme, S. 17–24.

- KAHRAMAN, C. (2008). „Multi-Criteria Decision Making Methods and Fuzzy Sets“. In: *Fuzzy Multi-Criteria Decision Making. Theory and Applications with Recent Developments*. Herausgeber: KAHRAMAN, C. Springer Science+Business Media, S. 1–18.
- KAMIŃSKI, B., JAKUBCZYK, M. und SZUFEL, P. (2018). „A framework for sensitivity analysis of decision trees“. In: *Central European Journal of Operations Research* 26, S. 135–159.
- KASS, G. V. (1980). „An Exploratory Technique for Investigating Large Quantities of Categorical Data“. In: *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* 29 (2), S. 119–127.
- KIRSCH, K. (2015). „Schlüsselereignisse und schleichende Prozesse mit Auswirkungen auf die Mobilität Älterer“. In: *Räumliche Mobilität und Lebenslauf. Studien zu Mobilitätsbiografien und Mobilitätssozialisation*. Herausgeber: SCHEINER, J. und HOLZ-RAU, C. Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 151–175.
- KITAMURA, R. und FUJII, S. (1998). „Two Computational Process Models of Activity-Travel Behavior“. In: *Theoretical Foundations of Travel Choice Modeling*. Herausgeber: GÄRLING, T., LAITILA, T. und WESTIN, K. Emerald Group Publishing Limited, S. 251–279.
- KITAMURA, R., PAS, E. I., LULA, C. V., LAWTON, T. K. und BENSON, P. E. (1996). „The sequenced activity mobility simulator (SAMS): an integrated approach to modeling transportation, land use and air quality“. In: *Transportation* 23, S. 267–291.
- KOCKELMAN, K., XIE, C., FAGNANT, D., THOMPSON, T., McDONALD-BULLER, E. und WALLER, S. T. (2010). *Comprehensive Evaluation of Transportation Projects: A Toolkit for Sketch Planning*. Austin, Texas, USA.
- KOKORSCH, M. und KÜPPER, P. (2019). *Trends der Nahversorgung in ländlichen Räumen (Thünen Working Paper 126)*. Herausgeber: THÜNEN-INSTITUT FÜR LÄNDLICHE RÄUME. Verfügbar unter: [https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-workingpaper/ThuenenWorkingPaper\\_126.pdf](https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-workingpaper/ThuenenWorkingPaper_126.pdf) (letzter Abruf: 27.02.2022).
- KOSKI, T. und NOBLE, J. M. (2009). *Bayesian Networks. An Introduction*. Wiley & Sons.
- KRAJZEWICZ, D., HARDINGHAUS, M., HEINRICHS, M. und BEIGE, S. (2017). „Computing Spatial Charging Needs using an Agent Based Demand Model“. In: *ISC 2017, 15<sup>th</sup> Annual Industrial Simulation Conference*.
- KRAMER, O. (2009). *Computational Intelligence. Eine Einführung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- KRAMER, O. (2016). *Machine Learning for Evolution Strategies*. Springer International Publishing.
- KRAMER, O. (2017). *Genetic Algorithm Essentials*. Springer International Publishing.
- KRON, T. und WINTER, L. (2015). „Entscheidungshandeln und Fuzzy-Logik“. In: *Handbuch Modellbildung und Simulation in den Sozialwissenschaften*. Herausgeber: BRAUN, N. und SAAM, N. J. Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 363–396.
- KRUGMAN, P. und WELLS, R. (2017). *Volkswirtschaftslehre*. 2. Auflage. Schäffer-Poeschel Verlag für Wirtschaft.

- KUCKARTZ, U. (2010). „Typenbildung“. In: *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie*. Herausgeber: MEY, G. und MRUCK, K. VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 553–568.
- KUCKARTZ, U. (2014). *Mixed Methods. Methodologie, Forschungsdesigns und Analyseverfahren*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- LÄMMEL, U. und CLEVE, J. (2020). *Künstliche Intelligenz. Wissensverarbeitung – Neuronale Netze*. 5. Auflage. Hanser.
- LEEMIS, L. M. und PARK, S. K. (2006). *Discrete-Event Simulation. A First Course*. Pearson.
- LIKERT, R. (1932). „A Technique for the Measurement of Attitudes“. In: *Archives of Psychology* 22 (140), S. 5–55.
- LILLY, J. H. (2010). *Fuzzy Control and Identification*. Wiley & Sons.
- LIMA AZEVEDO, C., DESHMUKH, N. M., MARIMUTHU, B., OH, S., MARCZUK, K., SOH, H., BASAK, K., TOLEDO, T., PEH, L.-S. und BEN-AKIVA, M. E. (2017). „SimMobility Short-Term: An Integrated Microscopic Mobility Simulator“. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2622, S. 13–23.
- LIMA AZEVEDO, C., MARCZUK, K., RAVEAU, S., SOH, H., ADNAN, M., BASAK, K., LOGANATHAN, H., DESHMUKH, N., LEE, D.-H., FRAZZOLI, E. und BEN-AKIVA, M. (2016). „Microsimulation of Demand and Supply of Autonomous Mobility On Demand“. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2564 (1), S. 21–30.
- LITMAN, T. (2003). „Measuring Transportation“. In: *ITE Journal* 73 (10), S. 28–32.
- LOVRIĆ, M., RAVEAU, S., ADNAN, M., PEREIRA, F. C., BASAK, K., LOGANATHAN, H. und BEN-AKIVA, M. (2016). „Evaluating Off-Peak Pricing Strategies in Public Transportation with an Activity-Based Approach“. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2544 (1), S. 10–19.
- LU, Y., BASAK, K., CARRION, C., LOGANATHAN, H., ADNAN, M., PEREIRA, F. C., SABER, V. H. und BEN-AKIVA, M. E. (2015). „SimMobility Mid-Term Simulator: A State of the Art Integrated Agent Based Demand and Supply Model“. In: *TRB 94<sup>th</sup> Annual Meeting Compendium of Papers*.
- LUKE, S., CIOFFI-REVILLA, C., PANAIT, L., SULLIVAN, K. und BALAN, G. (2005). „MASON: A Multi-Agent Simulation Environment“. In: *Simulation: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International* 81 (7), S. 517–527.
- MADERTHANER, R. (2017). *Psychologie*. 2. Auflage. UTB GmbH.
- MAMDANI, E. H. und ASSILIAN, S. (1975). „An Experiment in linguistic synthesis with a fuzzy controller“. In: *International Journal of Man-Machine Studies* 7 (1), S. 1–13.
- MANN, L., HARMONI, R. und POWER, C. (1991). „The GOFER Course in Decision Making“. In: *Teaching Decision Making To Adolescents*. Herausgeber: BARON, J. und BROWN, R. V. Routledge, S. 61–78.
- MARCZUK, K. A., SOH SOON HONG, H., LIMA AZEVEDO, C. M., ADNAN, M., PENDLETON, S. D., FRAZZOLI, E. und LEE, D. H. (2015). „Autonomous mobility on demand in SimMobility: Case study of the central business district in Singapore“. In: *IEEE 7<sup>th</sup> Inter-*

- national Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM).*
- MÄRKI, F. (2014). „An agent-based model for continuous activity planning of multi-week scenarios“. Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- MÄRKI, F., CHARYPAR, D. und AXHAUSEN, K. W. (2011). „Continuous Activity Planning for Continuous Traffic Simulation“. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2230 (1).
- MÄRKI, F., CHARYPAR, D. und AXHAUSEN, K. W. (2014). „Agent-based model for continuous activity planning with an open planning horizon“. In: *Transportation* 41, S. 905–922.
- MCCULLOCH, W. S. und PITTS, W. (1943). „A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity“. In: *Bulletin of Mathematical Biophysics* 5, S. 115–133.
- MCNALLY, M. G. und RINDT, C. R. (2007). „The Activity-Based Approach“. In: *Handbook of Transport Modelling*. Herausgeber: HENSHER, D. A. und BUTTON, K. J. Elsevier Science, S. 55–73.
- MENDEL, J. M., HAGRAS, H., TAN, W.-W., MELEK, W. W. und YING, H. (2014). *Introduction to Type-2 Fuzzy Logic Control. Theory and Applications*. Wiley & Sons.
- MIEBACH, B. (2014). *Soziologische Handlungstheorie. Eine Einführung*. 4. Auflage. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- MILLER, E. J. (2018). „The case for microsimulation frameworks for integrated urban models“. In: *Journal of Transport and Land Use* 11 (1), S. 1025–1037.
- MILLER, E. J. und ROORDA, M. J. (2003). „A Prototype Model of Household Activity-/Travel Scheduling“. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1831, S. 114–121.
- MILLER, E. J., ROORDA, M. J. und CARRASCO, J. A. (2005). „A tour-based model of travel mode choice“. In: *Transportation* 32, S. 399–422.
- MILLER, E. J., VAUGHAN, J., KING, D. und AUSTIN, M. (2015). „Implementation of a “Next Generation” Activity-Based Travel Demand Model: The Toronto Case“. In: *TAC 2015: Getting You There Safely – 2015 Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada*.
- MILLER, G. A. (2003). „The cognitive revolution: a historical perspective“. In: *TRENDS in Cognitive Science* 7 (3), S. 141–144.
- MILLER, J. H. und PAGE, S. E. (2007). *Complex Adaptive Systems. An Introduction to Computational Models of Social Life*. Princeton University Press.
- MOECKEL, R., LLORCA GARCIA, C., MORENO CHOU, A. T. und OKRAH, M. B. (2018). „Trends in integrated land-use/transport modeling: An evaluation of the state of the art“. In: *Journal of Transport and Land Use* 11 (1), S. 463–476.
- MOHER, D., LIBERATI, A., TETZLAFF, J., ALTMAN, D. G. und THE PRISMA GROUP (2009). „Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement“. In: *Annals of Internal Medicine* 151 (4), S. 264–269.

- MOOSBRUGGER, H. und KELAVA, A. (2020). „Qualitätsanforderungen an Tests und Fragebögen („Gütekriterien“)“. In: *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*. Herausgeber: MOOSBRUGGER, H. und KELAVA, A. Springer Verlag GmbH, S. 13–38.
- MYERS, D. G. (2014). *Psychologie*. 3. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- NASH, J. (1950). „Equilibrium Points in n-Person Games“. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 36 (1), S. 48–49. ISSN: 0027-8424.
- NASH, J. (1951). „Non-Cooperative Games“. In: *Annals of Mathematics* 54 (2), S. 286–295.
- NEUMANN, A., BALMER, M. und RIESER, M. (2012). „Converting a Static Macroscopic Model Into a Dynamic Activity-Based Model to Analyze Public Transport Demand in Berlin“. In: *13th International Conference on Travel Behaviour Research*.
- NEUMEIER, S. (2017). *Regionale Erreichbarkeit von ausgewählten Fachärzten, Apotheken, ambulanten Pflegediensten und weiteren ausgewählten Medizindienstleistungen in Deutschland – Abschätzung auf Basis des Thünen-Erreichbarkeitsmodells (Thünen Working Paper 77)*. Herausgeber: THÜNEN-INSTITUT FÜR LÄNDLICHE RÄUME. Verfügbar unter: [https://literatur.thuenen.de/digbib\\_extern/dn058983.pdf](https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn058983.pdf) (letzter Abruf: 27.02.2022).
- NORLING, E., SONENBERG, L. und RÖNNQUIST, R. (2001). „Enhancing Multi-Agent Based Simulation with Human-Like Decision Making Strategies“. In: *Multi-Agent-Based Simulation*. Herausgeber: MOSS, S. und DAVIDSSON, P. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 214–228.
- ORTÚZAR, J. de D. und WILLUMSEN, L. G. (2011). *Modelling Transport*. 4. Auflage. Wiley & Sons.
- OSBORNE, M. J. und RUBINSTEIN, A. (1994). *A Course in Game Theory*. MIT Press.
- OSTROM, T. M. (1988). „Computer Simulation: The Third Symbol System“. In: *Journal of Experimental Social Psychology* 24, S. 381–392.
- PADGHAM, L., NAGEL, K., SINGH, D. und CHEN, Q. (2014). „Integrating BDI Agents into a MATSim Simulation“. In: *Proceedings of the Twenty-first European Conference on Artificial Intelligence*, S. 681–686.
- PARTSCH, H. (2010). *Requirements-Engineering systematisch. Modellbildung für softwaregestützte Systeme*. 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- PASSINO, K. M. und YURKOVICH, S. (1998). *Fuzzy Control*. Addison-Wesley.
- PEFFERS, K., TUUNANEN, T., GENGLER, C. E., ROSSI, M., HUI, W., VIRTANEN, V. und BRAGGE, J. (2006). „The Design Science Research Process: A Model for Producing and Presenting Information Systems Research“. In: *1<sup>st</sup> International Conference on Design Science in Information Systems and Technology*, S. 83–106.
- PIEKENBROCK, D. und HENNIG, A. (2013). *Einführung in die Volkswirtschaftslehre und Mikroökonomie*. 2. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- PITSIAVA-LATINOPOULOU, M. und IORDANOPOULOS, P. (2012). „Intermodal Passengers Terminals: Design standards for better level of service“. In: *Procedia Social and Behavioral Sciences* 48, S. 3297–3306. ISSN: 18770428.
- POMEROL, J.-C. (2012). *Decision-Making and Action*. ISTE.

- QUINLAN, J. R. (1987). „Simplifying decision trees“. In: *International Journal of Man-Machine Studies* 27 (3), S. 221–234.
- QUINLAN, J. R. (1993). *C4.5: Programs for Machine Learning*. Morgan Kaufmann Publishers.
- RAITHEL, J. (2008). *Quantitative Forschung. Ein Praxiskurs*. 2. Auflage. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- RANEY, B. (2005). „Learning framework for large-scale multi-agent simulations“. Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- RANEY, B. und NAGEL, K. (2006). „An improved framework for large-scale multi-agent simulations of travel behaviour“. In: *Towards better Performing Transport Networks*. Herausgeber: JOURQUIN, B., RIETVELD, P. und WESTIN, K. Routledge, S. 305–347.
- RAUB, W. und VOSS, T. (2017). „Micro-Macro Models in Sociology: Antecedents of Coleman’s Diagram“. In: *Social Dilemmas, Institutions, and the Evolution of Cooperation*. Herausgeber: JANN, B. und PRZEPIORKA, W., S. 11–36.
- RAUTENSTRAUCH, C. und SCHULZE, T. (2003). *Informatik für Wirtschaftswissenschaftler und Wirtschaftsinformatiker*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- RECKER, W. W., MCNALLY, M. G. und ROOT, G. S. (1986a). „A Model of Complex Travel Behavior: Part I—Theoretical Development“. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 20A (4), S. 307–318.
- RECKER, W. W., MCNALLY, M. G. und ROOT, G. S. (1986b). „A Model of Complex Travel Behavior: Part II—An Operational model“. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 20A (4), S. 319–330.
- RIDDER, H.-G. (2017). „The theory contribution of case study research designs“. In: *Business Research* 10, S. 281–305.
- ROKACH, L. und MAIMON, O. (2015). *Data Mining with Decision Trees. Theory and Applications*. 2. Auflage. World Scientific Publishing.
- ROORDA, M. J. und MILLER, E. J. (2005). „Assessing Transportation Policy Using an Activity-based Microsimulation Model of Travel Demand“. In: *33<sup>rd</sup> Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering 2005: Gateway To Excellence*, S. 3518–3527.
- ROORDA, M. J., MILLER, E. J. und NURUL HABIB, K. M. (2008). „Validation of TASHA: A 24-h activity scheduling microsimulation model“. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 42 (2), S. 360–375.
- RUPP, C. und JOPPICH, R. (2014). „Anforderungsschablonen – der MASTeR-Plan für gute Anforderungen“. In: *Requirements-Engineering und -Management. Aus der Praxis von klassisch bis agil*. Herausgeber: RUPP, C. und DIE SOPHISTEN. Hanser, S. 215–246.
- RUSSELL, S. und NORVIG, P. (2010). *Artificial Intelligence. A Modern Approach*. 3. Auflage. Pearson.
- SAAM, N. J. (2009a). „Computersimulation“. In: *Handbuch Methoden der Organisationsforschung. Quantitative und Qualitative Methoden*. Herausgeber: KÜHL, S., STRODT HOLZ, P. und TAFFERTSHOFER, A. VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 498–516.

- SAAM, N. J. (2009b). „Modellbildung“. In: *Handbuch Methoden der Organisationsforschung. Quantitative und Qualitative Methoden*. Herausgeber: KÜHL, S., STRODTOLZ, P. und TAFFERTSHOFER, A. VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 517–532.
- SAAM, N. J. (2015). „Simulation in den Sozialwissenschaften“. In: *Handbuch Modellbildung und Simulation in den Sozialwissenschaften*. Herausgeber: BRAUN, N. und SAAM, N. J. Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 61–95.
- SAAM, N. J. und GAUTSCHI, T. (2015). „Modellbildung in den Sozialwissenschaften“. In: *Handbuch Modellbildung und Simulation in den Sozialwissenschaften*. Herausgeber: BRAUN, N. und SAAM, N. J. Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 15–60.
- SCHAUZ, D. (2014). „What is Basic Research? Insights from Historical Semantics“. In: *Minnerva* 52, S. 273–328.
- SCHIMANK, U. (2005). „From “Clean” Mechanisms to “Dirty” Models: Methodological Perspectives of an Up-Scaling of Actor Constellations“. In: *Socionics. Scalability of Complex Social Systems*. Herausgeber: FISCHER, K., FLORIAN, M. und MALSCH, T. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 15–35.
- SCHMITT, V. (2018). „In den ÖPNV integrierte Mitnahmesysteme im ländlichen Raum – Wirkungsanalyse und Bewertung“. Dissertation. Universität Kassel.
- SCHREIER, M. und ODAĞ, Ö. (2010). „Mixed Methods“. In: *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie*. Herausgeber: MEY, G. und MRUCK, K. VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 263–277.
- SCHRÖDER, T. und WOLF, I. (2016). „Modelling multi-level mechanisms of environmental attitudes and behaviours: The example of carsharing in Berlin“. In: *Journal of Environmental Psychology* 52, S. 136–148.
- SCHRÖDER, T. und WOLF, I. (2018). „Psychologische Aspekte nachhaltiger Mobilität: Struktur und Dynamik von Einstellungen zu Mobilitätsinnovationen“. In: *Psychologie und Nachhaltigkeit. Konzeptionelle Grundlagen, Anwendungsbeispiele und Zukunftsperspektiven*. Herausgeber: SCHMITT, C. T. und BAMBERG, E. Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 203–213.
- SHAHEEN, S., STOCKER, A. und MUNDLER, M. (2017). „Online and App-Based Carpooling in France: Analyzing Users and Practices—A Study of BlaBlaCar“. In: *Disrupting Mobility. Impacts of Sharing Economy and Innovative Transportation on Cities*. Herausgeber: MEYER, G. und SHAHEEN, S. Springer International Publishing, S. 181–196.
- SHANMUGANATHAN, S. (2016). „Artificial Neural Network Modelling: An Introduction“. In: *Artificial Neural Network Modelling*. Herausgeber: SHANMUGANATHAN, S. und SAMARASINGHE, S. Springer International Publishing, S. 1–14.
- SHEFRIN, H. (2002). *Beyond Greed and Fear. Understanding Behavioral Finance and the Psychology of Investing*. Oxford University Press.
- SHIFTAN, Y. und BEN-AKIVA, M. E. (2011). „A practical policy-sensitive, activity-based, travel-demand model“. In: *The Annals of Regional Science* 47 (3), S. 517–541.

- SHIFTAN, Y. und SUHRBIER, J. (2002). „The analysis of travel and emission impacts of travel demand management strategies using activity-based models“. In: *Transportation* 29, S. 145–168.
- SHOHAM, Y. (1993). „Agent-oriented programming“. In: *Artificial Intelligence* 60 (1), S. 51–92.
- SILER, W. und BUCKLEY, J. J. (2005). *Fuzzy Expert Systems and Fuzzy Reasoning*. Wiley & Sons.
- SONAR, T. (2001). *Angewandte Mathematik, Modellbildung und Informatik. Eine Einführung für Lehramtsstudenten, Lehrer und Schüler*. Vieweg.
- STACHOWIAK, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Springer-Verlag Wien.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (STBA), WISSENSCHAFTSZENTRUM BERLIN FÜR SOZIALFORSCHUNG und BUNDESINSTITUT FÜR BEVÖLKERUNGSFORSCHUNG, Hrsg. (2021). *Datenreport 2021. Ein Sozialbericht für die Bundesrepublik Deutschland*. Verfügbar unter: [https://www.destatis.de/DE/Service/Statistik-Campus/Datenreport/Downloads/datenreport-2021.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Service/Statistik-Campus/Datenreport/Downloads/datenreport-2021.pdf?__blob=publicationFile) (letzter Abruf: 27.02.2022).
- STOPHER, P. R., HARTGEN, D. T. und LI, Y. (1996). „SMART: simulation model for activities, resources and travel“. In: *Transportation* 23, S. 293–312.
- STOUT, L. A. (2008). „Taking Conscience Seriously“. In: *Moral Markets. The Critical Role of Values in the Economy*. Herausgeber: ZAK, P. J. Princeton University Press, S. 157–172.
- SUTTON, C. D. (2005). „Classification and Regression Trees, Bagging, and Boosting“. In: *Handbook of Statistics. Data Mining and Data Visualization*. Herausgeber: RAO, C. R., WEGMAN, E. J. und SOLKA, J. L. Bd. 24. Elsevier, S. 303–329.
- SUTTON, R. S. und BARTO, A. G. (2018). *Reinforcement Learning. An Introduction*. 2. Auflage. MIT Press.
- TAKAGI, T. und SUGENO, M. (1985). „Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control“. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* SMC-15 (1), S. 116–132.
- TANG, J., LEU, G. und ABBASS, H. A. (2020). *Simulation and Computational Red Teaming for Problem Solving*. Wiley & Sons.
- TÉTARD, F. und COLLAN, M. (2009). „Lazy User Theory: A Dynamic Model to Understand User Selection of Products and Services“. In: *Proceedings of the 42<sup>nd</sup> Hawaii International Conference on System Sciences*.
- THAGARD, P. (2006). *Hot Thought. Mechanisms and Applications of Emotional Cognition*. MIT Press.
- THALER, R. H. und SUNSTEIN, C. R. (2008). *Nudge. Improving Decisions About Health, Wealth, and Happiness*. Yale University Press.
- THÜNEN-INSTITUT FÜR LÄNDLICHE RÄUME, Hrsg. (2016). *Typen ländlicher Räume*. Verfügbar unter: <https://www.landatlas.de/laendlich/typologie.html> (letzter Abruf: 27.02.2022).

- THÜNEN-INSTITUT FÜR LÄNDLICHE RÄUME, Hrsg. (2021). *Thünen-Landatlas*. Verfügbar unter: <https://karten.landatlas.de/app/landatlas> (letzter Abruf: 27.02.2022).
- TRAIN, K. E. (1978). „A Validation Test of a Disaggregate Mode Choice Model“. In: *Transportation Research* 12 (3), S. 167–174.
- TRAIN, K. E. (2003). *Discrete Choice Methods with Simulation*. Cambridge University Press.
- TRAIN, K. E. und WINSTON, C. (2007). „Vehicle Choice Behavior and the Declining Market Share of U.S. Automakers“. In: *International Economic Review* 48 (4), S. 1469–1496.
- TRANFIELD, D., DENYER, D. und SMART, P. (2003). „Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review“. In: *British Journal of Management* 14, S. 207–222.
- TRIANAPHYLLOU, E. (2000). *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Springer Science+Business Media.
- TULLY, C. und BAIER, D. (2018). „Mobilitätssozialisation“. In: *Verkehrspolitik. Eine Interdisziplinäre Einführung*. Herausgeber: SCHWEDES, O. Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 225–241.
- TURING, A. M. (1950). „Computing Machinery and Intelligence“. In: *Mind* LIX (236), S. 433–460.
- ULBRICH, S., MENZEL, T., RESCHKA, A., SCHULDT, F. und MAURER, M. (2015). „Definition der Begriffe Szene, Situation und Szenario für das automatisierte Fahren“. In: *10. Workshop Fahrerassistenzsysteme: FAS 2015*, S. 105–117.
- VENKATESH, V. und DAVIS, F. (2000). „A theoretical extension of the technology acceptance model: Four longitudinal field studies“. In: *Management Science* 46 (2), S. 186–204.
- VENKATESH, V., MORRIS, M. G., DAVIS, G. B. und DAVIS, F. (2003). „User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View“. In: *MIS Quarterly* 27 (3), S. 425–478.
- VENKATESH, V., THONG, J. Y. L. und XU, X. (2012). „Consumer Acceptance and Use of Information Technology: Extending the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology“. In: *MIS Quarterly* 36 (1), S. 157–178.
- VINCENTY, T. (1975). „Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with Application of Nested Equations“. In: *Survey Review* 23 (176), S. 88–93.
- VOM BROCKE, J., SIMONS, A., NIEHAVES, B., RIEMER, K., PLATTFAUT, R. und CLEVEN, A. (2009). „Reconstructing the Giant: On the Importance of Rigour in Documenting the Literature Search Process“. In: *17<sup>th</sup> European Conference on Information Systems*, S. 2206–2217.
- WARDROP, J. G. (1952). „Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research“. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 1 (2), S. 325–362.
- WASSON, C. S. (2006). *System Analysis, Design, and Development. Concepts, Principles, and Practices*. Wiley & Sons.
- WEBSTER, J. und WATSON, R. T. (2002). „Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review“. In: *MIS Quarterly* 26 (2), S. xiii–xxiii.

- WEGENER, M. und FUERST, F. (2004). *Land-Use Transport Interaction: State of the Art*. Social Science Research Network (SSRN). Verfügbar unter: <https://ssrn.com/abstract=1434678> (letzter Abruf: 27.02.2022).
- WEISBERG, M. (2013). *Simulation and Similarity. Using Models to Understand the World*. Oxford University Press.
- WELSCH, J. (2015). „Alltagsmobilität und Mobilitätssozialisation von Menschen aus verschiedenen Herkunftsländern. Ergebnisse einer Pilotstudie in Offenbach am Main“. In: *Räumliche Mobilität und Lebenslauf. Studien zu Mobilitätsbiografien und Mobilitätssozialisation*. Herausgeber: SCHEINER, J. und HOLZ-RAU, C. Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 199–220.
- WILHELMS, M.-P., HENKEL, S. und MERFELD, K. (2017). „You Are What You Share: Understanding Participation Motives in Peer-to-Peer Carsharing“. In: *Disrupting Mobility. Impacts of Sharing Economy and Innovative Transportation on Cities*. Herausgeber: MEYER, G. und SHAHEEN, S. Springer International Publishing, S. 105–119.
- WIND, S., JENSEN, O. B., KAPLAN, S. und PRATO, C. G. (2012). „Paving the road from transport models to “new mobilities” models“. In: *Artikler fra Trafikdage på Aalborg Universitet [Artikel zu den Verkehrstagen der Universität Aalborg]*.
- WOLF, I., SCHRÖDER, T., NEUMANN, J. und DE HAAN, G. (2015). „Changing minds about electric cars: an empirically grounded agent-based modelling approach“. In: *Technological Forecasting and Social Change* 94, S. 269–285. ISSN: 00401625.
- WOOLDRIDGE, M. (2002). *An Introduction to MultiAgent Systems*. Wiley & Sons.
- WOOLDRIDGE, M. (2013). „Intelligent Agents“. In: *Multiagent Systems*. Herausgeber: WEISS, G. MIT Press, S. 3–50.
- YASMIN, F. (2016). „Enhancing the Modelling of Travel Demand Using an Activity-based Approach“. Dissertation. Université de Montréal, École Polytechnique de Montréal.
- YASMIN, F., MORENCY, C. und ROORDA, M. J. (2015). „Assessment of spatial transferability of an activity-based model, TASHA“. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 78, S. 200–213.
- YIN, R. K. (2003). *Case Study Research. Design and Methods*. 3. Auflage. Sage Publications.
- ZADEH, L. A. (1965). „Fuzzy Sets“. In: *Information and Control* 8 (3), S. 338–353.
- ZADEH, L. A. (1975). „The Concept of a Linguistic Variable and its Applications to Approximate Reasoning—I“. In: *Information Sciences* 8 (3), S. 199–249.
- ZIEMKE, D., NAGEL, K. und BHAT, C. R. (2015). „Integrating CEMDAP and MATSim to Increase the Transferability of Transport Demand Models“. In: *Transportation Research Record* 2493, S. 117–125.



# Anhang A

## Fuzzyinferenzsystem

Dieser Anhang umfasst das vollständige Fuzzyinferenzsystem der in Abschnitt 7.1.1 durchgeführten Fallstudie mit einem quantitativen Modell. Abbildung A.1, A.2 und A.3 zeigen dazu die linguistischen Variablen zur Fuzzifizierung, der drei Inferenzstufen und zur Defuzzifizierung sowie die Regelbasen.

```
VAR_INPUT
  age : INT;
  living_environment : INT;
END_VAR

VAR_OUTPUT
  environmental_benefit : INT;
  availability_concerns : INT;
  ridesharing : INT;
  utility : REAL;
END_VAR

FUZZIFY age
  TERM old := (16, 0), (77, 1);
END_FUZZIFY

FUZZIFY living_environment
  TERM rural := (2, 0), (7, 1);
END_FUZZIFY
```

**Abbildung A.1:** Definitionsbereiche der linguistischen Variablen und Fuzzifizierung der Fallstudie mit einem quantitativen Modell.

```
DEFUZZIFY environmental_benefit
  TERM not_existing := -1;
  TERM existing := 1;
END_DEFUZZIFY

DEFUZZIFY availability_concerns
  TERM not_existing := -1;
  TERM existing := 1;
END_DEFUZZIFY

DEFUZZIFY ridesharing
  TERM rejected := -1;
  TERM accepted := 1;
END_DEFUZZIFY

DEFUZZIFY utility
  TERM bad := -1;
  TERM good := 1;
  ACCU : SUM;
  METHOD : COGSS;
END_DEFUZZIFY
```

**Abbildung A.2:** Linguistische Variablen der drei Inferenzstufen und Defuzzifizierung der Fallstudie mit einem quantitativen Modell.

```
RULEBLOCK latent_variables_rulebase
  AND : MIN;
  OR : MAX;
  ACT : MIN;
  RULE 1 : IF living_environment IS rural
            THEN availability_concerns IS existing WITH 0.255;
  RULE 2 : IF living_environment IS not rural
            THEN availability_concerns IS not_existing WITH 0.255;
  RULE 3 : IF age IS old
            THEN environmental_benefit IS existing WITH 0.222;
  RULE 4 : IF age IS not old
            THEN environmental_benefit IS not_existing WITH 0.222;
END_RULEBLOCK

RULEBLOCK vehicles_rulebase
  AND : MIN;
  OR : MAX;
  ACT : MIN;
  RULE 1 : IF environmental_benefit IS not_existing
            THEN ridesharing IS rejected WITH 0.278;
  RULE 2 : IF environmental_benefit IS existing
            THEN ridesharing IS accepted WITH 0.278;
  RULE 3 : IF availability_concerns IS not_existing
            THEN ridesharing IS accepted WITH 0.198;
  RULE 4 : IF availability_concerns IS existing
            THEN ridesharing IS rejected WITH 0.198;
  RULE 5 : IF living_environment IS rural
            THEN ridesharing IS rejected WITH 0.168;
  RULE 6 : IF living_environment IS not rural
            THEN ridesharing IS accepted WITH 0.168;
END_RULEBLOCK

RULEBLOCK utility_rulebase
  AND : MIN;
  OR : MAX;
  ACT : MIN;
  RULE 1 : IF ridesharing IS rejected THEN utility IS bad;
  RULE 2 : IF ridesharing IS accepted THEN utility IS good;
END_RULEBLOCK
```

**Abbildung A.3:** Regelbasen des Fuzzyinferenzsystems der Fallstudie mit einem quantitativen Modell.



# Anhang B

## Interviewzitate

Dieser Anhang beinhaltet die Interviewzitate, die in der in Abschnitt 7.1.2 durchgeführten Fallstudie mit einem qualitativen Modell zur Erstellung des Fuzzyinferenzsystems herangezogen werden. Geplant, durchgeführt und transkribiert wurde das Interview von Ute Samland, Mitarbeiterin am Institut für Soziologie und Kulturorganisation der Leuphana Universität Lüneburg im Kontext von Projekt NEMO. Das vollständige Transkript umfasst 20 Seiten, diese sind im Folgenden auf die für die Fallstudie wesentlichen Zitate reduziert und entsprechend gruppiert.

Um die Anonymität der Interviewteilnehmerin zu wahren, sind Auslassungen von personenbezogenen Daten in den Zitaten durch zusätzliche spitze Klammern markiert.

**Fußwege** „also müsste ich halt erstmal zehn Minuten laufen und [lacht] laufen mag ich [eigentlich eher] wirklich überhaupt nicht“

**Radwege** „ähm ja (..) in der Stadt ab und zu also in die Stadt nehm ich meistens den Bus (.) weils bequemer is als mitm Fahrrad also (.) ja ähm (.) der kommt halt alle viertel Stunde bei mir ähm (.) vor der Haustür und fährt direkt (.) zur Stadt also ähm (.) s is super bequem (.) und ja (..) ich würde gerne lieber das Fahrrad [lacht] nehmen einfach weils frische Luft und sonst ja (.) Vorteile (.) hat aber ähm so so ja Strecken (.) ich glaub es würde sich auch von der Zeit ziemlich decken (.) also Fahrrad und Bus der Bus muss halt ständig anhalten (.) aber ähm s sind drei dreieinhalb Kilometer in die Stadt sein“

„ähm (..) da (.) es war weder Zug noch Bus irgendwie da musste man erstmal <...> zum Bahnhof ähm ja weiß ich auch nich drei beim Kilometer oder so (.) Fahrrad fahren und da war das schon Luxus dass der da fünf Minuten von dem Haus angehalten hat“

**Öffentlicher Verkehr** „aber ähm ja (.) für mich macht das eben auch Lebens(.)qualität aus wenn man (.) also ja (.) ich hab n Studententicket das is für mich günstiger (.) ähm wenn ich mit m Bus zum Beispiel zur Arbeit fahr (.) ähm [2.0] ähm und ich bin jetzt auch nich so der jemand der soo gern Auto fährt (.) also ich [find würd mal so] mit m Bus bevorzugen wenss jetzt nich n riesen Zeitverlust is (..) auch irgendwie sonst so zum ja reisen innerhalb von Deutschland würd ich lieber n Fernbus oder Zug nehmen als mich äh mich ins Auto zu setzen (.) auch wenss ne Stunde schneller geht“

„wenn ich in die Innenstadt fahre nehm ich den Bus weil es is erstmal für mich umsonst ich verbrauch kein Sprit (.) und es ist aber auch bequem“

**Reisen mit Partner** „ähm (..) ich weiß jetzt nich ob das da mit rein zählt aber zum Beispiel mein Freund hat ein hat n Auto weil er es auch äh fürn Job braucht (.) <...> und ähm (..) da fahren wir schon (.) häufiger mal einkauf.. also wenn ich mit ihm was mache nehmen wir eigentlich immer das Auto (.) weils tatsächlich die bequemere Wahl is und er halt kein Studententicket hat (.) er müsste jedes Mal für den Bus bezahlen und ähm (..) ich bin also er is auch eher (..) der Autofahrtyp und dann lass ich mich da so n bisschen von hin...ziehen“

„ja ich bin halt trotzdem Beifahrer (.) ne also ich ich fahr <...> selber nich gern Auto weil es einfach also mir is das zu hektisch (.) ich kanns und es is also ok (.) grad so was Innenstadt und so angeht da sag ich dann (.) also selbst ich das Auto hätte“

„ich würd jetz ja nich wenn ich mitm Freund in die Stadt will (..) würd ich ja nich den Bus alleine nehmen und er nimmt das Auto weil er nich den Bus bezahlen möchte“

**Pünktlichkeit** „der <Bus> fuhr halt einmal stündlich und wenn man dann schon (.) es hat sehr schlecht gepasst <...> sozusagen also es war halt der Linienbus <...> is das (.) ähm das ha..also aufm Hinweg hats auf jeden Fall nich gut gepasst da war ich dann irgendwie 35 Minuten zu früh <...> oder so (.) war noch niemand da (..) und ähm aufm Rückweg war das eben immer so dass sich das um ne halbe Stunde überschritten hat und ich hätte jetz nich ne Stunde deswegen länger gewartet entweder ich hab dann glaub ich“

„da fand ichs halt schon irgendwie nervig dass ich dann den Bus nehmen musste weil man eben lange warten muss der häufig zu spät war und so (.)“

„dann gucken wir halt wie lang wir für den Weg <zu den Eltern> brauchen und ähm früher hat sich in nem andern Stadtteil <...> gewohnt (.) da ham wa dann eben gesagt ja dann ähm sind wir dann und dann bei euch (..) eben geguckt ok der Weg von denen braucht ne halbe Stunde oder so und wir haben uns dann gedacht ja kommen so zehn Minuten zu denen und haben das schon so n bisschen ausgerechnet“

„ich hätte den Zug nehmen können aber wär denn ne Stunde zu früh da gewesen“

„der Bus halt ne also so ne Strecke gefahren is um alles mitzunehmen auf dem Weg hin also n Umweg den wir sind glaub ich nich dieselbe Strecke mitm Auto gefahren (.) genau und äh is hat alles länger gedauert der Bus war dann halt auch nich <...> irgendwie abgepasst also wir waren dann mal ne halbe Stunde zu früh da (.) es gab auch n Zug aber der kam wirklich genau so an dass wir fünf Minuten zu spät gekommen wären“

**Sicherheitsgefühl** „und ähm dafür eigentlich das Auto (.) und halt (..) ähm ja (..) so so wenn schon dunkel is und man noch eben was besorgen muss oder was also was jetz (..) ja weiß ich nich (.) hängt immer voll von der Situation ab wie ich mich fühle (.) ob ich jetzt sag kann ich eben Dein Auto nehmen oder“

# Anhang C

## Szenariobeschreibung

Dieser Anhang umfasst die vollständige Szenariobeschreibung der in Abschnitt 7.1.2 durchgeführten Fallstudie mit einem qualitativen Modell. Abbildung C.1 zeigt dazu die überbeordnete Datenstruktur der Szenariobeschreibung mit Konfiguration des Prototypen sowie Pfaden zu Startszene, Straßen- und Wegenetz und linguistischen Variablen. Abbildung C.2, C.3 und C.4 zeigen die linguistischen Variablen zur Fuzzifizierung, der drei Inferenzstufen und zur Defuzzifizierung sowie die Regelbasen. Abbildung C.5 zeigt die Startszene mit der Definition des Agenten, Abbildung C.6, C.7 und C.8 zeigen die Aktivitäten, die individuellen Fuzzyregeln und die Fortbewegungsmittel des Agenten. Diese Szenariobeschreibung wird auch bei der Evaluation der Performance des Prototypen in Abschnitt 7.2 herangezogen.

```
{
  "seed": 4711,
  "simulationStart": "<2019-02-11T00:00:00[Europe/Berlin],
    2019-04-15T00:00:00[Europe/Berlin],
    2019-06-17T00:00:00[Europe/Berlin],
    2019-08-19T00:00:00[Europe/Berlin],
    2019-10-21T00:00:00[Europe/Berlin],
    2019-12-16T00:00:00[Europe/Berlin]>",
  "simulationDuration": "5D",
  "commitOutwardAndReturnTripTogether": true,
  "planningHorizon": "24H",
  "planningInterval": "24H",
  "planningEnd": "23H",
  "commitUnreliableMobilityOptionsImmediately": true,
  "realTimeSynchronization": false,
  "mobilityServiceProvider": "<fahrkreis,internal>",
  "shapefileData": "relative/path/to/shapefile.shp",
  "linguisticVariablesData": "relative/path/to/linguisticVariables.fcl",
  "startSceneData": "relative/path/to/startScene.json"
}
```

**Abbildung C.1:** Datenstruktur der Szenariobeschreibung der Fallstudie mit einem qualitativen Modell mit Konfiguration des Prototypen sowie Pfaden zu Startszene, Straßen- und Wegenetz und linguistischen Variablen. Die unterschiedlichen Belegungen von Evaluationsparametern sind in spitzen Klammern dargestellt. FCL-Datei und Startszene sind in Abbildung C.2, Abbildung C.3 und Abbildung C.4 beziehungsweise Abbildung C.5, Abbildung C.6, Abbildung C.7 und Abbildung C.8 dargestellt.

```

VAR_INPUT
  student_ticket : INT;
  purpose : INT;
  trip : INT;
  partner : INT;
  walk_duration : REAL;
  bike_distance : REAL;
  lateness : REAL;
  day : INT;
  time_of_day : REAL;
END_VAR

FUZZIFY student_ticket
  TERM not_available := 0;
  TERM available := 1;
END_FUZZIFY

FUZZIFY partner
  TERM excluded := 0;
  TERM included := 1;
END_FUZZIFY

FUZZIFY walk_duration
  TERM short := (0, 1) (10, 0);
  TERM long := (0, 0) (10, 1);
END_FUZZIFY

FUZZIFY lateness
  TERM convenient := (-30, 0) (0, 1) (30, 0);
  TERM inconvenient := (-30, 1) (0, 0) (30, 1);
  TERM too_late := (1, 0) (1, 1);
  TERM too_early := (-1, 1) (-1, 0);
END_FUZZIFY

FUZZIFY time_of_day
  TERM night := Function 5.88-3.78*day/182-(0.68-0.26*day/182)*x;
  TERM night := Function -11.01+0.3*day/182+(0.68-0.19*day/182)*x;
END_FUZZIFY

VAR_OUTPUT
  safety : INT;
  walk : INT;
  bike : INT;
  car : INT;
  public_transport : INT;
  utility : REAL;
END_VAR

FUZZIFY purpose
  TERM work := 0;
  TERM shopping := 1;
  TERM family := 2;
END_FUZZIFY

FUZZIFY trip
  TERM outward := 0;
  TERM return := 1;
END_FUZZIFY

FUZZIFY bike_distance
  TERM short := (0, 1) (3, 0);
  TERM long := (0, 0) (3, 1);
END_FUZZIFY

```

**Abbildung C.2:** Definitionsbereiche der linguistischen Variablen und Fuzzifizierung der Fallstudie mit einem qualitativen Modell. Die Herleitung des linguistischen Terms Nacht der Linguistischen Variable Tageszeit ist in Anhang D beschrieben.

```
DEFUZZIFY safety
  TERM bad := -1;
END_DEFUZZIFY

DEFUZZIFY walk
  TERM rejected := -1;
  TERM accepted := 1;
END_DEFUZZIFY

DEFUZZIFY bike
  TERM rejected := -1;
  TERM accepted := 1;
END_DEFUZZIFY

DEFUZZIFY car
  TERM rejected := -1;
  TERM accepted := 1;
END_DEFUZZIFY

DEFUZZIFY public_transport
  TERM rejected := -1;
  TERM accepted := 1;
END_DEFUZZIFY

DEFUZZIFY utility
  TERM bad := -1;
  TERM good := 1;
  ACCU : SUM;
  METHOD : COGS;
END_DEFUZZIFY
```

**Abbildung C.3:** Linguistische Variablen der drei Inferenzstufen und Defuzzifizierung der Fallstudie mit einem qualitativen Modell.

```
RULEBLOCK latent_variables_rulebase
  AND : MIN;
  OR : MAX;
  ACT : MIN;
END_RULEBLOCK

RULEBLOCK vehicles_rulebase
  AND : MIN;
  OR : MAX;
  ACT : MIN;
END_RULEBLOCK

RULEBLOCK utility_rulebase
  AND : MIN;
  OR : MAX;
  ACT : MIN;
  RULE 1 : IF walk IS rejected THEN utility IS bad;
  RULE 2 : IF walk IS accepted THEN utility IS good;
  RULE 3 : IF bike IS rejected THEN utility IS bad;
  RULE 4 : IF bike IS accepted THEN utility IS good;
  RULE 5 : IF car IS rejected THEN utility IS bad;
  RULE 6 : IF car IS accepted THEN utility IS good;
  RULE 7 : IF public_transport IS rejected THEN utility IS bad;
  RULE 8 : IF public_transport IS accepted THEN utility IS good;
END_RULEBLOCK
```

**Abbildung C.4:** Regelbasen des Fuzzyinferenzsystems der Fallstudie mit einem qualitativen Modell.

```
"startScene": {
  "attributes": {
  },
  "agents": [
    {
      "lat": (anonymized),
      "lon": (anonymized),
      "zone": "Europe/Berlin",
      "attributes": {
        "student_ticket": <true,false>
      },
      "activities": [
      ],
      "fuzzyRules": [
      ],
      "vehicles": [
      ],
      "socialSystems": [
      ]
    }
  ],
  "socialSystems": [
  ]
}
```

**Abbildung C.5:** Datenstruktur der Startszene der Fallstudie mit einem qualitativen Modell. Die genauen Koordinaten des Wohnortes der Teilnehmerin sind anonymisiert, die unterschiedlichen Belegungen von Evaluationsparametern sind in spitzen Klammern dargestellt. Die Aktivitäten, Fuzzyregeln und Fortbewegungsmittel des abgebildeten Agenten sind in Abbildung C.6, Abbildung C.7 und Abbildung C.8 dargestellt.

```

"activities": [
  {
    "lat": (town to the north),
    "lon": (town to the north),
    "zone": "Europe/Berlin",
    "start": "07:30",
    "duration": "5H30M",
    "dayOfWeek": "MONDAY",
    "attributes": {
      "purpose": "work"
      "partner": false
    }
  },
  {
    "lat": (same city),
    "lon": (same city),
    "zone": "Europe/Berlin",
    "start": "17:00",
    "duration": "3H",
    "dayOfWeek": "WEDNESDAY",
    "attributes": {
      "purpose": "family"
      "partner": <true,false>
    }
  },
  {
    "lat": (nearby),
    "lon": (nearby),
    "zone": "Europe/Berlin",
    "start": "<16:00,16:30,17:00,17:30,18:00,18:30,
      19:00,19:30,20:00,20:30,21:00,21:30/22:00>",
    "duration": "15M",
    "dayOfWeek": "FRIDAY",
    "attributes": {
      "purpose": "shopping"
      "partner": false
    }
  }
]

```

**Abbildung C.6:** Aktivitäten der Startszene der Fallstudie mit einem qualitativen Modell. Die genauen Koordinaten der Aktivitäten sind anonymisiert, die unterschiedlichen Belegungen von Evaluationsparametern sind in spitzen Klammern dargestellt.

```

"fuzzyRules": [
  "if time_of_day is night then safety is bad",
  "if walk_duration is short then walk is accepted",
  "if walk_duration is long then walk is rejected",
  "if bike_distance is short then bike is accepted",
  "if bike_distance is long then bike is rejected",
  "if partner is not included and busticket is available
    then public_transport is accepted",
  "if partner is included then car is accepted",
  "if lateness is convenient and purpose is not family or purpose is family
    then public_transport is accepted",
  "if lateness is inconvenient and purpose is not family
    then public_transport is rejected",
  "if purpose is work and trip is outward and lateness is too_late
    then public_transport is rejected with 2147483647",
  "if purpose is work and trip is return and lateness is too_early
    then public_transport is rejected with 2147483647",
  "if safety is bad and purpose is shopping then car is accepted"
]

```

**Abbildung C.7:** Individuelle Fuzzyregeln des Agenten der Fallstudie mit einem qualitativen Modell, gliedert nach erster und zweiter Inferenzstufe.

```

"vehicles": [
  {
    "vehicleType": "walk",
    "restrictionType": "WALK",
    "attributes": {
      "maxSpeed": 5.0
    }
  },
  {
    "vehicleType": "bike",
    "restrictionType": "BIKE",
    "attributes": {
      "maxSpeed": 17.5
    }
  },
  <{
    "vehicleType": "car",
    "restrictionType": "MOTOR",
    "attributes": {
      "maxSpeed": 130.0
    }
  }>
]

```

**Abbildung C.8:** Fortbewegungsmittel des Agenten der Fallstudie mit einem qualitativen Modell. Die unterschiedlichen Belegungen von Evaluationsparametern sind in spitzen Klammern dargestellt.



# Anhang D

## Zugehörigkeitsfunktion Nacht

Dieser Anhang zeigt die Herleitung der Zugehörigkeitsfunktion für den linguistischen Term Nacht für die in Abschnitt 7.1.2 durchgeführte Fallstudie mit einem qualitativen Modell.

In der Region der Teilnehmerin des Interviews beginnt die nautische Morgendämmerung des 21. Juni um 2:37 Uhr und endet mit dem Sonnenaufgang um 5:00 Uhr. Sonnenuntergang ist um 21:57 Uhr mit Ende der Dämmerung um 0:20 Uhr. Für den 21. Dezember beginnt die Morgendämmerung um 7:11 Uhr und endet um 8:39 Uhr, die Abenddämmerung beginnt um 16:11 Uhr und endet um 17:39 Uhr<sup>83</sup>.

Die Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{\text{Nacht am 21. Juni}}$  für den 21. Juni ist demnach wie in Gleichung D.1 zu definieren. Zur Vereinfachung der Funktion wird das Ende der Abenddämmerung um 20 Minuten von 0:20 Uhr auf 0:00 Uhr verschoben. Dies beeinflusst die Evaluation in Abschnitt 7.1.2 nicht, erleichtert jedoch die Erstellung der Zugehörigkeitsfunktion. Weiterhin werden die Uhrzeiten von einem Format mit 60 Minuten pro Stunde in ein Format mit 100 Zeiteinheiten pro Stunde konvertiert, damit als Definitionsbereich der Funktion das Intervall  $[0, 24) = \{x \in \mathbb{R} \mid 0 \leq x < 24\}$  genutzt werden kann.

$$\mu_{\text{Nacht am 21. Juni}}(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq 2,62 \\ 2,1 - 0,42x, & 2,62 < x < 5 \\ 0, & 5 \leq x \leq 21,95 \\ -10,71 + 0,49x, & 21,95 < x < 24 \end{cases} \quad (\text{D.1})$$

Analog ist die Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{\text{Nacht am 21. Dezember}}$  für den 21. Dezember wie in Gleichung D.2 zu definieren.

$$\mu_{\text{Nacht am 21. Dezember}}(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq 7,18 \\ 5,88 - 0,68x, & 7,18 < x < 8,65 \\ 0, & 8,65 \leq x \leq 16,18 \\ -11,01 + 0,68x, & 16,18 < x < 17,65 \end{cases} \quad (\text{D.2})$$

---

<sup>83</sup>Die Informationen zu Sonnenaufgängen, -untergängen und Dämmerungen wurden für das Jahr 2016, das Jahr des Interviews, von <https://www.timeanddate.de> bezogen (letzter Abruf: 27.02.2022).

Kompaktere Darstellungen von Gleichung D.1 und Gleichung D.2 sind in Gleichung D.3 beziehungsweise Gleichung D.4 dargestellt.

$$\mu_{\text{Nacht am 21. Juni}}(x) = \max(\min(2,1 - 0,42x, -10,71 + 0,49x, 1), 0) \quad (\text{D.3})$$

$$\mu_{\text{Nacht am 21. Dezember}}(x) = \max(\min(5,88 - 0,68x, -11,01 + 0,68x, 1), 0) \quad (\text{D.4})$$

Benötigt wird jedoch eine möglichst allgemeine Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{\text{Nacht}}$ , die zusammen mit einer Tageslänge  $d$  aus dem Intervall  $[0, 182] = \{d \in \mathbb{N} \mid 0 \leq d \leq 182\}$  für jeden Tag im Jahr möglichst geeignet ist. Dazu repräsentiert  $d = 0$  den kürzesten Tag und  $d = 182$  den längsten Tag im Jahr, da in einem Gemeinjahr 182 Tage vom kürzesten bis zum längsten Tag vergehen, und anders herum.

Zu diesem Zweck muss  $d$  zusammen mit vier zu identifizierenden Faktoren  $a, b, c, e$  genutzt werden, um die Steigung und den Ordinatenabschnitt der beiden linearen Abschnitte der in Gleichung D.1 und Gleichung D.2 dargestellten Funktionen so zu modifizieren, dass für  $\mu_{\text{Nacht}}(d, x)$  jeweils  $\mu_{\text{Nacht}}(182, x) = \mu_{\text{Nacht am 21. Juni}}(x)$  und  $\mu_{\text{Nacht}}(0, x) = \mu_{\text{Nacht am 21. Dezember}}(x)$  gilt.

Für den Funktionsabschnitt für die Morgendämmerung soll also  $2,1 - 0,42x \stackrel{!}{=} 5,88 - da - (0,68 - db)x$  gelten, für den Funktionsabschnitt für die Abenddämmerung entsprechend  $-10,71 + 0,49x \stackrel{!}{=} -11,01 + dc + (0,68 - de)x$ . Die in Gleichung D.5 definierte Funktion  $f_{\text{Morgen}}$  erfüllt dies näherungsweise für die Morgendämmerung, die in Gleichung D.6 definierte Funktion  $f_{\text{Abend}}$  erfüllt dies näherungsweise für die Abenddämmerung.

$$f_{\text{Morgen}}(d, x) = 5,88 - \frac{3,78d}{182} - \left(0,68 - \frac{0,26d}{182}\right)x \quad (\text{D.5})$$

$$f_{\text{Abend}}(d, x) = -11,01 + \frac{0,3d}{182} + \left(0,68 - \frac{0,19d}{182}\right)x \quad (\text{D.6})$$

Die vollständige Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{\text{Nacht}}$  ist damit wie in Gleichung D.7 dargestellt definiert.

$$\mu_{\text{Nacht}}(d, x) = \max(\min(f_{\text{Morgen}}(d, x), f_{\text{Abend}}(d, x), 1), 0) \quad (\text{D.7})$$

Die Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{\text{Nacht}}$  kann somit als Näherung für die tatsächliche Nacht genutzt werden. Da der Wertebereich einer Zugehörigkeitsfunktion, wie in Abschnitt 2.3.2.1 beschrieben, im Intervall  $[0, 1]$  liegt, genügt bei der technischen Abbildung der Funktion in Fuzzy Control Language die Zuordnung der beiden linearen Funktionsabschnitte zum linguistischen Term Nacht innerhalb der linguistischen Variable Tageszeit. Diese ist in Abbildung D.1 dargestellt und nutzt den durch jfuzzylite ermöglichten syntaktischen Zusatz zur Definition von Funktionen. Dies entspricht der in Abbildung C.2 in Anhang C dargestellten linguistischen Variable.

```
VAR_INPUT
  day : INT;
  time_of_day : REAL;
END_VAR

FUZZIFY time_of_day
  TERM night := Function 5.88-3.78*day/182-(0.68-0.26*day/182)*x;
  TERM night := Function -11.01+0.3*day/182+(0.68-0.19*day/182)*x;
END_FUZZIFY
```

**Abbildung D.1:** Definition der linguistischen Variable Tageszeit mit dem linguistischen Term Nacht.



# Glossar

Dieser Glossar umfasst eine kurze Erklärung all jener Begriffe, die für diese Arbeit von besonderer Bedeutung sind und deren Nutzung sich dementsprechend durch die gesamte Arbeit zieht. Diese und alle übrigen genutzten Begriffe werden darüber hinaus bei der ersten Nennung in der Arbeit kurz erklärt, diese Erklärung kann jederzeit über das Stichwortverzeichnis eingesehen werden.

**Agent** Ein Agent ist eine autonom handlungsfähige Entität, der sich zur Erreichung seiner Aktivitäten auf Grundlage von entscheidungsrelevanten Attributen und Entscheidungsgründen für verfügbare Mobilitätsoptionen entscheiden muss. Diese Entscheidung erfolgt nutzenmaximierend mithilfe eines Fuzzyinferenzsystems.

**Aktivität** Eine Aktivität bildet die Grundlage für die Mobilitätsbedarfe eines Agenten. Eine Aktivität ist zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort durch den Agenten nachzugehen, dazu muss eine Tour mit jeweils einem Trip zur Hinfahrt und einem Trip zur Rückfahrt durch den Agenten durchgeführt werden.

**Anwender** Der Anwender ist einer der vier Stakeholder des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems. Der Anwender erstellt Szenariobeschreibungen für die durchzuführenden Simulationsexperimente und führt diese aus.

**Attribut** Ein entscheidungsrelevantes Attribut ist eine nominal, ordinal oder kardinal messbare Eigenschaft eines Agenten, einer Aktivität, eines Fortbewegungsmittels, einer Mobilitätsoption oder der Umwelt. Entscheidungsrelevante Attribute dienen als scharfe Eingabewerte für die entsprechenden linguistischen Variablen eines Fuzzyinferenzsystems, um den Nutzen einer Mobilitätsoption zu bestimmen.

**Entscheidungsgrund** Ein Entscheidungsgrund beschreibt einen Zusammenhang zwischen entscheidungsrelevanten Attributen und latenten Variablen, zwischen entscheidungsrelevanten Attributen und der Akzeptanz oder Ablehnung von Fortbewegungsmitteln oder zwischen latenten Variablen und der Akzeptanz oder Ablehnung von Fortbewegungsmitteln. Individuelle Entscheidungsgründe sind einzelnen Agenten zugeordnet, während normative Entscheidungsgründe sozialen Systemen aus mehreren Agenten zugeordnet sind. Entscheidungsgründe werden in einem Fuzzyinferenzsystem zur Bestimmung des Nutzens einer Mobilitätsoption durch Fuzzyregeln abgebildet.

**Entscheidungsträger** Der Entscheidungsträger ist einer der vier Stakeholder des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems. Der Entscheidungsträger legt zur Erstellung einer Szenariobeschreibungen den gewünschten Erkenntnisgewinn fest und nimmt die Simulationsergebnisse entgegen.

**Fahrkreis-System** Das Fahrkreis-System ist eine im Rahmen vom NEMO Projekt entwickelte IKT-Plattform für Strecken- und Mobilitätsauskünfte für die Planung täglicher Mobilitätsbedarfe, für die Anbahnung und Abwicklung von Peer-to-Peer Ridesharing-Angeboten zwischen den Nutzern der Plattform sowie für die Stärkung von lokalen Gemeinschaften durch das Zusammenführen von Nutzern mit gleichen Interessen und Mobilitätsbedarfen. Die Nutzung der Dienste des Fahrkreis-Systems erfolgt über die Fahrkreis-App.

**Fortbewegungsmittel** Ein Fortbewegungsmittel beschreibt ein bestimmtes Verkehrsmittel vor dem Hintergrund eines bestimmten Zugangs, um diese Kombination von Verkehrsmittel und Zugang von gleichen Verkehrsmitteln anderen Zugangs oder anderen Verkehrsmitteln gleichen Zugangs eindeutig unterscheiden zu können. Beispielsweise können mit dem Begriff des Fortbewegungsmittels die Nutzung eines Autos als Taxi und die als Carsharing-Fahrzeug unterscheiden werden. Diese Unterscheidbarkeit ist für die Formulierung von Entscheidungsgründen erforderlich.

**Fuzzyinferenzsystem** Ein Fuzzyinferenzsystem dient zur regelbasierten, logischen Inferenz von unscharfem Wissen auf Grundlage von natürlichsprachlich formulierten Fuzzyregeln. Agenten nutzen Fuzzyinferenzsysteme in ihrer Entscheidungsfindung für Mobilitätsoptionen, um den Nutzen dieser zu bestimmen und diese dadurch vergleichbar zu machen. Die Bestimmung des Nutzens erfolgt in drei Stufen durch die optionale Inferenz latenter Variablen, die Inferenz der Bewertung der zu einer Mobilitätsoption gehörigen Fortbewegungsmittel und abschließende Inferenz des Nutzens der Mobilitätsoption.

**Latente Variable** Eine latente Variable beschreibt subjektive, nicht unmittelbar als entscheidungsrelevante Attribute abbildbare Faktoren, die jedoch bei der Entscheidung eines Agenten erforderlich sein können. In einem Fuzzyinferenzsystem können latente Variablen in der ersten Inferenzstufe inferiert werden, um für die anschließende Bewertung der zu einer Mobilitätsoption gehörigen Fortbewegungsmittel durch Agenten herangezogen werden zu können.

**Mobilitätsangebot** Ein Mobilitätsangebot beschreibt eine Dienstleistung des öffentlichen Verkehrs beziehungsweise ein Sharing-Angebot wie beispielsweise Ride-, Bike- oder Carsharing und bildet damit eine Alternative zum Individualverkehr. Mobilitätsangebote können, wie bei einer Taxifahrt, direkt von einem Start- zu einem Zielort verlaufen

oder, wie bei Busfahrten, bei Bedarf verkettet werden. In Abgrenzung zu einer Mobilitätsoption ist ein Mobilitätsangebot ein real existierende oder geplante Dienstleistung, während eine Mobilitätsoption ein Mobilitätsangebot abbildet und um zusätzliche entscheidungsrelevante Attribute angereichert ist.

**Mobilitätsdienstleister** Der Mobilitätsdienstleister ist einer der vier Stakeholder des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems. Der Mobilitätsdienstleister stellt die von den Agenten zu nutzenden Mobilitätsoptionen bereit. Im weiteren Sinne stellt ein Mobilitätsdienstleister darüber hinaus Mobilitätsangebote und Dienstleistungen für die Mobilitätsbedarfe eines Agenten bereit. Dabei kann es sich sowohl um physische Dienstleistungen wie öffentlichen Verkehr oder Bike- und Carsharing als auch um informationelle Dienstleistungen wie Strecken- und Mobilitätsauskünfte oder die Anbahnung und Vermittlung von Ridesharing-Angeboten handeln.

**Mobilitätsoption** Eine Mobilitätsoption beschreibt eine mögliche, einzigartige Handlungsoption, um einen Mobilitätsbedarf eines Agenten zu befriedigen, dies ermöglicht die Unterscheidung beliebiger Handlungsalternativen. Eine Mobilitätsoption ist an genau eine einzigartige Aktivität und an mindestens ein einzigartiges Fortbewegungsmittel gebunden und findet zu einer bestimmten Zeit statt. Somit können auch die mögliche Nutzung unterschiedlicher verfügbarer Autos für den selben Zweck und mit der selben Route und Fahrtzeit oder täglich wiederkehrende Fahrten mit dem selben Fortbewegungsmittel und Zweck sowie der selben Route und Fahrtzeit eindeutig unterschieden und damit vergleichbar gemacht werden.

**Mobilitätssimulationssystem** Das zu entwickelnde Mobilitätssimulationssystem ist die während der Spezifikationsphase, speziell der Anforderungsanalyse und der Konzeptentwicklung, genutzte Bezeichnung für das beabsichtigte System zur Simulation von Akzeptanz und Nutzung von Mobilitätsangeboten.

**NEMo Projekt** NEMo (Nachhaltige Erfüllung von Mobilitätsbedürfnissen im ländlichen Raum) ist ein inter- und transdisziplinäres Forschungsprojekt, das auf sozialer, organisatorischer, ökonomischer und technischer Ebene die nachhaltige und zweckorientierte Lösung von Mobilitäts- und Versorgungsproblemen im ländlichen Raum adressiert. Modellregionen des Projekts sind der Landkreis Wesermarsch und der ländliche Raum um die Stadt Oldenburg. Teil des Projekts ist die Entwicklung des Fahrkreis-Systems.

**Nutzen** Nutzen ist ein abstraktes Maß für die Güte einer Mobilitätsoption. Der Nutzen einer Mobilitätsoption wird auf Grundlage von entscheidungsrelevanten Attributen und Entscheidungsgründen von einem Agenten mit einem Fuzzyinferenzsystem bestimmt.

**Prototyp** Der Prototyp ist das konkrete technische Artefakt, das durch die softwaretechnische Umsetzung der Anforderungen und Konzepte des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystem entsteht. Der Prototyp wird zur Evaluation herangezogen.

**Simulation** Simulation ist die Nachbildung der Funktionsweise eines realweltlichen Systems oder Vorgangs über einen bestimmten Zeitraum hinweg. Diese Nachbildung erfolgt durch die Formulierung und Erstellung eines geeigneten Modells.

**Soziales System** Ein soziales System fasst Agenten mit gemeinsamen normativen Entscheidungsgründen zusammen. In diesem Sinne ist ein soziales System insbesondere ein Hilfsmittel bei der Erstellung einer Szenariobeschreibung, um mehrere Agenten bei Bedarf durch Typenbildung zusammenzufassen.

**Sozialwissenschaftler** Der Sozialwissenschaftler ist einer der vier Stakeholder des zu entwickelnden Mobilitätssimulationssystems. Der Sozialwissenschaftler stellt die für die Erstellung einer Szenariobeschreibung erforderlichen sozialwissenschaftlichen Modelle bereit, welche die Grundlage für das Entscheidungsverhalten der Agenten bildet.

**Szenariobeschreibung** Eine Szenariobeschreibung enthält alle zur Durchführung eines Simulationsexperiments relevanten Daten. Diese sind insbesondere die Startszene zur Beschreibung der abgebildeten Simulationsobjekte und die Parametrisierung zur Beschreibung der Eigenschaften des das Simulationsexperiment ausführenden Prototyps.

**Tour** Eine Tour dient zur logischen Bündelung zusammengehöriger, einzelner Trips. Indem Hin- und Rückfahrten vom Wohnort eines Agenten zu einer Aktivität und zurück gemeinsam betrachtet werden, können erforderliche Abhängigkeiten und zwingende Nebenbedingungen zwischen den Trips berücksichtigt werden.

**Trip** Ein Trip umfasst eine Bewegung von einem Start- zu einem Zielort. Um einen beabsichtigten Trip durchführen zu können, muss ein Agent für diesen eine Mobilitätsoption wählen. Ein Trip vom Wohnort eines Agenten zu einer Aktivität wird als Hinfahrt bezeichnet, ein Trip von der Aktivität zurück zum Wohnort als Rückfahrt.

**Umwelt** Die Umwelt der Agenten beinhaltet die räumliche Umgebung, Datum und Uhrzeit, verfügbare Mobilitätsoptionen sowie mögliche soziale Systeme. Agenten interagieren mit der Umwelt, um ihren Aktivitäten nachgehen zu können.

# Stichwortverzeichnis

## A

A\*-Algorithmus, 150, 192  
Agent, 27, 41, 60, 61, 76, 85, 122, 125,  
132, 141, 145, 156, 194, 199, 200  
Einfacher Reflex-, 31, 100  
Intelligenter, 28, 30  
Lernender, 32, 39, 101  
Modellbasierter Reflex-, 31, 100  
Nutzenmaximierender, 31, 55, 101,  
106, 201  
Rationaler, 27, 55, 105  
Zielorientierter, 31, 100  
Agentenarchitektur, 32, 100, 102, 199  
BDI-, 33, 65, 102  
Logikbasierte, 32  
Reaktive, 32  
Schichtenbasierte, 33  
Agentenfunktion, 27, 28, 30, 97, 125, 160,  
194  
Agentenklasse, 30, 100  
Agentenprogramm, 28, 30, 125, 194  
Aggregationsfunktion, 36, 117, 153, 163,  
170  
Akteur, *siehe auch* Agent, 41  
Aktion, 27, 29, 97, 100, 194  
Aktivierungsfunktion, 38  
Aktivierungsgrad, 35, 113  
Aktivität, 20, 101, 122, 128, 135, 145,  
154, 170, 175, 196  
Aktuator, 29, 98  
ALBATROSS, 61, 69, 71–74  
Anwender, 4, 80, 115, 121, 130, 144, 154,  
194, 205

Anwendungsfall, 80  
Artefakt, 6, 7, 26, 125, 202  
Attribut, 92, 104, 106, 108, 112, 118, 122,  
133, 144, 164, 165, 170, 173, 176,  
186, 190, 195, 197  
Aufgabenumgebung, 28, 78, 79, 98, 126  
Aufwand, 51, 94  
Autonomie, 27, 100, 194

## B

Bayessches Netz, 39, 62, 108  
Behavior Tree, 33  
Belief, 33, 48, 51, 67, 94  
Belief/Desire/Intention-Modell, *siehe*  
*auch* BDI-Agentenarchitektur, 33  
Benutzeroberfläche, 125, 129, 131, 156,  
192, 195, 200  
Beobachtbarkeit, 82, 125, 129, 195  
Bikesharing, 89, 98

## C

C-TAP, 66, 69, 71–74  
Carsharing, 68, 70, 89, 98  
CEMDAP, 62, 70, 73, 74  
Center of Gravity, *siehe*  
Flächenschwerpunktfunktion  
Classification Tree, *siehe*  
Klassifikationsbaum  
Colemans Boot/Badewanne, *siehe*  
Makro-Mikro-Makro-Modell  
Computational Intelligence, 34, 60, 82,  
85, 105, 106, 108, 199  
Computerintelligenz, *siehe*  
Computational Intelligence

Computermodell, *siehe* Rechnerisches Simulationsmodell  
 Computersimulation, *siehe auch* Simulation, 22, 24  
 Computersimulationsmodell, *siehe* Rechnerisches Simulationsmodell  
 CSV, 73, 141, 195

**D**

Decision Tree, *siehe* Entscheidungsbaum  
 Defuzzifizierung, 36, 109, 112, 116, 163, 170, 190  
 DeLone & McLean IS Success Model, *siehe* Technology-to-Performance Chain  
 Determinismus, 23, 29, 72, 79, 103, 107, 126, 196  
 Discrete Choice, 82, 99, 103, 104, 197, 201, 205  
 Discrete-Event Simulation, *siehe* Ereignisorientierte Simulation  
 Disjunktion, 35, 113, 164, 172  
 Disjunktive Normalform, 40, 109  
 Diskretes Entscheidungsproblem, *siehe* Discrete Choice  
 Doppelte Hermeneutik, 204  
 Dualität der Struktur, 43, 94

**E**

Echtzeitsynchronisation, 130, 131, 142  
 Eingabeverbindung, 37  
 Emergenz, 5, 107  
 Ensemblelernen, 41  
 Entitätstyp, 91  
 Entscheidungsbaum, 40, 62, 69, 71, 108  
 Entscheidungsfindung, 78, 79, 82, 85, 194, 196  
 Multikriterielle, 103, 115  
 Entscheidungsgrund, 93, 106, 109, 112, 122, 196, 202  
 Entscheidungstabelle, 62, 69, 72  
 Entscheidungstheorie, 85, 103

Entscheidungsträger, 4, 80, 123, 129, 194, 205  
 Entwurfsmuster  
 Beobachter-, 66, 73  
 Einzelstück-, 142  
 Fabrikmethoden-, 148  
 Enumeration, 145  
 Ereignis, 24, 127, 132  
 Ergebniserwartung, 47, 53, 94  
 Evaluationshypothese, *siehe* Hypothese  
 Evolutionärer Algorithmus, 34, 205  
 Experiment, *siehe auch* Simulationsexperiment, 166, 168  
 Expertensystem, 35, 40

**F**

Fahrkreis, 3, 80, 148, 150, 159, 176, 187  
 Fallstudie, 159–161, 169, 200  
 FCL, 140, 151, 194  
 Flächenschwerpunktfunktion, 36, 115, 190  
 Fortbewegungsmittel, 91, 98, 101, 112, 122, 154, 170, 175, 176, 196, 202, 204  
 Framing, 56, 168  
 Fuzzifizierung, 35, 108, 112, 120, 164, 173, 190  
 Fuzzyinferenz, 35, 85, 108, 162, 196, 199, 201  
 Mamdani-, 35, 109, 115, 190  
 Takagi-Sugeno-, 35, 109, 115, 190  
 Type-1-, 110  
 Type-2-, 110, 205  
 Fuzzyinferenzsystem, 35, 85, 108, 112, 129, 133, 138, 140, 141, 147, 151, 162, 165, 170, 186, 190, 195, 197, 200, 204  
 Fuzzylogik, 34  
 Fuzzymenge, 34  
 Fuzzyregel, 35, 113, 117, 122, 129, 133, 145, 147, 154, 163, 170, 186, 190, 195, 205

**G**

GeoMason, 140, 142, 156  
Gestaltungsentscheidung, 126, 139, 200  
Graph, 132, 144, 192  
    Hyper-, 96, 123, 196  
Gson, 140, 142, 149

**H**

Habitus, 43, 94  
Heuristik, 55, 62, 66, 69, 117, 150, 192  
Hidden Layer, 38, 110  
Homo Oeconomicus, 55, 94  
HOTCO-Modell, 67, 69  
HttpComponents, 148  
Hypothese, 160, 161, 165, 169, 186, 200

**I**

I/S Success-Modell, *siehe*  
    Technology-to-Performance Chain  
Inferenzmodell, 82, 85, 103, 105, 112, 121,  
    162, 197, 199, 201, 205  
Informatik, 5, 6, 201  
    Wirtschafts-, 49, 57  
Information Science, *siehe*  
    Informationswissenschaft  
Information Systems, *siehe*  
    Wirtschaftsinformatik  
Informationssystem, 49  
Informationswissenschaft, 41, 49, 57  
InnoMind, 67, 69, 71, 74

**J**

JavaDBF, 141, 144  
jfuzzylite, 140, 142, 147, 152, 190  
JSON, 140, 150, 194

**K**

Kapital, 42  
    Kulturelles, 42  
    Ökonomisches, 42  
    Soziales, 42, 94  
    Symbolisches, 42  
Klassifikation, 38, 41

Klassifikationsbaum, 40  
Kognitionswissenschaft, 26  
Komponente, 130, 132, 189, 201  
Konditionalregel, 100, 113  
Konjunktion, 35, 113, 164, 172  
Konnektionismus, 37, 109  
Konstrukt, *siehe* Latente Variable  
Konzeptmatrix, 58, 73  
Koordinatenreferenzsystem, 132  
Künstliche Intelligenz, 26, 34, 60, 85  
Künstliches Neuron, 37, 108  
Künstliches neuronales Netz, 37, 67, 71,  
    108

**L**

Latente Variable, 107, 110, 112, 118, 164,  
    172, 190, 196, 205  
Laufzeitumgebung, 130, 141, 142  
Lazy User Theory, 51, 94  
Leistungsbewertung, 29, 97, 160  
Lernen  
    Bestärkendes, 38  
    Überwachtes, 38  
    Unüberwachtes, 38  
Linguistische Variable, 35, 108, 113, 116,  
    123, 133, 144, 147, 150, 151, 156,  
    163, 164, 170, 172, 186, 190, 195,  
    205  
Linguistischer Term, 35, 113, 152, 156,  
    163, 164, 170, 172, 186, 190

**M**

Machine Learning, *siehe* Maschinelles  
    Lernen  
Makro-Mikro-Makro-Modell, 44, 94  
Maschinelles Lernen, 38, 41, 111  
MASON, 140, 156, 193  
MATSim-T, 64, 72–74  
Mensch, Aufgabe, Technik, *siehe auch*  
    Task-Technology Fit, 49  
Mikrosimulation, 76, 160  
Mobilität, 14, 60, 87

- Informationale, 15
  - Räumliche, 15
  - Soziale, 14
  - Mobilitätsangebot, 1, 2, 6, 13, 70, 89, 98, 176, 189, 199
  - Mobilitätsbedarf, 15, 79, 196, 202
  - Mobilitätsbedürfnis, 15, 202
  - Mobilitätsdienstleister, 4, 80, 89, 123, 127, 131, 133, 147, 150, 176, 187, 190, 195, 200, 203
  - Mobilitätsforschung, 12, 201
  - Mobilitätskultur, 16, 92
  - Mobilitätsmanagement, 12
  - Mobilitätsoption, 78, 88, 92, 100, 103, 137, 141, 147, 173, 176, 187, 190, 191, 196, 197, 200–202
  - Mobilitätssimulationssystem, 75–77, 80–83, 85, 125, 160, 194, 199
  - Mobilitätssozialisation, 16, 78, 92
  - Modal Mix, 13, 60
  - Modal Split, 13, 19, 20, 60, 72, 80, 87
  - Modell, *siehe auch* Simulationsmodell, 21
  - Modus, *siehe* Verkehrsmittel
  - Multi-Attribute Decision Making, *siehe*
    - Multikriterielle Entscheidungsfindung
  - Multi-Criteria Decision Analysis, *siehe*
    - Multikriterielle Entscheidungsfindung
  - Multi-Criteria Decision Making, *siehe*
    - Multikriterielle Entscheidungsfindung
  - Multiagentensystem, 30, 61, 76, 98, 128, 194
  - Multiagentenumgebung, *siehe*
    - Multiagentensystem
- N**
- Naturanalogie, 34, 77, 85, 105, 111
  - Natürlichsprachlichkeit, 35, 111, 113, 205
  - Negation, 35, 113
  - NEMo Projekt, 3, 4, 75, 80, 148, 159, 161, 169, 200
  - Numerisches Simulationsmodell, *siehe* Rechnerisches Simulationsmodell
  - Nutzen, 55, 63, 65, 94, 101, 103, 106, 109, 112, 133, 138, 156, 162, 165, 176, 186, 190, 197, 201, 205
  - Nutzenfunktion, 55, 63, 66, 72, 103, 106, 109, 197
- O**
- Objektorientierung, 140
  - Operationalisierung, 107, 110, 112, 164, 172, 196
  - Optimum, 55
    - Pareto-, 55, 104
  - Origin-Destination-Matrix, 19, 87
  - Outcome Expectancy, *siehe*
    - Ergebniserwartung
- P**
- PEAS-Beschreibung, 28, 97, 121, 160
  - Personenbeförderung, *siehe*
    - Personenverkehr
  - Perzept, 27, 29, 97, 100, 133, 136, 194
  - Perzeptron, 38, 109
  - Planskizze, 18, 86
  - Planungsende, 128, 138, 190
  - Planungshorizont, 128, 133, 136, 146, 190
  - Planungsintervall, 128, 133, 137, 176, 189, 190
  - Primärforschung, 2, 86, 97, 160, 169, 199
  - Proaktivität, 28, 100
  - Produktion und Reproduktion, 43, 95
  - Programmierung
    - Agentenorientierte, 28, 145
    - Objektorientierte, 28
  - Prosumer, 13, 79, 90, 128, 148, 191
  - Prototyp, 125, 126, 147, 150, 156, 159, 160, 200, 202, 204
  - Psychologie, 41, 45

**R**

Random Forest, 41  
Rational Choice, *siehe* Rationale  
Entscheidung  
Rationale Entscheidung, 55, 94, 117  
Reaktivität, 28, 100  
Reasoned Action Approach, 48, 52, 53,  
94, 95  
Regelbasis, 35, 72, 109, 112, 153, 163, 170  
Regelgewicht, 36, 118, 119, 163, 164, 171,  
172  
Regeln und Ressourcen, 43, 94  
Regression, 41, 62, 68, 72, 165, 201  
Regression Tree, *siehe* Regressionsbaum  
Regressionsbaum, 40, 109  
Reinforcement Learning, *siehe*  
Bestärkendes Lernen  
Reproduzierbarkeit, 7, 72, 79, 82, 83, 85,  
86, 107, 126  
Ridesharing, 14, 63, 70, 79, 90, 98, 107,  
128, 138, 147, 148, 161, 162, 191,  
196, 200  
Robustheit, 83, 125, 129  
Route, 19, 64–66, 73, 87, 148, 187, 191

**S**

s-Norm, *siehe* t-Conorm  
Satz von Bayes, 39, 40  
Schnittstelle, 81, 130, 148, 187, 190, 194,  
200  
REST-, 148  
Selbstwirksamkeitserwartung, 46, 94  
Self-Efficacy, *siehe*  
Selbstwirksamkeitserwartung  
Sensor, 29, 98  
Shapefile, 140, 144, 150, 156, 192, 194  
SimMobility, 65, 70, 73, 74  
Simulation, 21, 60  
Ereignisorientierte, 24, 64, 66, 73, 140  
Zeitdiskrete, 24, 127, 132, 140, 142

Simulationsexperiment, 4, 7, 71, 121, 130,  
135, 178, 180, 182, 184, 186, 189,  
196, 200, 202  
Simulationsmodell, 22, 23, 78, 79, 85, 86,  
126, 130, 142, 194, 195, 201, 202,  
204  
Gegenständliches, 22  
Mathematisches, 22  
Rechnerisches, 22, 23  
Simulationspipeline, 24, 85, 121, 125, 159  
Simulationsschritt, 127, 132, 134  
Simulationssystem, *siehe auch*  
Mobilitätssimulationssystem, 6, 7  
Singleton, 35, 108, 113, 116, 153, 156, 190  
Situation, 78, 85, 98, 100, 107, 175, 176,  
184, 186, 190, 196, 201  
Social Cognitive Theory, 45, 52, 94  
Software-Bibliothek, 139, 141  
Software-Lebenszyklus, 7, 75, 85, 125,  
159, 199  
Softwaretechnik, 7, 125  
Soziale Norm, 42, 49, 51, 53, 67, 71, 78,  
85, 94, 98, 106, 123, 138, 196,  
201, 202  
Soziales Feld, 43, 94  
Soziales System, 95, 123, 196, 202  
Sozialverhalten, 28, 100  
Sozialwissenschaftler, 4, 80, 116, 194, 205  
Soziologie, 41, 42  
Stakeholder, 4, 75, 76, 80, 121, 199, 205  
Stand der Technik, 58, 61, 69, 74–76, 199,  
202  
Standardfall, 99, 118, 186  
Strategisches Planungsmodell, 18, 86  
Structuration Theory, 43, 94  
Subjektivität, 7, 18, 49, 53, 67, 69, 71, 78,  
85, 92, 107, 113, 120, 186, 196,  
201  
Subsumption-Architektur, 32  
Supervised Learning, *siehe* Überwachtes  
Lernen

Systemarchitektur, 126, 130, 132, 141, 200  
 Szenario, 77, 80, 85, 120, 125, 160, 194,  
 200, 201  
 Szenariobeschreibung, 121, 127–129, 131,  
 136, 140, 142, 150, 160, 170, 190,  
 194, 196, 197, 200, 202, 204  
 Szene, 121, 156  
 Start-, 121, 128, 141, 150, 154, 175

**T**

t-Conorm, 35, 117, 118, 153, 154, 163, 170  
 t-Norm, 35, 118, 153, 154, 172  
 TAPAS, 68, 70, 73, 74  
 TASHA, 63, 70, 73, 74  
 Task-Technology Fit, 50, 53, 94  
 Technology Acceptance Model, *siehe*  
 Unified Theory of Acceptance  
 and Use of Technology 2  
 Technology-to-Performance Chain, 50, 53,  
 94, 95  
 Text Mining, 205  
 Theory of Planned Behavior, *siehe*  
 Reasoned Action Approach  
 Theory of Reasoned Action, *siehe*  
 Reasoned Action Approach  
 Tour, 20, 63, 99, 101, 132, 136, 147, 176,  
 202  
 Tourbasiertes Verkehrsmodell, *siehe*  
 Aktivitätsbasiertes  
 Verkehrsmodell  
 Tourenplan, 133, 136, 147  
 Trip, 19, 63, 98, 99, 101, 132, 133, 135,  
 136, 147, 171, 176, 196, 202  
 Turing-Test, 27

**U**

Umwelt, 29, 97, 100, 141, 143  
 Physische, 97, 122, 129, 143, 148, 156  
 Soziale, 98, 123, 143

Unified Theory of Acceptance and Use of  
 Technology 2, 52, 94  
 Unsupervised Learning, *siehe*  
 Unüberwachtes Lernen  
 Unvollkommener Markt, 56  
 Utility, *siehe* Nutzen

**V**

Verhaltensökonomie, 55, 62, 69, 94, 117  
 Verifikation und Validierung, 26, 159  
 Verkehr, 11, 60, 87  
 Individual-, 13, 68, 79, 89, 98, 101,  
 123, 138, 148, 176, 187, 191, 196  
 Intermodaler, 13, 79, 89, 114, 148,  
 170, 176, 191, 196  
 Öffentlicher, 13, 68, 79, 89, 98, 101,  
 135, 138, 147, 148, 171, 176, 187,  
 191, 196, 202  
 Personen-, 12, 88, 202  
 Verkehrskette, *siehe* Intermodaler Verkehr  
 Verkehrsmittel, 12, 89, 91, 196  
 Verkehrsmodell, 18  
 Aktivitätsbasiertes, 20, 60, 61, 77, 86,  
 136, 194, 196, 199, 201, 202  
 Tripbasiertes, 19, 60, 77, 87  
 Verkehrsplanung, 11  
 Verkehrswissenschaften, 11  
 Vier-Schritte-Verkehrsmodell, *siehe*  
 Tripbasiertes Verkehrsmodell  
 Vincentyformel, 150

**W**

Wirtschaftswissenschaft, 41, 54

**Z**

Zugehörigkeitsfunktion, 34, 113, 120, 152,  
 156, 165, 173  
 Zustand, 22, 121, 122, 129, 131, 133, 135,  
 142, 145  
 Zustandsautomat, 135, 139