



Strategische Analyse der Elektromobilität in der Metropolregion Bremen/Oldenburg

Multi-Agenten basierte Simulation alternativer Antriebssysteme

Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften

Vorgelegt von: Dipl.-Wirt.-Inf. Tim Hoerstedbrock

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Axel Hahn
Jun.-Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff

Datum der Disputation: 24. November 2014

Für meine Familie

Danksagung

Mein erster Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Axel Hahn, der mich stets mit seinen Anregungen und seinen konstruktiven Vorschlägen vor und während der Erstellung dieser Dissertation unterstützt hat. Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Jun.-Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff für die Begutachtung dieser Arbeit.

Ebenso geht mein Dank an das OFFIS – Institut für Informatik für die Schaffung des wissenschaftlichen Umfelds, in dem diese Arbeit entstanden ist. Meinen Kollegen danke ich für die vielen themenrelevanten und -irrelevanten Diskussionen und die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre. Besonderer Dank gilt Dr. Stefan Häusler, Rainer Droste und Dr. Cilli Sobiech für die inhaltliche und emotionale Unterstützung.

Den mit Abstand wichtigsten Beitrag hat meine Familie mit ihrer Unterstützung während der Anfertigung dieser Dissertation geleistet. Meiner Frau Janka danke ich für die scheinbar unerschöpfliche Geduld und den fortwährenden Zuspruch. Meinen Söhnen Piet und Oke danke ich dafür, dass sie mir durch ihre Unbekümmertheit und Freude immer wieder positive Impulse gegeben haben. Ohne Ihre liebevolle Fürsorge wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Zusammenfassung

Die Elektromobilität stellt eine Maßnahme dar, die hohen Emissionen aus dem Verkehrssektor zu senken und die Unabhängigkeit vom Erdöl zu steigern. Allerdings geht die Einführung des alternativen Antriebssystems bisher nur stockend voran. Zu hoch sind aktuell die ökonomischen, technischen und regulatorischen Herausforderungen, die sich Nutzer, Infrastrukturanbieter, Energieversorger und Politik gegenüber stehen. Außerdem sind Entscheidungen bezüglich eines Technologietransfers nur in Abhängigkeit der jeweilig anderen Interessensgruppe zu treffen. Diese Unsicherheiten münden häufig in einer Pattsituation, in der keiner der Beteiligten den Vorstoß hin zur neuen Technologie wagt.

Um diese oder ähnliche Konstellationen in der Metropolregion Bremen/Oldenburg zu durchbrechen, ist es das Ziel der Arbeit, eine werkzeuggestützte Methodik zu konzipieren, die die Bewertung der neuen Technologie ermöglicht. Ihre Anwendung ermöglicht es, Aussagen über den Ausbringungszeitpunkt und die Ausbringungsmenge von Elektrofahrzeugen sowie die Positionierung und Ausstattung der Ladeinfrastruktur zu treffen. Dabei werden die Mobilitätsmuster der Nutzer, die Region, in der sie agieren, und die technischen Eigenschaften der Fahrzeug und der Ladeinfrastruktur berücksichtigt. Drei Beiträge bilden den Schwerpunkt der Arbeit:

1. Ein Planungsmodell, das die unterschiedlichen Einflussfaktoren des Systems geeignet abbildet,
2. ein Datenpool, der die konkreten Mobilitätsmuster der Nutzer in der Metropolregion Bremen/Oldenburg und das Verbrauchsverhalten der Fahrzeuge bereitstellt sowie
3. ein multi-agenten basiertes Simulationswerkzeug, das die Fahrten der Fahrzeuge (inkl. deren Verbräuche), die Kommunikation der Fahrzeuge mit der Ladeinfrastruktur sowie die Beladungsvorgänge an den Zielorten simuliert und die Bewertungskennzahlen der spezifischen Interessensgruppen berechnet.

Sie werden anhand der konkreten Bewertung der Elektromobilität in der Modellregion Bremen/Oldenburg evaluiert. Dabei wird für den beruflichen Pendlerverkehr und für gewerbliche Flotten die Machbarkeit des Technologietransfers ermittelt und ein aus Nutzergruppensicht erforderliches Ladeinfrastrukturlayout entwickelt. Öffentlich zugängliche Datenquellen dienen zur Kalibrierung und Validierung der Simulation. Darüber hinaus wird die Anbindung an eine Energienetzsimulation dargestellt, wodurch der Einfluss der Elektrofahrzeuge auf die Stabilisierung des Energienetzes analysiert sowie deren Möglichkeit der Integration von erneuerbaren Energien aufgezeigt wird.

Abstract

Electric vehicles promise to reduce the emissions within the transportation sector and the dependence on fossil fuels like crude oil. However, many economical, technical and regulatory obstacles block the transfer process towards the environmental friendly technology. Stakeholders who are involved in this process are confronted with strategic decisions that cannot be made without the knowledge of the decisions of the other stakeholders. This situation often leads to stalemates in which neither stakeholder makes the step towards the new technology.

In order to break up this stalemate in the metropolitan area Bremen/Oldenburg, this dissertation pursues the objective to develop a methodology that is able to assess the system of electromobility from users' perspectives. With the application of this methodology, possible exchange rates of conventional vehicles and the required charging infrastructure – in order to support the users of these vehicles – can be determined. The methodology incorporates the mobility patterns of the users, the region in which they operate and the technical properties of the electric vehicles and the charging infrastructure. This dissertation provides the following contributions:

1. A planning model that incorporates the above mentioned factors that influence the possibility to switch to the new technology,
2. an instantiation of this model and its application within the metropolitan area Bremen/Oldenburg and
3. a multi agent based simulation framework that simulate the trips of the vehicles, the communication processes of these vehicles with the charging infrastructure and the charging processes.

Two scenarios evaluate these contributions. Each scenario concentrates on a specific user group: commuter and commercial fleet operators. The feasibility of these user groups to switch to electric vehicles will be assessed and the required charging infrastructure will be determined. Additionally, the simulation tool will be coupled with a smart grid simulation framework in order to show the effect of the electric vehicles on the distribution grid and to show the extensibility of the developed framework.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iii
Abstract	ix
Abbildungsverzeichnis.....	xiii
Tabellenverzeichnis	xvii
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Anforderungen.....	5
1.3.1 Nutzermobilität	5
1.3.2 Regionaler Kontext	6
1.3.3 Fahrzeug.....	7
1.3.4 Ladeinfrastruktur.....	7
1.3.5 Sonstige.....	8
1.4 Beitrag der Arbeit.....	9
1.5 Aufbau der Arbeit.....	10
2 Ansätze zur Analyse des Systems Elektromobilität	13
2.1 Studien und Werkzeuge zur Entscheidungsunterstützung.....	13
2.2 <i>Location</i> Modelle	16
2.2.1 Klassische <i>Location-Allocation</i> Modelle zur Bestimmung von Betankungsinfrastruktur.....	17
2.2.2 <i>Flow-Based Location</i> Modelle zur Bestimmung der Betankungsinfrastruktur.....	20
2.3 Simulationsansätze	23
2.3.1 Eindhoven Simulation.....	23
2.3.2 Ohio Simulation	25
2.3.3 Simulation of Urban Mobility (SUMO).....	28
2.3.4 Agent-Based Transport Simulations (MATSim)	29
2.4 Zusammenfassung und Diskussion	31
3 Modellierung und Simulation von Nutzermobilität.....	35
3.1 Generelle Modellierungsarten	35
3.2 Populationssynthese	38
3.3 Aktivitätsgenerierung	40
3.3.1 Privatverkehr.....	40
3.3.2 Wirtschaftsverkehr	47
3.4 Verkehrssimulation	50

3.4.1	Mikroskopische Simulationen	50
3.4.2	Mesoskopische Simulationen	53
3.5	Zusammenfassung und Diskussion.....	56
4	Multi-agenten basierte Bewertung alternativer Antriebssysteme (Mambaa).....	61
4.1	Konzeption.....	61
4.1.1	Planungsmodell	65
4.1.2	Simulation.....	85
4.2	Implementierung	104
4.2.1	Modellebene	105
4.2.2	Simulationsebene.....	106
4.2.3	E-Mob Simulation	107
4.3	Zusammenfassung und Diskussion.....	110
5	Evaluation.....	113
5.1	Gemeinsame Modellkomponenten	115
5.1.1	Regionsmodell	115
5.1.2	Mobilitätmodell	119
5.1.3	E-Mob Modell	130
5.2	Fallbeispiel Privatnutzung	132
5.2.1	Szenariobeschreibung.....	134
5.2.2	Bewertung.....	136
5.3	Fallbeispiel gewerbliche Flottenanwendung.....	140
5.3.1	Szenariobeschreibung.....	143
5.3.2	Analyse	145
5.4	Evaluationsbewertung.....	149
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	155
6.1	Zusammenfassung.....	155
6.2	Ausblick.....	156
7	Literaturverzeichnis	159

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Beitrag der Arbeit	9
Abbildung 2	Aufbau der Arbeit.....	10
Abbildung 3	Vorgehen nach Kley (2011)	15
Abbildung 4	Klassifizierung von Location-Allocation-Modellen.....	17
Abbildung 5	Kannibalisierungseffekt der punkt-basierten Nachfrage	19
Abbildung 6	Ermittlung der durchschnittlichen Anzahl an Elektrofahrzeugen pro Zelle [Kanters (2013)].....	24
Abbildung 7	Vorgehen der Infrastrukturplatzierung nach Kanters (2013).....	25
Abbildung 8	Simulative Abbildung von Lade- und Standzeiten [Xi et al. (2013), S. 3].....	27
Abbildung 9	Zusammenspiel zwischen Fahrzeug-, Verkehrs- und Energienetzsimulator (komprimierte Darstellung) [Galus et al. (2012b)]	30
Abbildung 10	Klassisches Verkehrsmodell (4-Stufen-Modell).....	37
Abbildung 11	Allgemeines Vorgehen von meso- und mikroskopischen Verkehrssimulationen.....	38
Abbildung 12	Populationssynthese	39
Abbildung 13	Allgemeines Vorgehen zur Aktivitätsgenerierung	41
Abbildung 14	Aktivitätsgenerierung nach Bowman (1998).....	43
Abbildung 15	Aktivitätsgenerierung RAMBLAS [Veldhuisen et al. (2000)].....	44
Abbildung 16	Aktivitätsgenerierungsprozess ALBATROSS [Arentze und Timmermans (2004)].....	46
Abbildung 17	Modelle zur Abbildung des Wirtschaftsverkehrs [Holguín-Veras et al. (2001), S. 13–14]	48
Abbildung 18	Detailebenen von Verkehrssimulationen.....	51
Abbildung 19	Raumdarstellung von mikroskopischen Simulationsmodellen.....	52
Abbildung 20	Prozessstruktur von MATSim [in Anlehnung an Balmer et al. (2009), S. 61].....	54
Abbildung 21	Prozess- und Modellebene.....	62

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 22	Abstraktionsschichten	63
Abbildung 23	Entwurf des Mobilitätsmodells	66
Abbildung 24	Aufbau einer Aktivitätskette	66
Abbildung 25	Klassendiagramm der MobilityCluster-Komponente	68
Abbildung 26	Prozess der Aktivitätsgenerierung.....	70
Abbildung 27	Berechnung der Übergangintensitäten (fiktive Werte).....	71
Abbildung 28	Aktivitätsdiagramm der Aktivitätskatalogerstellung [Machledt-Michael (2000)].....	72
Abbildung 29	Klassendiagramm Region-Komponente	73
Abbildung 30	Klassendiagramm Haushalt-Komponente.....	75
Abbildung 31	Fahrtkettengenerierung	76
Abbildung 32	Verortungsprozess.....	77
Abbildung 33	Sonderfallbehandlung bei der Verortung der letzten Fahrt.....	78
Abbildung 34	Technisches Modell: LoadOwner	79
Abbildung 35	Technisches Modell: LoadManager.....	80
Abbildung 36	Technisches Modell: Reservierungen	81
Abbildung 37	Technisches Modell: Vehicle	82
Abbildung 38	Klassendiagramm des E-Mob Modells	83
Abbildung 39	Ablaufbeispiel von JASON.....	87
Abbildung 40	Simulations-Klasse in JASON (Klassendiagramm).....	89
Abbildung 41	Agent-Klasse in JASON (Klassendiagramm)	90
Abbildung 42	MessageSystem-Klasse in JASON (Klassendiagramm)	91
Abbildung 43	Nachrichtenfluss in JASON (Sequenzdiagramm).....	92
Abbildung 44	Kommunikationsprotokolle in JASON [Dale (2002); Odell (2002)].....	93
Abbildung 45	Aufbau der Verkehrssimulation (TrafficSimulation)	94
Abbildung 46	VehicleAgent-Klasse der Verkehrssimulation (TrafficSimulation)	95
Abbildung 47	Zustandsdiagramm des TimeTableBehaviours	96

Abbildung 48	Zustandsdiagramm des DrivingBehaviours.....	97
Abbildung 49	InfrastructureAgent-Klasse der Verkehrssimulation (TrafficSimulation).....	98
Abbildung 50	Loading Contract Net Service	99
Abbildung 51	Erweiterung der Verkehrssimulation durch die E-Mob Simulation (1).....	100
Abbildung 52	Erweiterung der Verkehrssimulation durch die E-Mob Simulation (2).....	101
Abbildung 53	Zustandsdiagramm CarTimeTableBehaviour.....	103
Abbildung 54	Sequenzdiagramm ChargingService (Ausschnitt).....	104
Abbildung 55	step-Methode des Schedulers	107
Abbildung 56	Klasse ScenarioBuilder.....	108
Abbildung 57	Klasse EMobSimulationWrapper	109
Abbildung 58	Kalibrierung des Regionsmodells.....	115
Abbildung 59	Zweistufiges <i>Iterative Fitting Procedure</i> für die Bestimmung der Unternehmensanzahl	118
Abbildung 60	Import der MiD2008-Daten.....	121
Abbildung 61	Boxplot der absoluten Distanzunterschiede.....	130
Abbildung 62	Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Ausgangsleistung.....	131
Abbildung 63	Auslastung der Ladestationen am Standort Sebaldsbrück.....	137
Abbildung 64	Ausfallquoten am Standort Sebaldsbrück.....	137
Abbildung 65	Ausfallquoten je Nutzergruppe bei Ladestationen mit 22,2 kW Leistung	138
Abbildung 66	Vorgehen der Untersuchung zum gewerblichen Flotteneinsatz	142
Abbildung 67	Gesteuerter Lademechanismus	144
Abbildung 68	Ausfallquoten im Sommer und im Winter	146
Abbildung 69	Erhöhte Verspätungen der Elektrofahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen (in %) getrennt nach Sommer und Winter und getrennt nach Wirtschaftszweigen.....	147

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 70	Ausfälle und mittlere Verspätungen mit und ohne Ladesteuerungsmechanismus	148
Abbildung 71	Effekt des kontrollierten und unkontrollierten Ladens	149

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vor- und Nachteile von Elektrofahrzeugen [NOW (2011c), S. 26].....	3
Tabelle 2:	Abdeckungsbereiche der Methoden zur Bewertung von Elektromobilität	33
Tabelle 3	Anforderungsabdeckung der Simulationsframeworks MATSim und SUMO.....	59
Tabelle 4:	Vor- und Nachteile der Verkehrssimulation SUMO zur Bewertung von Elektromobilität	59
Tabelle 5:	Vor- und Nachteile der Verkehrssimulation MATSim zur Bewertung von Elektromobilität	59
Tabelle 6:	Häufigkeitsverteilungen des Mobilitätsclusters.....	69
Tabelle 7:	Scenario-Properties.....	108
Tabelle 8:	EMobSimulationWrapper-Properties	109
Tabelle 9:	Bewertete Anforderungen der Szenarien.....	114
Tabelle 10:	Datenquellen der Haushaltsmengengerüste	117
Tabelle 11:	Merkmalsausprägungen der genutzten Datenquellen.....	117
Tabelle 12:	Strukturparameter der Zonen.....	119
Tabelle 13:	Genutzte Attribute des MiD2008 Datensatzes	120
Tabelle 14:	Gewerbliche Nutzergruppen und Anzahl an Datensätzen in der KiD2010-Studie.....	122
Tabelle 15:	Anzahl an Datensätzen (Aktive erwerbstätige Personen / Alter 18 – 64 / Normaler Tag / PKW-Fahrten).....	123
Tabelle 16:	Testergebnis Distanz Zuhause – Arbeit (nur erwerbstätige Personen von 18 – 64 Jahren).....	125
Tabelle 17:	Testergebnis Distanz Sonstige (nur erwerbstätige Personen von 18 – 64 Jahren)	126
Tabelle 18:	Testergebnis Standdauer Arbeit (nur erwerbstätige Personen von 18 – 64 Jahren / Mo – Fr)	127

Tabellenverzeichnis

Tabelle 19:	Vergleich der wochentagsspezifischen Arbeitsstanddauern der Gruppe 2.....	127
Tabelle 20:	Testergebnis Dauern Sonstige (nur erwerbstätige Personen von 18 – 64 Jahren).....	128
Tabelle 21:	Vergleich der wochentagsspezifischen Dauern des Fahrtgrunds Sonstige der Gruppe 6.....	128
Tabelle 22:	Testergebnis Fahrtketten (nur erwerbstätige Personen von 18 – 64 Jahren).....	129
Tabelle 23:	Testergebnis Abfahrtszeiten (nur erwerbstätige Personen von 18 – 64 Jahren).....	129
Tabelle 24:	Fahrzeugmodellierung	131
Tabelle 25:	Ladestationsmodellierung	132
Tabelle 26:	Bewertungskennzahlen	132
Tabelle 27:	Anzahl an Fahrzeugen, die nach Bremen pendeln (getrennt nach Nutzergruppen)	135
Tabelle 28:	Parameter der Simulation und der Sensitivitätsanalyse	136
Tabelle 29:	Einfluss der Verkehrsbelastung auf den Verbrauch und die Auswertung	139
Tabelle 30:	Einfluss des Verbrauchs auf die Auswertung	140
Tabelle 31:	Anzahl an Unternehmen.....	143
Tabelle 32:	Anzahl an Fahrzeuge.....	143
Tabelle 33:	Parameter der Mobilitätsbewertung	144

1 Einleitung

Die räumliche Mobilität ist eines der Grundbedürfnisse in unserer heutigen Gesellschaft. Sie dient zur persönlichen Entfaltung und ist elementar für den wirtschaftlichen Fortschritt. Der fortwährende Mobilitätsbedarf und der dadurch realisierte Verkehr verursachen jedoch zunehmend ökologische Probleme. Heutzutage ist Erdöl die primäre Energiequelle für den Verkehrssektor – besonders beim Individualverkehr. Dieser verursacht in Deutschland 20 % der CO₂-Emissionen und konsumiert über 50 % des importierten Erdöls [NOW (2011a), S. 8]. Der Personenkraftwagen stellt somit einen großen Hebel dar, CO₂-Emissionen zu reduzieren. Heutige Verbrennungsmotoren weisen zwar noch erhebliches Potenzial der Verbrauchsverminderungen und der Emissionseinsparungen auf [Wallentowitz und Freialdenhoven (2011), S. 58], können aber weder die Abhängigkeit vom Rohöl und dessen Preisunsicherheiten lösen noch eine absolute Emissionsfreiheit garantieren. Vielmehr sind innovative Fahrzeugkonzepte erforderlich, die umweltfreundlichere und nachhaltigere Mobilität ermöglichen. Vor allem die Elektrifizierung des Antriebsstranges ist dabei in den letzten Jahren in den Fokus der Politik und Forschung gelangt. Die Bundesregierung hat Elektromobilität als wichtige Technologie hin zu einem effizienteren und nachhaltigeren Verkehr identifiziert und ihre strategische Ausrichtung 2009 in dem nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität festgeschrieben. Demnach soll Deutschland zum Leitanbieter und Leitmarkt für Elektromobilität werden und bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen fahren [Deutsche Bundesregierung (2009)]. An diesem Ziel hält auch die 2013 neu gewählte Bundesregierung in ihrem Koalitionsvertrag fest [Deutsche Bundesregierung (2013), S. 32].

1.1 Problemstellung

Den technischen und ökologischen Vorteilen von Elektrofahrzeugen (hoher Wirkungsgrad, keine lokal emittierten Schadstoffe) stehen Herausforderungen entgegen, die momentan ein großes Hemmnis bei der Ausbringung der Fahrzeuge darstellen. Diese spiegeln sich hauptsächlich in der geringen Energiedichte und den hohen Kosten der Batterien sowie der langen Ladedauer wider. Die über die Jahre entwickelten Mobilitätsgewohnheiten der Nutzer lassen sich – aufgrund der geringeren Reichweite – nicht ohne Weiteres mit der neuen Technologie realisieren [Electrification Coalition (2009), S. 89; Kley (2011), S. 6]. Insgesamt muss die Mobilität stärker geplant und das Ladeverhalten an die technischen Gegebenheiten der Elektrofahrzeuge angepasst werden [Electrification Coalition (2009), S. 72]. Tabelle 3 fasst die Vor- und Nachteile der Elektrofahrzeuge zusammen. Damit der Technologiewechsel stattfinden kann, sind laut Rogers (2003) fünf Faktoren von entscheidender Bedeutung:

1. Der relative Vorteil der neuen Technologie,

2. die Kompatibilität mit bisherigen Werten,
3. die Einfachheit der Nutzung,
4. die Möglichkeit der Erprobung und
5. die Sichtbarkeit der Resultate.

Für die Elektromobilität scheinen diese Faktoren für die Nutzer noch nicht gegeben bzw. ersichtlich zu sein.¹ Um voll elektrische Autos in die tägliche Nutzung zu bringen, müssen – insbesondere für die Faktoren 1 bis 3 – der Ladevorgang in die Mobilität möglichst nahtlos integriert werden, damit der Ladezustand der Batterie so hoch wie möglich gehalten wird. Der Ladevorgang entwickelt sich daher zu einem alltagsbegleitenden Prozess, der immer dort stattfindet, wo das Fahrzeug steht. Die Aufgabe von öffentlichen und privaten Einrichtungen besteht folglich darin, Ladeinfrastruktur bereitzustellen, um die Fahrzeuge ausreichend mit Energie zu versorgen. Durch die fehlende wirtschaftliche Darstellbarkeit, insb. von öffentlichen Ladestationen, werden diese vornehmlich an umsatzstarken Standorten platziert. Eine Verteilung nach distributiven Gesichtspunkten zur Deckung der Nutzerbedürfnisse findet weitestgehend nicht statt [NOW (2011b), S. 34]. Die ganzheitliche Gestaltung der Ladeinfrastruktur stellt sich jedoch aufgrund der zahlreichen Interessensgruppen und der zahlreichen Entwicklungsmöglichkeiten der Technologie als komplex heraus. Es ist damit zu rechnen, dass die Reichweite der Fahrzeuge in Zukunft steigt, die Nachfrage nach öffentlicher Ladeinfrastruktur somit stinkt und als Folge mit einer weiteren Verringerung der Rentabilität von öffentlicher Ladeinfrastruktur zu rechnen ist [ISI (2012), S. 22]. Darüber hinaus sind psychologische Aspekte bei der Bewertung von Ladeinfrastruktur zu berücksichtigen [Botsford und Szczepanek (2009), S. 7; Wiederer und Philip (2010), S. 31]. Die Forderung von öffentlicher Ladeinfrastruktur seitens des Nutzers ist zum großen Teil wegen der Reichweitenangst und weniger durch die operative Notwendigkeit begründet. Daher ist bei der Ausbringung der Ladeinfrastruktur das tatsächliche Mobilitätsverhalten der Nutzer zu berücksichtigen, um Standorte zu identifizieren, an denen ein wirklicher Bedarf besteht und die zusätzlich sichtbar genug sind, um der Reichweitenangst der Nutzer entgegenzuwirken.

Zusammenfassend führen die dargestellte fehlende Bereitschaft für einen Technologiewechsel auf Nutzerseite und die fehlende bzw. nicht-bedarfsorientierte Ladeinfrastruktur zu einer Pattsituation zwischen Nutzer und Ladeinfrastrukturbetreiber. Ohne (halb-)öffentliche Ladeinfrastruktur findet kein Technologiewechsel statt; ohne Technologiewechsel ist eine sich wirtschaftlich selbst tragende Ladeinfrastruktur nicht darstellbar [Arnold et al. (2010), S. 14; ACATECH (2010), S. 24–25; Hoberg et al. (2010), S.

¹ Anfang 2013 waren 7.114 rein elektrische Fahrzeuge in Deutschland zugelassen [KBA (2013)]. Das entspricht einem Anteil von 0,016 % aller zugelassenen PKW.

Tabelle 1: Vor- und Nachteile von Elektrofahrzeugen [NOW (2011c), S. 26]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Umweltfreundlichkeit • Lokal emissionsfrei • Einsparung fossiler Energieträger • Niedrige Betriebskosten • Höhere Energieeffizienz • Geräuscharmes Fahren • Hoher Fahrkomfort, Fahrspaß • Förderung des technologischen Fortschritts 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Reichweite • Lange Ladedauer • Einschränkungen in der Mobilität (Mehr Planung erforderlich) • Wenige Lademöglichkeiten • Hohe Batteriekosten; geringe Lebensdauer • Hohe Anschaffungskosten • Geringeres Raumangebot • Weniger Komfort / Ausstattung

65]. In dieser Situation stehen sich die beteiligten Interessensgruppen zum großen Teil strategischen Entscheidungen gegenüber, ob und in welchem Umfang auf die neue Technologie gewechselt werden sollte und welche Maßnahmen bei diesem Wechsel zu treffen sind. Die Abschätzung der Nutzernachfrage stellt die Entscheidungsgrundlage dar und ist abhängig vom Mobilitätsverhalten der einzelnen Nutzer und deren Möglichkeit, das Elektrofahrzeug verwenden zu können. Aus Sicht der Interessensgruppen ergibt sich demnach folgende Frage:

Welche Nutzer(gruppen) können Elektrofahrzeuge unter Berücksichtigung ihrer räumlichen Mobilitätsmuster, den technischen Eigenschaften der Elektrofahrzeuge und der vorhandenen Ladeinfrastruktur verwenden?

Diese Arbeit adressiert die Herausforderung, diese Fragestellung aus Sicht der beteiligten Interessensgruppen beantworten zu können und somit die tatsächliche Energienachfrage sowie die tatsächlichen Anforderungen des Nutzers an das Elektrofahrzeug abschätzen zu können. Das entwickelte Bewertungswerkzeug *Mambaa* unterstützt diese Gruppen bei der Analyse des Systems aus Nutzern sowie den technischen Eigenschaften der Elektrofahrzeuge und der Ladestationen, um so Wege aus der oben beschriebenen Pattsituation finden zu können.

1.2 Zielsetzung

Aus der oben dargestellten Problemstellung lässt sich das Ziel dieser Arbeit wie folgt zusammenfassen:

Die Entwicklung und Evaluation einer modellgestützten Methodik zur regional aufgelösten Bewertung der nutzergruppenspezifischen Adoptionsfähigkeit von Elektrofahrzeugen sowie der Ladeinfrastruktur.

Die angestrebte Bewertungsmethodik soll den Interessensgruppen ermöglichen, Transferszenarien vom konventionellen Fahrzeug zum Elektrofahrzeug bewerten und aufbau-

ende auf den Ergebnissen ihre eigenen strategischen Entscheidungen ausrichten zu können. Aus der Problemstellung ergeben sich folgende Unterziele, die durch die Bewertungsmethodik erfüllt werden sollen.

Z 1 – Räumlich und zeitlich differenzierte Betrachtung Nur wenn die Energienachfrage räumlich und zeitlich ermittelt wird, können die richtigen Erkenntnisse für die effiziente Ausbringung der Ladeinfrastruktur gewonnen werden [Schenk et al. (2010), S. 54]. Durchschnittswerte vernachlässigen Ausschläge der individuellen Nutzermobilität (z. B. Spitzenverkehrszeiten) und führen zu falschen Annahmen über die tatsächliche Nachfrage an Ladeleistung [Kley (2011), S. 49]. Auch nachgelagerte Energienetzbewertungen wären ohne eine räumlich und zeitlich differenzierte Betrachtung nicht möglich.

Z 2 – Integration von privaten Haushalten und Unternehmen Die Untersuchungen im Bereich der Elektromobilität und der Verkehrsforschung beschränken sich vornehmlich auf Privatanutzer [Arnold et al. (2010), S. 62], obwohl Flotten ein erhebliches Potenzial für den Wechsel auf Elektrofahrzeuge bieten [Peters und Dütschke (2010), S. 20; Hoberg et al. (2010), S. 20]. Das Bewertungstool soll daher sowohl die Mobilitätsmuster von privaten als auch von gewerblichen Nutzern abbilden können.

Z 3 – Ladeinfrastrukturbewertung Die Untersuchungen der Modellregionen Elektromobilität haben gezeigt, dass eine verstärkte distributive Gestaltung der Ladeinfrastruktur erforderlich ist [NOW (2011b), S. 36; Arnold et al. (2010), S. 49; Electrification Coalition (2009), S. 73]. Auf die Kommunen kommt dadurch eine besondere Aufgabe zu [ISI (2012), S. 27]. Das Bewertungswerkzeug soll demnach den Effekt einer räumlichen Ausbringung der Ladeinfrastruktur auf die Adoptionsmöglichkeit der Nutzer und der Energienachfrage bewerten können.

Z 4 – Berücksichtigung von Technologieeffekten Die Technologie (insb. die Batterietechnologie) verspricht noch erhebliche Verbesserungen, was die Reichweite und die Ladezeit der Fahrzeuge betrifft. Es besteht jedoch Uneinigkeit darüber, wann diese eintreten [Institut für Mobilitätsforschung (2010); Thielmann et al. (2012)]. Der Effekt der Technologieverbesserung auf die Adoptionsmöglichkeit der Nutzer, die Energienachfrage und die notwendige Ladeinfrastruktur ist demnach in Form von Szenarien zu berücksichtigen, um langfristige Entscheidungen effizient treffen zu können. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die Fahrzeuge immer stärker mit anderen Fahrzeugen oder mit der Umwelt vernetzt werden, um auf Änderungen des Zustands des Verkehrssystems reagieren zu können [Arnold et al. (2010), S. 57; Kley (2011), S. 79]. Diese IuK-Systeme und deren Kommunikationsmöglichkeiten sowie der Effekt auf die Nutzung der Fahrzeuge und der Ladeinfrastruktur ist durch das Bewertungswerkzeug zu berücksichtigen.

1.3 Anforderungen

Um die oben genannten Ziele zu erreichen, werden diese in diesem Abschnitt in Form von Anforderungen weiter verfeinert. Sie dienen dazu, den Stand der Technik zu bewerten und den Anwendungsbereich des entwickelten Bewertungswerkzeugs *Mambaa* zu spezifizieren. Für die Zielerreichung wurden vier Kernbereiche identifiziert, die *Mambaa* adressieren muss: Nutzermobilität, regionaler Kontext, technische Eigenschaften der Fahrzeuge und der Ladeinfrastruktur. Die Anforderungen werden für jeden dieser vier Bereiche herausgearbeitet und um bereichsübergreifende Anforderungen ergänzt (Sonstige).

1.3.1 Nutzermobilität

Um den Energiebedarf von Elektrofahrzeugnutzern bestimmen zu können, ist es notwendig zu wissen,

1. welche Nutzergruppen in der Modellregion existieren,
2. wo diese verortet sind und
3. welches Mobilitätsverhalten sie aufweisen.

Dieser Informationsbedarf bestimmt die folgenden Anforderungen.

A 1 – Nutzer und Nutzergruppen Im Zentrum dieser Arbeit steht die Bewertung des Nutzers und seine Möglichkeiten, Elektrofahrzeuge nutzen zu können. Deshalb muss das Bewertungswerkzeug den Nutzer und sein Mobilitätsverhalten individuell abbilden können. Das Handeln von Personen eines Haushalts bzw. eines Unternehmens ist stark davon geprägt in welchem demographischen Kontext sich der Haushalt bzw. das Unternehmen befindet [Bhat et al. (2003b), S. 10; Papaleontiou und Dikaisakos (2009), S. 2; Beckman et al. (1996), S. 415]. Das Bewertungswerkzeug muss demnach in der Lage sein, die Unterscheidung des Nutzerverhaltens in Abhängigkeit dieser demografischen Werte in Form von Nutzergruppen zu modellieren. Da in den seltensten Fällen die Datenlage ausreicht, um jedes Individuum einzeln zu beschreiben [Veldhuisen et al. (2000), S. 433], fasst eine Nutzergruppe bestimmte Personen, Haushalte oder Unternehmen zusammen, die ein ähnliches Mobilitätsverhalten und ähnlichen Zugang zu Ressourcen (z. B. Fahrzeuge) haben (*Z 2 – Integration von privaten Haushalten und Unternehmen*).

A 2 – Haushaltsstandorte Um die Ladeinfrastruktur bewerten zu können, ist wie in der Problemstellung dargestellt eine räumliche Darstellung des Systems notwendig. Die Ermittlung des Energiebedarfs an den Zielorten ist nur dann möglich, wenn auch die Startpunkte der Fahrzeug bekannt sind. Demnach muss das Bewertungswerkzeug fähig sein, die Standorte der Haushalte und der Unternehmen zu modellieren [Beckman et al. (1996); Dios Ortúzar und Willumsen (2011), S. 479–480]. Jede Person hat i. d. R. neben dem

Haushaltsstandort einen oder mehrere zusätzliche Ankerpunkte in seiner täglichen Mobilität, die regelmäßig angefahren werden (z. B. der Arbeitsplatz) [Bowman (1998), S. 66; Arentze und Timmermans (2004), S. 3]. Diese müssen ebenfalls durch das Modell berücksichtigt werden (Z 1 – Räumlich und zeitlich differenzierte Betrachtung).

A 3 – Aktivitätsgestaltung Ausgehend von den oben dargestellten Ausgangspunkten ist die Darstellung der individuellen Mobilität erforderlich. Das Modell muss Anzahl, Grund und Ziel der Aktivitäten sowie die Standdauer an den jeweiligen Zielen abbilden können [Kley (2011), S. 49]. Die Darstellung muss durchgängig erfolgen, damit die Verbräuche der realisierten Fahrten und der Ladebedarf an den Zielorten bestimmt werden kann. Unter der Durchgängigkeit ist die zeitliche Aneinanderreihung von Aktivitäten und deren Ziele zu verstehen. Eine reine Betrachtung von Verkehrsflüssen aus Einzelfahrten – wie sie häufig in Verkehrsuntersuchungen verwendet werden – reicht hier nicht aus [Guo und Bhat (2001), S. 1–4]. Mit der Durchgängigkeit werden Durchschnittsbetrachtungen vermieden (Z 1 – Räumlich und zeitlich differenzierte Betrachtung).

A 4 – Operative Kennzahlen Das Planungswerkzeug muss Kennzahlen berechnen können, die sich durch die Mobilitätsmuster in Kombination mit den technischen Eigenschaften der Fahrzeuge ergeben, um die Bestimmung der operativen Verwendbarkeit der Fahrzeuge zu ermöglichen. Dieses betrifft Ausfälle aufgrund unzureichender Energie oder zeitliche Aspekte, wie die Standzeiten, Wartezeiten oder Verspätungen durch Ladevorgänge [Hoerstebroek und Hahn (2012)]. Um die räumlichen Aspekte zu bedienen, sind die Kennzahlen abhängig von den jeweiligen Standort der Fahrzeuge oder der Ladestationen zu erfassen.

1.3.2 Regionaler Kontext

Das Bewertungswerkzeug muss einen geografischen Rahmen bereitstellen, der die Möglichkeiten der Nutzeraktionen (s. o.) sowie der Platzierung von Ladeinfrastruktur vorgibt (Z 1 – Räumlich und zeitlich differenzierte Betrachtung). Folgende Aspekte müssen dabei integriert werden.

A 5 – Strukturdaten Das Bewertungswerkzeug muss eine geografische Umgebung bereitstellen, in der die Nutzer agieren und in welcher die Ladeinfrastruktur platziert ist. Die Region muss in Zonen untergliedert werden können. Die Zonen müssen Strukturmerkmale aufweisen, um die Standorte der identifizierten Nutzergruppen und die Ziele der Fahrten bestimmen zu können [Veldhuisen et al. (2000), S. 435; Machledt-Michael (2000), S. 125–128]. Das Modell muss ein räumlich aufgelöstes Mengengerüst der Haushalts- und Firmenstandorte bereitstellen.

A 6 – Verkehrsnetz Die Region muss ein Straßennetz beinhalten, das unterschiedliche Streckentypen (Hauptstraße, Landstraße, Autobahn etc.) abbilden kann. Mit der Abbil-

derung des Verkehrsnetzes muss es möglich sein, die Routen der Fahrten zu bestimmen und im Zusammenspiel mit dem Fahrzeugmodell die Verbräuche der Fahrzeuge zu ermitteln (Z 4 – Berücksichtigung von Technologieeffekten). Zudem muss in dem Straßennetz Ladeinfrastruktur platziert werden können (Z 3 – Ladeinfrastrukturbewertung).

1.3.3 Fahrzeug

Die technischen Eigenschaften der Fahrzeuge bestimmen maßgeblich die Verwendbarkeit aus Nutzersicht. Folgende Anforderungen sind zu erfüllen (Z 4 – Berücksichtigung von Technologieeffekten).

A 7 – Verbrauch Um die durch die Mobilitätsmuster erzeugten Standzeiten der Nutzer in den tatsächlichen Energiebedarf an den Zielorten zu überführen, muss das Modell den Verbrauch des Fahrzeuges abbilden. Diese Darstellung muss in Abhängigkeit von unterschiedlichen Fahrzeugzuständen (z. B. Geschwindigkeit) und Umweltzuständen (z. B. Außentemperatur) erfolgen, um die räumliche Differenzierung zu garantieren und Durchschnittswerte zu vermeiden (s. Z 1 – Räumlich und zeitlich differenzierte Betrachtung).

A 8 – Kapazität Neben dem Verbrauch stellt die Batteriekapazität einen elementaren Faktor bei der Bewertung der Adoptionsfähigkeit der Nutzer und bei der Bewertung der Ladeinfrastruktur dar. Im Gegensatz zu Treibstofftanks in konventionellen Fahrzeugen, weist die Batterie eine Dynamik in Abhängigkeit von Umweltfaktoren auf [Wenzl et al. (2005); Vetter et al. (2005)]. Zum Beispiel kann die aus der Batterie entnehmbare Energie abhängig vom Entladeverlauf, der Außentemperatur oder ihrer Vergangenheit (Memory-Effekt) sein [Grote (2001)]. Auch die Geschwindigkeit, mit der die Batterie geladen werden kann, unterliegt gewissen Schwankungen. So ist eine Lithium-Ionen Batterie i. d. R. schnell bis auf 80 % aufgeladen, wohingegen die restlichen 20 % ein Mehrfaches an Zeit benötigen [Jossen (2014); Galus et al. (2012a), S. 5]. Das Modell muss in der Lage sein, diese Dynamik abzubilden.

1.3.4 Ladeinfrastruktur

Die technischen Eigenschaften der Ladestationen bestimmen, ob und welche Menge an Energie in das Fahrzeug geladen werden. Die Modellierungen in diesem Bereich müssen neben den technischen Aspekten (z. B. Leistung) auch unterschiedliche Standorttypen definiert werden, die die Zugangsmöglichkeit von Personengruppen abbilden. Sie adressieren insbesondere die Ziele Z 3 – Ladeinfrastrukturbewertung und Z 4 – Berücksichtigung von Technologieeffekten.

A 9 – Technische Lösung Die Art und Weise mit der Elektrofahrzeuge geladen werden können sind vielfältig und reichen von einfachen Steckverbindungen über Induktionsschleifen bis hin zu Batteriewechselstationen [Kley (2011), S. 8–14]. Je nach Art sind

komplett unterschiedliche *Güterarten* zwischen der Ladeeinrichtung und dem Fahrzeug auszutauschen (Energie bzw. komplette Batterien). Darüber hinaus muss die Leistung mit der dieser Transfer durchgeführt werden kann abgebildet werden. Diese Modellierung muss, wie die Batterie des Fahrzeugs, flexibel diverse Einflüsse integrieren können. Die übertragbare Leistung einer Induktionsschleife ist bspw. von dem Abstand zur Bodenplatte des Fahrzeugs abhängig [Wiesspeiner (2005)]. Die Leistung einer *normalen* Ladestation ist wiederum abhängig von der Stromart (Wechsel- oder Gleichstrom), der Spannung und Stromstärke und ggf. der Anzahl an Phasen [VDE (2012)]. Das Bewertungswerkzeug benötigt eine hohe Flexibilität, um diese Arten abbilden zu können.

A 10 – Zugang Neben den technischen Eigenschaften der Ladestationen ist der Standort und der Zugang der Ladestationen zu definieren. Um Ladeinfrastrukturlayouts zu entwickeln und demnach die räumlichen Aspekte zu berücksichtigen, müssen die Ladestationen flexibel auf dem oben geforderten Straßennetz platzierbar sein. Das betrifft sowohl mögliche Zielorte als auch Straßen (Induktionsschleifen) innerhalb der Region. Darüber hinaus muss in dem Modell definierbar sein, ob die Fahrzeuge Zugang zu der jeweiligen Ladestation erhalten. Diese Zugangsrestriktionen können technischer und nicht-technischer Natur sein. Technische Zugangsrestriktionen stellen z. B. Steckerstandards, die Möglichkeit eines Batteriewechsels etc. dar [VDE (2012)]. Nicht-technische Zugangsrestriktionen sind bspw. gruppenspezifische Möglichkeiten auf Grundstücke oder Parkplätze zu gelangen (z. B. von Mitarbeitern eines Unternehmens).

1.3.5 Sonstige

Neben den Anforderungen der spezifischen Bereiche wurden die folgenden übergreifenden Anforderungen identifiziert.

A 11 – Kommunikation Die Vernetzung der Verkehrsteilnehmer untereinander (Car2-Car) und die Vernetzung zwischen Verkehrsteilnehmer und Serviceanbieter (Car2Infrastructure) gerät immer stärker in den Fokus. Einige Experten sind der Meinung, dass nur die konsequente Integration von IuK-Systemen in Elektrofahrzeuge die geringe Reichweite kompensieren kann [Hess et al. (2012); Gharbaoui et al. (2013)]. Demnach ist der Effekt dieser Systeme (z. B. Such-, Reservierungs- oder Navigationssysteme) auf das Verhalten der Fahrzeuge und somit auf die Fahrt- und Ladeverläufe zu bewerten. Das Modell muss daher die Möglichkeit bieten, den durch die Systeme entstehenden Informationsaustausch zwischen den Systemelementen darzustellen (Z 4 – Berücksichtigung von Technologieeffekten).

A 12 – Datenintegration Die größte Herausforderung stellt die Datenerhebung bei der Aufstellung von Szenarien zur räumlich und zeitlich aufgelösten Bewertung von Elektrofahrzeugen und Ladeinfrastruktur dar [Dios Ortúzar und Willumsen (2011), S. 18–19;

Veldhuisen et al. (2000), S. 431]. Insbesondere sind davon die Daten der Untersuchungsregion und der Nutzermobilität betroffen. Die Bestimmung der einzelnen Eingangsdaten soll demnach möglichst einfach erfolgen, indem auf öffentlich zugängliche Daten (z. B. Statistiken von Landes- oder Bundesämtern) und Mobilitätsstudien (z. B. Mobilität in Deutschland 2008) zurückgegriffen wird. Diese müssen durch das Modell integriert werden können.

A 13 – Erweiterbarkeit Da sich die Untersuchungsbereiche der adressierten Interessensgruppen zum Teil erheblich unterscheiden, wird von dem Modell eine hohe Flexibilität und Erweiterbarkeit gefordert. Das Bewertungswerkzeug soll z. B. sowohl von einer Gemeinde zur Bewertung einer öffentlichen Ladeinfrastruktur als auch von einem Netzbetreiber zur Beurteilung von unterschiedlichen Ladesteuerungsmechanismen eingesetzt zu werden. Demnach müssen neue Elemente einfach in das bestehende Gerüst eingefügt und das Verhalten der bestehenden Elemente einfach adaptiert werden können.

1.4 Beitrag der Arbeit

Um die oben dargestellten Ziele zu erreichen, wird in dieser Arbeit das Bewertungswerkzeug *Mambaa* (Multi-agenten basierte Bewertung von alternativen Antriebssystemen) entwickelt. Dieses Bewertungswerkzeug integriert und adaptiert unterschiedliche Modelle und Verfahren aus mehreren Forschungsdisziplinen (insb. der Verkehrsforschung), um die aufgestellten Ziele und Anforderungen zu erfüllen. *Mambaa* ist in einen deskriptiven und einen konstruktiven Teil untergliedert. Abbildung 1 stellt die beiden Teile und die

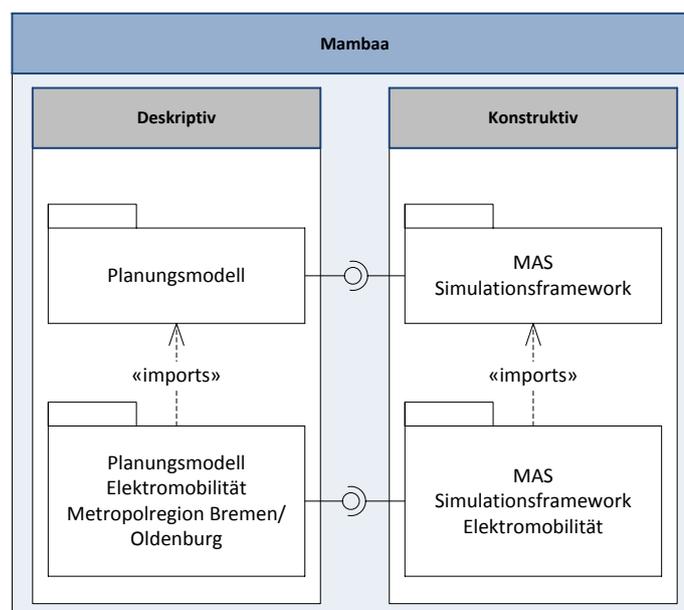


Abbildung 1 Beitrag der Arbeit

einzelnen Beiträge dieser Arbeit dar. Der deskriptive Teil enthält das sog. Planungsmodell, mit dem die technischen Eigenschaften der untersuchten Fahrzeuge und Tankinfrastruktur sowie die Mobilität der Nutzer abgebildet werden. Der konstruktive Teil stellt eine Multi-Agenten-Simulation bereit, mit der die Elemente des Planungsmodells zu individuellen Szenarien zusammengeführt und durchgerechnet werden, um zu den in Abschnitt 1.1 geforderten Auswertungen zu gelangen. Sowohl das Planungsmodell als auch die Multi-Agenten-Simulation sind zunächst abstrakt gehalten, um ggf. für weitere Domänen mit ähnlichen Fragestellungen anwendbar zu sein (A 13 – Erweiterbarkeit). Beide Komponenten werden im Verlauf der Arbeit auf die Domänen Elektromobilität erweitert. Das Planungsmodell wird darüber hinaus mit den Daten aus der Metropolregion Bremen/Oldenburg kalibriert. Es stellt somit die Mobilitätsmuster der Nutzer und die Strukturdaten der Metropolregion deskriptiv zur Verfügung, um damit konkrete Untersuchungen des Systems Elektromobilität zu ermöglichen. Die Metropolregion Bremen/Oldenburg dient zusätzlich als Untersuchungsregion für die Evaluation der elektromobilitätsspezifischen Modelle. In der Evaluation wird überprüft, ob *Mambaa* die geforderten Ziele und Anforderungen dieser Arbeit erfüllt.

1.5 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in vier Hauptkapitel sowie Einleitung und Fazit. Insgesamt orientiert sich die Arbeit an dem von Peffers et al. (2006) aufgestellten *Design science research process model* und adressiert die Bereiche Problemidentifikation (Kapi-

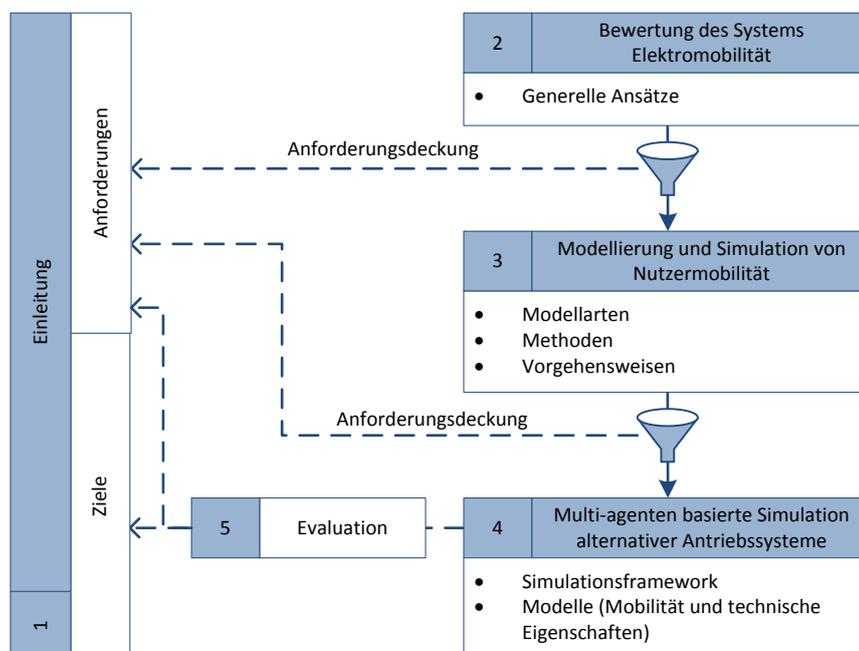


Abbildung 2 Aufbau der Arbeit

tel 1), Ziel- und Anforderungsermittlung (Kapitel 1), Bewertung bestehender Verfahren und Systeme (Kapitel 2 und 3), Konzeption und Implementierung (Kapitel 4) sowie die Demonstration und Evaluation (Kapitel 5).

Kapitel 2 befasst sich mit der Analyse des Stands der Technik bei der Bewertung von elektromobilitätsspezifischen Fragestellungen. Dabei konzentrieren sich die Ausführungen auf Methoden die explizit die Ladeinfrastruktur und die Nachfrageabdeckung der Nutzer adressieren. Das Kapitels bewertet die Vorgehensweisen und Modelle hinsichtlich ihres Erfüllungsgrades der in Abschnitt 1.2 aufgestellten Ziele und der in Abschnitt 1.3 abgeleiteten Anforderungen. Ziel ist die Identifikation von geeigneten Methoden, die für die Aufgabenstellung dieser Arbeit verwendet bzw. adaptiert werden können. Die Abbildung und Bewertung von Nutzermobilität ist zentrale Aufgabe der Verkehrsforschung. Auch wenn sich diese Arbeit nicht auf die Bewertung der Verkehrsinfrastruktur konzentriert, sind die allgemein angewandten Methoden einer ähnlichen Untersuchung wie die in Kapitel 2 zu unterziehen. Kapitel 3 befasst sich mit dieser Analyse. Auch hier werden Verfahren und Modelle hinsichtlich ihres möglichen Beitrags für diese Arbeit überprüft und die Methoden identifiziert, die zur Zielerreichung in *Mambaa* integriert werden können. Kapitel 4 stellt das detaillierte Konzept von *Mambaa* zur Erfüllung der Ziele und Anforderungen vor. Dazu gehen die Ergebnisse der vorgelagerten Kapitel ein. Zudem wird die prototypische Implementierung von *Mambaa* beleuchtet. Kapitel 5 evaluiert den Prototypen hinsichtlich seines Anforderung- und Zielerfüllungsgrades. Die Anwendbarkeit wird anhand von zwei Anwendungsbeispielen in der Metropolregion Bremen/Oldenburg demonstriert. Abbildung 2 stellt den Aufbau dieser Arbeit zusammenfassend dar.

2 Ansätze zur Analyse des Systems Elektromobilität

Dieses Kapitel untersucht Methoden und Werkzeuge zur nutzerspezifischen Bewertung von alternativen Fahrzeugkonzepten im Allgemeinen und Elektromobilität im Speziellen. Ziel ist die Ermittlung der Anforderungsabdeckung dieser Methoden sowie die Möglichkeit, diese für die Zielstellung dieser Arbeit zu verwenden bzw. zu adaptieren.

Wie aus Kapitel 1 hervorgeht, steht im Zentrum dieser Arbeit die Entwicklung eines Bewertungswerkzeugs zur Analyse von Nutzergruppen hinsichtlich ihrer Adoptionsfähigkeit der neuen Fahrzeugtechnologie. Durch die technologiebedingten Veränderungen der Mobilitätsparadigmen und die damit einhergehende Reichweitenangst (Range Anxiety [Schott (2009)]) ist die Akzeptanz der Nutzer eng gekoppelt an die vorhandene Ladeinfrastruktur. Eine operative Adoptionsmöglichkeit von Elektrofahrzeugen seitens Nutzer oder Nutzergruppen kann ggf. nur durch ein engmaschiges Netz an Ladestationen erreicht werden. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel insbesondere die verwandten Arbeiten beleuchtet, die sich mit der Abdeckung der Nutzernachfrage nach Energie und mit der Erstellung von Infrastrukturlayouts (inkl. der Bewertung und Optimierung) beschäftigen. Verwandte Ansätze, die z. B. die Effekte der Fahrzeuge auf das Energienetz bewerten, werden nicht betrachtet.

Die Standortplanung von Tankinfrastruktur im Allgemeinen hat das Ziel, die Fahrzeuge zum richtigen Zeitpunkt, am richtigen Ort, in der benötigten Menge, Qualität und Geschwindigkeit mit Kraftstoff zu versorgen. In diesem Kontext wurden bereits Werkzeuge entwickelt, die den jeweiligen relevanten Stakeholder in seiner Entscheidung unterstützen. Auf diese Werkzeuge geht der Abschnitt 2.1 genauer ein. Im Operation Research ist die Kombination von Transportmengen- und Standortentscheidungen als *Location-Allocation Problem* oder auch *Facility-Allocation Problem* bekannt [Maßmann (2006), S. 37]. In Abschnitt 2.2 werden die Modelle explizit erläutert, die sich mit der Positionierung von Tankstellen befassen. Darüber hinaus existieren Ansätze, die simulativ die Bewertung von Nutzeranforderungen und die Positionierung der Ladestationen durchführen. Auf diese Methoden geht der Abschnitt 2.3 ein.

2.1 Studien und Werkzeuge zur Entscheidungsunterstützung

Neben den allgemeinen Befragungen zu den Präferenzen von potenziellen Elektrofahrzeugnutzern [Achtnicht et al. (2008); ISI (2012); Peters und Dütschke (2010)], existieren eine Reihe an Publikationen, die mit (semi-)formalen Ansätzen die Adoptionsmöglichkeit und die Anforderungen an eine Ladeinfrastruktur ermitteln. Diese Modelle und Studien unterscheiden sich dabei in ihrer Zielgruppe (z. B. einzelne Stakeholder, Gemeinden etc.) und ihrem regionalen Fokus.

Einen zentralen Ansatz für die Bewertung der nutzergruppenspezifischen Adoptionsfähigkeit von Elektrofahrzeugen stellt die Arbeit von Kley (2011) dar. Kley entwickelt ein optimales Infrastruktursystem für sowohl Elektrofahrzeuge als auch Plug-In Hybride. Bei der Optimierung stellen die Mobilitätsbedarfsdeckung des Nutzers, die technische Realisierbarkeit und die wirtschaftliche Tragfähigkeit der Infrastruktur entscheidende Faktoren dar. Er bewertet die allgemeinen Ausgestaltungsmöglichkeiten der Ladeinfrastruktur (s. u.) und berücksichtigt *nicht* den Einfluss der konkreten räumlichen Verteilung. Das Vorgehen ist in Abbildung 3 dargestellt. Im ersten Schritt untersucht Kley die technische Machbarkeit der Ladestationstypen. Zur Charakterisierung der Ladeinfrastruktur greift er auf die folgenden Faktoren zurück:

1. Art der Versorgungseinrichtung (konduktiv; induktiv; Batteriewechsel),
2. Art der Zugänglichkeit (privat; halb-öffentlich; öffentlich) und
3. Anschlussleistungen und Ladezeit (3,7 kW; 11,1 kW; 22,2 kW; 43,6 kW).

Für die nachgelagerte ökonomische Bewertung berücksichtigt er nur technisch sinnvolle Konfigurationen und leitet sie argumentativ ab. Kley identifiziert die jeweils notwendigen technischen Komponenten und die Beschaffungs- sowie Wartungskosten. Diese Konfigurationen werden einer zu erwartenden Auslastung gegenübergestellt, die jeweils abhängig von der Zugänglichkeit (privat, halb-öffentlich, öffentlich) ist. Kley nimmt bei seinen Analysen an, dass

1. jedes Fahrzeug alle zwei Tage geladen werden muss,
2. die Infrastruktur optimal ausgelastet wird,
3. sich die Nutzer kooperativ verhalten,
4. die Nutzer den Homo oeconomicus widerspiegeln und
5. Nachfragespitzen ignoriert werden können.

Den ermittelten Auslastungen stellt er die Investitions- und Betriebskosten über den Lebenszeitraum der Ladestation von 15 Jahren gegenüber, um ökonomisch tragfähige Ladestationstypen in den Bereichen *Privat*, *Halb-öffentlich* und *Öffentlich* zu identifizieren. Im Weiteren untersucht er die Einflussfaktoren, die sich auf die optimale Ausgestaltung der Ladeinfrastruktur auswirken. Diese sieht Kley im Nutzerverhalten, in der Fahrzeugtechnologie (inkl. Kostenstruktur), in der Batterietechnologie (inkl. Alterung und Kostenstruktur), in den angebotenen Systemdienstleistungen und in den Anreizsystemen (z. B. Steuer- und Fördersysteme). Zur Beschreibung und Optimierung des Nutzerverhaltens definiert Kley ein Optimierungsproblem, dessen Zielfunktion die Minimierung der Ladekosten pro Fahrzeug darstellt. Dabei können die Fahrzeugnutzer entscheiden, in welchen Zeiträumen sie das Fahrzeug laden möchten. Die Kosten in der Zielfunktion wird daraufhin um Batteriealterungskosten, Kosten für die Schnellladung und um Treibstoffkosten (Einsatz von PHEV) erweitert. Er nutzt die Fahrprofile aus den Daten des Deutschen

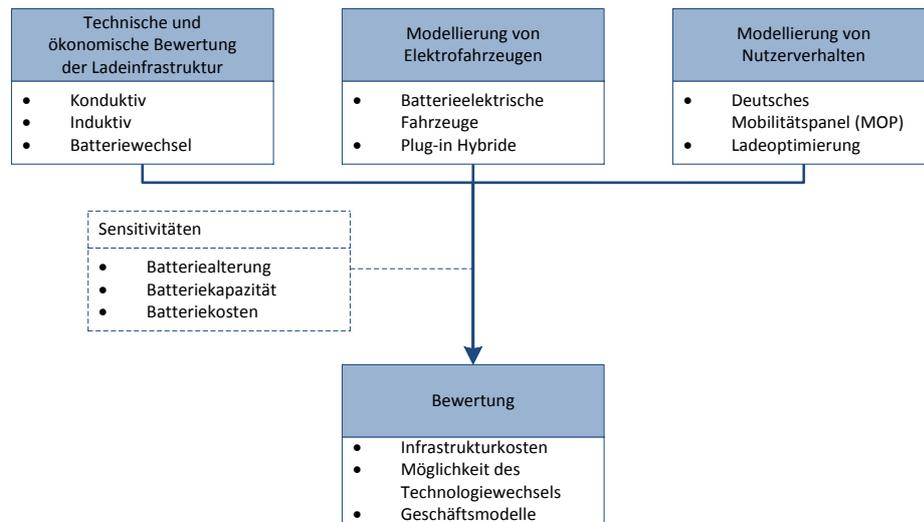


Abbildung 3 Vorgehen nach Kley (2011)

Mobilitätspanel (MOP) [IFV (2013)] als Eingangsdaten für die Optimierung. Diese Profile werden abgefahren und unter Anwendung der dynamischen Programmierung ermittelt, an welchen Standorten geladen werden muss, um nicht liegen zu bleiben. Dabei wird bevorzugt an kostengünstigen Standorten geladen (Zuhause oder am Arbeitsplatz). Mit diesem Optimierungsprozess bewertet Kley die Auslastung der von ihm aufgestellten Infrastrukturszenarien.

Morrow et al. (2008) untersuchen die Nutzen einer öffentlich zugänglichen Infrastruktur für Plug-in Hybrid Fahrzeuge. Dazu analysierten sie die Mobilitätsmuster auf Grundlage der Mobilitätsumfrage *National Household Travel Survey 2001*. Ziel der Untersuchung ist es, zwischen einer Erhöhung der Batteriekapazität und der Installation einer öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur abzuwägen. Als Bewertungskriterien gehen neben dem Benzinverbrauch die Kosten der Installation der Ladestation am Heimpladepunkt und der öffentlich zugänglichen Ladestationen ein. Zwar macht die Studie Aussagen über die notwendige Anschlussleistung der Ladestationen, eine Betrachtung der tatsächlichen Standorte findet jedoch nicht statt. Wegen der Fokussierung auf Plug-in Hybride vernachlässigt die Analyse die Standzeiten an den jeweiligen Ladestationen. Insgesamt ist das Modell deshalb nicht geeignet, um rein elektrisch betriebene Fahrzeuge zu bewerten.

Neben den oben erwähnten Ansätzen, die die Mobilität der Nutzer bei der Bewertung von Ladeinfrastruktur berücksichtigen, existieren Modelle, die ausschließlich strukturelle Daten einer Untersuchungsregion verwenden. Cheng et al. (2008) bspw. ermitteln eine Rollout-Strategie für Ladeinfrastruktur in der San Francisco Bay Area. Anhand der Gesamtpopulation, der Anzahl an Einpendlern und der Anzahl an öffentlichen Anreizmaßnahmen für umweltfreundliches Verhalten werden die Gemeinden identifiziert, die für

eine erste Ausbringung geeignet sind. May und Mattila (2009) entwickeln ein Entscheidungsunterstützungssystem für mögliche Ladestationsbetreiber. Diese können damit die Kosten für die Ladestationen abschätzen und mit dem (nicht-)monetären Nutzen vergleichen. Diese Arbeiten weisen allerdings einen geringen Formalisierungsgrad auf, sind schwer auf andere Regionen zu übertragen und vernachlässigen komplett die individuelle Nutzermobilität. Aus diesem Grund werden diese Arbeiten nicht weiter verfolgt.

2.2 Location Modelle

Die Standortplanung von Lager, Filialen, Distributionszentren und sonstigen Serviceeinrichtungen ist eine zentrale logistische Aufgabe und wurde in der Vergangenheit von vielen Wissenschaftlern untersucht. Im Allgemeinen geht es um die kostenminimale Platzierung von Unternehmenseinrichtungen unter der Vorgabe, die Nachfrage (z. B. von Kunden) zu erfüllen und die je nach Problemklasse definierten Nebenbedingungen zu berücksichtigen [Farahani (2009), S. 1]. Die Anwendungsgebiete dieser Modelle sind breit gestreut. Sie reichen von der Standortplanung von öffentlichen (sicherheitsrelevanten) Einrichtungen (z. B. Feuerwehren, Krankenhäuser etc.) über private Einrichtungen (z. B. Warenlager, Distributionszentren, Filialen) bis hin zu militärischen Einrichtungen (z. B. Waffendepots). Durch diese Vielzahl an Anwendungsgebieten und deren spezifischen Charakteristiken existiert eine Vielzahl an Modellklassen. Diese unterscheiden sich in der Zielfunktion, der Darstellung der Nachfrage, der Anzahl an positionierbaren Einrichtungen, die Arten der Einrichtungen, der Bewertung der Distanz zwischen Einrichtungen und Nachfragepunkten sowie den zusätzlichen problemspezifischen Nebenbedingungen. Eine Klassifizierung der einzelnen Modellarten stellt Abbildung 4 dar.

Die klassischen *Location-Allocation* Modelle betrachten die Nachfrage statisch und populationsorientiert, d. h. die Nachfrage geht von Bereichen bzw. Knoten aus und soll mit den zu positionierenden Einrichtungen abgedeckt werden. Die *Flow-based-Location* Modelle betrachten die Nachfrage als Verkehrsstrom von potenziellen Startpunkten zu potenziellen Zielpunkten innerhalb eines definierten Verkehrsnetzes. Diese fahrtbezogene Nachfrage eignet sich insbesondere für die Positionierung von Einrichtungen für Reisedienstleistungen (z. B. Geldautomaten, Raststätten, Tankstellen etc.) oder für Verkehrsinfrastruktur (z. B. Verkehrszählungsanlagen, dynamische Verkehrsschilder etc.).

Generell werden die *Location* Modelle in *Covering* und *Disperation* Modelle unterteilt. Die *Covering* Modelle maximieren die Abdeckung der Nachfrage; die *Disperation* Modelle minimieren die Überschneidungen der Einflussbereiche der Einrichtungen, um eine gleichmäßige Verteilung im Raum und/oder einen Mindestabstand der Einrichtungen zu erreichen. Für die Bewertung von Ladeinfrastruktur können potenziell beide Nachfrage-

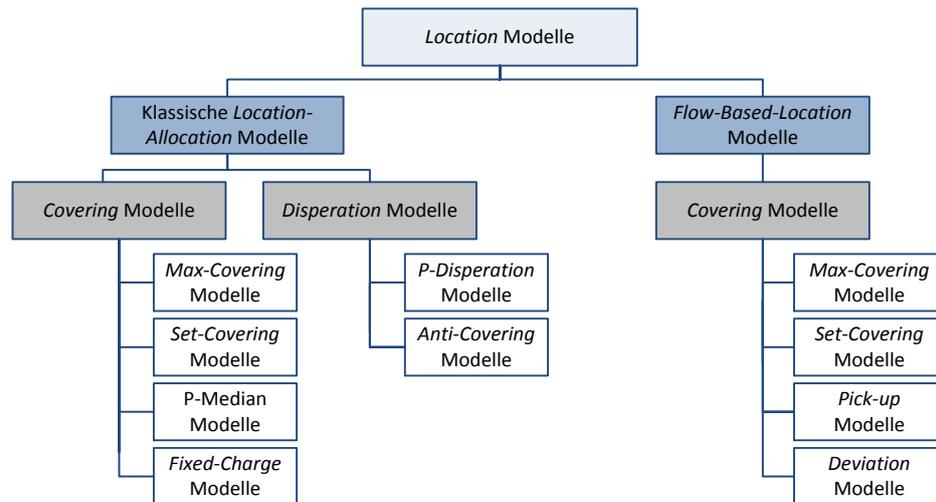


Abbildung 4 Klassifizierung von Location-Allocation-Modellen

modellierungsansätze (punktbasiert/strombasiert) als auch beide Modellarten (*Covering/Disperation*) aus folgenden Gründen angewandt werden:

1. Der Bedarf an Ladestationen ist sowohl populationsorientiert als auch verkehrorientiert [Goodchild und Noronha (1987)]. Der populationsorientierte Bedarf entsteht durch das benötigte Laden Zuhause oder am Arbeitsplatz; der verkehrorientierte Bedarf entsteht durch die geringe Reichweite der Elektrofahrzeuge und die ggf. notwendigen Zwischenladungen bei längeren Fahrten.
2. Die Ladeinfrastruktur ist sowohl unter nachfrageorientierten als auch distributiven Gesichtspunkten zu errichten [NOW (2011b), S. 31; ISI (2012), S. 27], d. h. eine Bewertung/Optimierung sollte sowohl die Abdeckung der Nachfrage (*Covering*) als auch die allgemeine Zugänglichkeit (*Disperation*) berücksichtigen.

Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich mit den klassischen *Location-Allocation* Modellen als auch den *Flow-Based Location* Modellen, die auf die Ausbringung von Betankungsinfrastruktur für alternativangetriebene Fahrzeuge fokussiert sind.

2.2.1 Klassische *Location-Allocation* Modelle zur Bestimmung von Betankungsinfrastruktur

Die klassischen *Location-Allocation* Modelle, die sich mit der Ausbringung von Betankungsinfrastruktur beschäftigen benutzen zum größten Teil *p-Median* Modelle. Dabei handelt es sich um diskrete Entscheidungsmodelle bei denen die Region als Graph modelliert wird. Ziel ist die (ggf. nachfragegewichtete) Distanz zwischen den Nachfrageorten und den Betankungsstandorten zu minimieren [Hasse und Hoppe (2008), S. 19 u. 21; Jamshidi (2009), S. 178–179]. *Fixed-Charge* Modelle sind Erweiterung der *p-Median*

Modelle. Neben den Transportkosten (nachfragegewichteten Distanz) gehen auch die Errichtungskosten der Einrichtungen in die Zielfunktion ein.

Eine der ersten, die die *Location* Modelle zur Platzierung von Tankstellen nutzen, sind Goodchild und Noronha (1987). Sie stellen ein *p-Median* Modell auf, das die Positionierung von Tankstellen dahingehend optimiert, einen möglichst hohen Marktanteil (Nachfragedeckung) zu erreichen. Dabei geht sowohl die verkehrsbezogene als auch die einwohnerbezogene Nachfrage in das Modell ein [Kim (2010), S. 30]. Ziel ist die Minimierung der Distanz, die durch beide Arten der Nachfrage linear gewichtet ist. Diese Kombination der beiden Nachfragequellen wird allerdings in den weiteren Ansätzen zur Platzierung von Tankstellen nicht weiter aufgenommen. Chan et al. (2007) berechnen in ihrem Modell die Nachfrage an Treibstoff unter Berücksichtigung von Einwohnerdichte, mittleren Einkommen und mittlerem Fahrzeuganteil pro Haushalt. Sie wenden ein *p-Median* Modell an, um das Tankstellennetz in Singapur zu planen. Als Optimierungskriterium geht die nachfragegewichtete Distanz zwischen Nachfragepunkt und Tankstelle ein. Lin et al. (2008) verwenden ein ähnliches Modell für die Planung von Wasserstofftankstellen. Die Nachfrage ergibt sich hier durch die Verkehrsbelastung an den Kanten des zugrunde liegenden Verkehrsnetzes. In das sog. *Fuel-Travel-Back* Modell, das die grundlegende Struktur eines *p-Median* Modells aufweist, geht die Annahme ein, dass ein Fahrzeug nur dann tankt, wenn es fährt und ein Auftanken absolut notwendig ist. Die Standorte, an denen ein Auftanken erforderlich ist, ergeben sich aus der Wahrscheinlichkeit, dass das Fahrzeug sich auf einer Kante befindet und dass es Kraftstoff benötigt. Die Standorte werden markiert und entsprechend der Wahrscheinlichkeit priorisiert. Die Distanz von diesen Standorten zur nächsten Tankstelle dient als Optimierungskriterium, bei der Positionierung einer gegebenen Anzahl an Wasserstofftankstellen.

Auch das Modell von Ge et al. (2011) verwendet die Verkehrsbelastung zur Bestimmung der Nachfrage. Sie nutzen das Modell, um Ladestationen für Elektrofahrzeuge zu planen. Dazu teilen sie das Problem in zwei Teile: die Lokalisierung (*p-Median* Modell) und die Skalierung. Die Lokalisierung platziert die Ladestationen im Raum unter Minimierung der Kosten, die durch die Fahrt vom jeweiligen Nachfragepunkt zu der Ladestation entstehen. Diese Kosten sind abhängig von den nachfragegewichteten Distanzen zwischen den Nachfragepunkten und den Ladestationen und sind für alle Nutzer gleich. Die Skalierung wird anhand der Ladenachfrage bestimmt. Diese ergibt sich durch die Multiplikation der Verkehrsnachfrage an den Knoten, dem Anteil der Elektrofahrzeuge, dem Ladezustand der Fahrzeuge sowie der durchschnittlichen Kapazität der Batterie. Als Nebenbedingung geht die Bedarfsdeckung sämtlicher Nachfrage ein. Die Anzahl der Ladestationen wird durch den Gesamtladebedarf, der Anschlussleistung, den Wirkungsgrad, die Ladezeit und der Anzahl der Ladepunkte bestimmt. Zur Lösung verwenden die Autoren

einen genetischen Algorithmus – der allerdings nicht näher beschrieben ist. Dazu partitionieren sie das Gebiet für eine erste Lösung. Diese wird sukzessive durch den Algorithmus geändert, so dass Bereiche mit niedriger Nachfrage in die Nachbarbereiche übergehen. Nach der Partitionierung der Region, werden die Anzahl an Ladeanschlüssen und die Ladeleistung pro Gebiet über das Skalierungsmodell bestimmt.

Neben der oben dargestellten Distanzminimierung berücksichtigen He et al. (2012) zusätzlich die Kosten der Ladestationsinstallation. Sie minimieren bei der Planung der elektrischen Ladeinfrastruktur die monetarisierten Umwegen und Ladezeiten sowie die Kosten der Ladestationen. Die Positionierung der Ladestationen findet ebenfalls mit Hilfe eines genetischen Algorithmus statt, wobei die erstellten Lösungen mit Hilfe von GIS-Werkzeugen auf Gültigkeit überprüft werden. Liu et al. (2012) und Jia et al. (2012) erweitern dieses Modell durch die differenziertere Betrachtung der Investitions- und Betriebskosten.

Bapna et al. (2002) adressieren das Problem, dass die Ausbringung von Ladestationen auch unter distributiven Gesichtspunkten erfolgen muss. Neben der Minimierung der Investitionskosten der Tankstellen sowie der monetarisierten Fahrten berücksichtigt ihr Modell zusätzlich die Anzahl an Personen, die die Tankstellen erreichen können.

In der Zusammenfassung stellen alle oben genannten Modelle die Nachfrage punktuell dar. Diese Art der Modellierung hat den Vorteil, dass die Nachfrage relativ einfach durch Strukturdaten oder Verkehrszählungen ermittelt werden kann. Werden durch die Modelle allerdings verkehrsorientierte Einrichtungen positioniert (z. B. Tankstellen, Raststätten, Verkehrsleitsysteme etc.), führt die punktuelle Bestimmung der Nachfrage durch Verkehrszählungen zu Fehlern. Diese entstehen dadurch, dass Fahrzeuge ggf. mehrfach durch die Verkehrszählung erfasst werden und so innerhalb einer Fahrt an mehreren Positionen

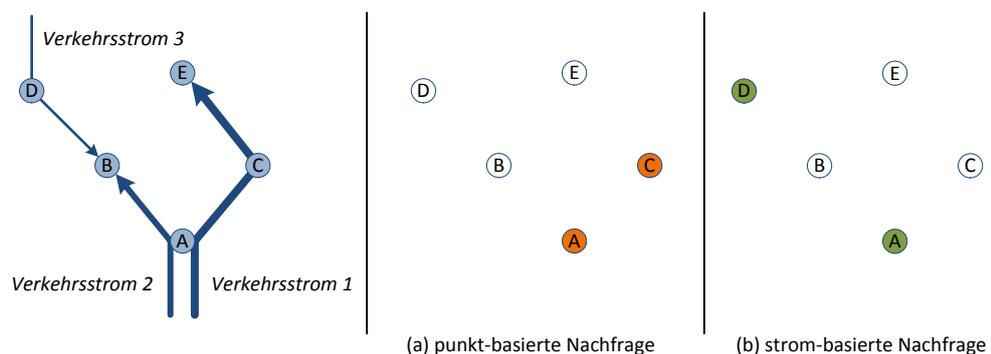


Abbildung 5 Kannibalisierungseffekt der punkt-basierten Nachfrage. Der Verkehrsstrom 1 verursacht eine doppelte Zählung der Nachfrage in Knoten A und C. Dadurch werden Standorte ausgewählt, die zu einem ineffizienten Layout führen (a). Die strombasierte Nachfrage führt dazu, dass Verkehrsstrom 1 nur einmal Nachfrage erzeugt und somit effizientere Layouts erreicht werden können (b).

Nachfrage generieren. Dadurch ist es möglich, dass die oben genannten Modelle Ladestationen falsch positionieren bzw. skalieren, um die vermeintlich hohe Nachfrage zu bedienen (s. Abbildung 5). Seit den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts wurden daher vermehrt strombasierte Modelle sog. *Flow-Based Location* Modelle entwickelt, um diesem Effekt bei der Platzierung von verkehrsrelevanten Einrichtungen entgegenzuwirken.

2.2.2 *Flow-Based Location* Modelle zur Bestimmung der Betankungsinfrastruktur

Hodgson (1990) und Berman et al. (1992) erweitern als eine der ersten die klassischen *Covering* Modelle um eine strombasierte Darstellung der Nachfrage. Die Nachfrage wird in Form von Pfaden beschrieben, die potenziell von jedem Start- zu jedem Endknoten des Netzwerks führen können. Das sogenannte *Flow-Capturing Location* Modell (FCLM) hat das Ziel, Einrichtungen so zu platzieren, dass so viele fahzeuggewichtete Pfade wie möglich von ihr geschnitten werden. Für die Formulierung seines Modells geht Hodgson davon aus, dass

- die Positionierung der Einrichtungen keinen Effekt auf den eigentlichen Verkehr hat,
- jedes Start/Ziel-Paar durch dieselbe Route realisiert wird und
- der Verkehr symmetrisch abläuft, d. h. die gleiche Anzahl an Fahrzeugen, die von Knoten i nach Knoten j fährt auch von Knoten j nach Knoten i fährt.

Hodgson verweist darauf, dass allgemein die Verwendung von Flüssen anstatt von einzelnen Nachfragepunkten einen wesentlich höheren Datenbedarf und Erhebungsaufwand nach sich ziehen. Diese benötigten Daten können aber leicht mit den Methoden der klassischen Verkehrsmodellierung (Verkehrsverteilung und -umlegung; s. Abschnitt 3.1) aus den vorhandenen Start/Ziel-Matrizen geschätzt werden. Die Verwendung der Flüsse erhöht zudem den zur Lösung benötigten Rechenaufwand.

Kuby und Lim (2005) erweitern das Basismodell zur Positionierung von Betankungsinfrastruktur für alternativ angetriebene Fahrzeuge (z. B. wasserstoffbetriebene oder batterieelektrische Fahrzeuge). Das ursprünglich formulierte FCLM geht davon aus, dass ein Fluss dann abgedeckt ist, wenn dieser mindestens eine Einrichtung schneidet. Kuby und Lim verschärfen diese Bedingung in ihrem *Flow-Refueling Location Model* (FRLM), indem sie die Reichweite der Fahrzeuge mit in das Modell einbeziehen, so dass die Pfade ggf. durch mehrere Tankstellen abgedeckt werden. Außerdem spielt die Position der Infrastruktur eine Rolle. Die Tankstellen müssen so platziert sein, dass Hin- und Rückfahrt von einem beliebigen Knoten zu einem anderen beliebigen Knoten möglich sein müssen. Kuby und Lim nehmen an, dass die Fahrzeuge mit mindestens 50 % der Fahrzeugreichweite ihre Fahrt starten. Dementsprechend müssen die Ladestationen von den Eingangs-

und Ausgangspunkten maximal soweit entfernt sein, dass die Hälfte der Reichweite der Fahrzeuge ausreicht, um diese zu erreichen. Alle weiteren Ladestationen dürfen maximal einen Abstand voneinander aufweisen, der der Reichweite der Fahrzeuge entspricht. Das Ziel des Modells ist es, die Anzahl der aufgetankten Fahrzeuge zu maximieren. Die Positionierung der Betankungsinfrastruktur findet in dem FRLM auf den Knoten des untersuchten Graphen und in zwei Stufen statt: die erste Stufe ermittelt die möglichen Kombinationen an Standorten, die die Pfade bedienen können, die von der zweiten Stufe herangezogen werden, um die einzelnen Tankstellen zu platzieren (gemischt-ganzzahliges Programm). Capar und Kuby (2012) transferieren das Problem in ein gemischt-binär-ganzzahliges Programm, das die Vorabberechnung der Kombinationen nicht benötigt und so besser auf große Szenarien angewendet werden kann. Kuby und Lim (2007) erweitern die Positionsmöglichkeiten, so dass die Infrastruktur auch auf den Kanten des Graphen positioniert werden kann. Sie untersuchen dabei Pfade, die normalerweise durch zwei Einrichtungen auf den Knoten abgedeckt werden, hinsichtlich der Möglichkeit, diesen durch eine Einrichtung auf der Kante zu bedienen. Bei dem ursprünglich formulierten FRLM werden die Pfade zwischen den Start- und Zielknoten als statisch vorausgesetzt und die Betankungsinfrastruktur entsprechend optimiert. Damit können Fahrzeuge die Betankungsinfrastruktur nicht nutzen, auch wenn die minimale Distanz zwischen dem Pfad und der Tankstelle in Relation zur Gesamtlänge des Pfades sehr gering ist. Kim (2010) erweitert daher das Modell um eine Bereitschaft der Fahrer von ihrem ursprünglichen Pfad abzuweichen (sog. *Deviation-Flow Refueling Location Model* (DFRLM)). Ein weitere Variante des FRLM stellt das *Mult-Period Flow-Refueling Location Model* (M-FRLM) von Chung und Kwon (2013) dar. Dieses Modell berücksichtigt die zeitlich dynamische Planung der Ladeinfrastruktur, d. h. die Stationen werden sukzessive über mehrere Perioden hinweg geplant und ausgebracht. Das heißt die Entscheidungsmöglichkeiten in Periode t sind abhängig von der Entscheidung in der Periode $(t - 1)$. Diese Einbeziehung der Zeit führt zu einem realistischeren Modell, da die Ladeinfrastruktur z. B. aufgrund von Budgets, der langsam steigenden Nachfrage oder technischen Restriktionen nicht in einer kurzen Zeitspanne geplant und verwirklicht werden kann. Auch beim M-FRLM geht die Annahme ein, dass die Fahrzeuge einen Ladestand von mind. 50% aufweisen, wenn sie in das Netzwerk eintreten. Für eine große Anzahl an Knoten, Kanten und möglichen Pfaden führt die Lösung dieser Modelle zu hohem Rechenaufwand. Deshalb entfernen die Autoren Pfade aus dem Netzwerk, die kürzer als die halbe Reichweite der Elektrofahrzeuge sind oder eine geringe Auslastung aufweisen.

Upchurch et al. (2009) führen Kapazitätsrestriktionen der Betankungsinfrastruktur ein, so dass nur eine bestimmte Anzahl an Fahrzeugen durch diese bedient werden können. Bei der Bestimmung der Kapazitäten in ihrem sog. *Capacitated Flow Refueling Location Model* (CFRLM) gehen die Autoren von mehreren Annahmen aus:

- die Kapazitäten können nur in diskreten modularen Einheiten erhöht werden,
- der Fahrzeugfluss ist über den Tag / die Woche gleichverteilt, d. h. die Betankungsinfrastruktur muss den durchschnittlichen Verkehrsfluss abdecken können und
- der Fahrer verhält sich optimal, d. h. er tankt an der Tankstelle und zu dem Zeitpunkt, die für ihn vorgesehen ist, damit er seine Fahrt absolvieren kann und nicht die Tankvorgänge der anderen beeinflusst.

Im Gegensatz zum FRLM maximiert das CFRLM die realisierten Kilometer der neuen Fahrzeuge anstatt die abgedeckten Ströme. Mit dieser Zielfunktion fokussieren Upchurch et al. sich darauf, dass soviel konventioneller Kraftstoff wie möglich durch den alternativen Kraftstoff ausgetauscht werden kann, wohingegen die Formulierung des FRLM das Ziel verfolgt, so viele Fahrzeuge wie möglich auszutauschen.

Das *Total Path Covering* Modell (TPCM) minimiert die Kosten der Ladeinfrastruktur unter der Vorgabe alle Ströme abzudecken, statt die abgedeckten Ströme bei vorgegebener Anzahl an Ladestationen zu maximieren [siehe z. B. MirHassani und Ebrazi (2013); Wang und Lin (2009)]. Lam et al. (2013) erweitern bei ihrem Optimierungsproblem das TPCM, so dass nicht nur die Deckung der Nachfrage unter Berücksichtigung der Fahrzeugreichweite als Nebenbedingung in das Modell eingeht, sondern auch die erforderliche Flächendeckung, die notwendig ist, um jeden Punkt innerhalb der untersuchten Stadt zu erreichen. Als Parameter geht in das sogenannte *Electric Vehicle Charging Station Placement* Problem (EVCSP) ein

- die durchschnittliche Gesamtreichweite der Elektrofahrzeuge,
- die Anzahl der Bewohner (auf den Knoten des Graphen),
- das Einkommen der Einwohner,
- die Dichte der Knoten und
- die Ausweichbereitschaft auf Ladestationen im näheren Umfeld ein.

Zur Vereinfachung blenden die Autoren bewusst die technischen Eigenschaften der Ladeinfrastruktur aus.

Zusammenfassend bringen die *Location-Allocation* Modelle eine hohe Vielfalt an Methoden mit, die für die Optimierung von Ladeinfrastrukturlayouts verwendet werden können. Allerdings klammern sie auch viele Aspekte aus, die für die Anforderungen relevant sind. Dieses betrifft z. B. die Modellierung der Nutzermobilität (A 1 – Nutzer und Nutzergruppen; A 3 – Aktivitätsgestaltung) oder die Kommunikationsfähigkeit der Nutzer (A 11 – Kommunikation).

2.3 Simulationsansätze

Neben den oben dargestellten *Location-Allocation* Modellen wurden diverse Simulationsanwendungen entwickelt, um das Problem der Ladestationsplatzierung und der Abdeckung der Nutzernachfrage zu lösen. Simulationsansätze haben den Vorteil, dass sie das modellierte System genauer beschreiben können als analytische Modelle und in der Lage sind, stochastische Prozesse abzubilden. Diesen Vorteilen stehen allerdings der erhöhte Aufwand bei der Modellbildung und der erhöhte Datenbedarf gegenüber. Simulationen werden häufig genutzt, um den Nutzer, sein Verhalten und seine Interaktion mit der Umwelt realitätsnah abzubilden. Somit ist es möglich, die von den *Location-Allocation* Modellen vernachlässigten Aspekte zu berücksichtigen (z. B. Standzeiten) oder restriktive Annahmen aufzuheben (z. B. Ladezustand der Fahrzeuge min. 50 %). Dieser Abschnitt beleuchtet Simulationsansätze, die sich mit dem Transferprozess von konventionellen zu elektrischen Fahrzeugen und der erforderlichen Ladeinfrastruktur beschäftigen.

2.3.1 Eindhoven Simulation

Kanters (2013) entwickelt eine agentenbasierte Simulation zur Planung von Ladeinfrastruktur unter Verwendung des Multi-Agenten Frameworks Netlogo. Das Planungsgebiet wird dafür in 40m mal 40m Zellen unterteilt, wobei jede Zelle einen potenziellen Standort für eine Ladestation darstellt. Entscheidend für die Platzierung der Ladestationen sind

1. die Kosten der Ladestationen,
2. die technischen Eigenschaften der Ladestationen und
3. die Standorte der Elektrofahrzeuge.

Letzteres ermittelt Kanters mithilfe eines mehrstufigen Vorgehens (s. Abbildung 6). Zunächst bestimmt er die Anzahl der Fahrzeuge pro betrachteter Zelle durch eine mehrstufige Berechnung. Zunächst werden die Fahrzeugzahlen sowohl für die Untersuchungsregion (Gemeinde Eindhoven) als auch für die Niederlande für das Jahr 2020 geschätzt (Extrapolation des Wachstums). Die Division dieser beiden Werte ergibt den erwarteten Fahrzeuganteil in Eindhoven in 2020. Das Ergebnis wird mit der Zielanzahl an elektrischen Fahrzeugen multipliziert, um die für die Untersuchung relevante Anzahl an Elektrofahrzeugen zu erhalten. Für jeden der Fahrtgründe *Wohnen*, *Arbeit* und *Sonstige* wird daraufhin separat bestimmt, wie viele Fahrzeuge sich in welchem Ortsteil/Stadtgebiet befinden. Diese Bestimmung findet mit Hilfe von Strukturdaten statt. *Wohnen* wird durch die Anzahl an angemeldeten Fahrzeugen bestimmt, *Arbeit* durch die Anzahl der Arbeitsplätze und *Sonstiges* durch die Fläche der einzelnen Zellen. Unter Verwendung einer Mobilitätsstudie bestimmt Kanters die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug zu einer bestimmten Zeit mit einem bestimmten Fahrtgrund in einer bestimmten Zelle parkt. Die Wahrscheinlichkeiten werden mit der Anzahl an Fahrzeugen pro Fahrtgrund der Zellen multipliziert

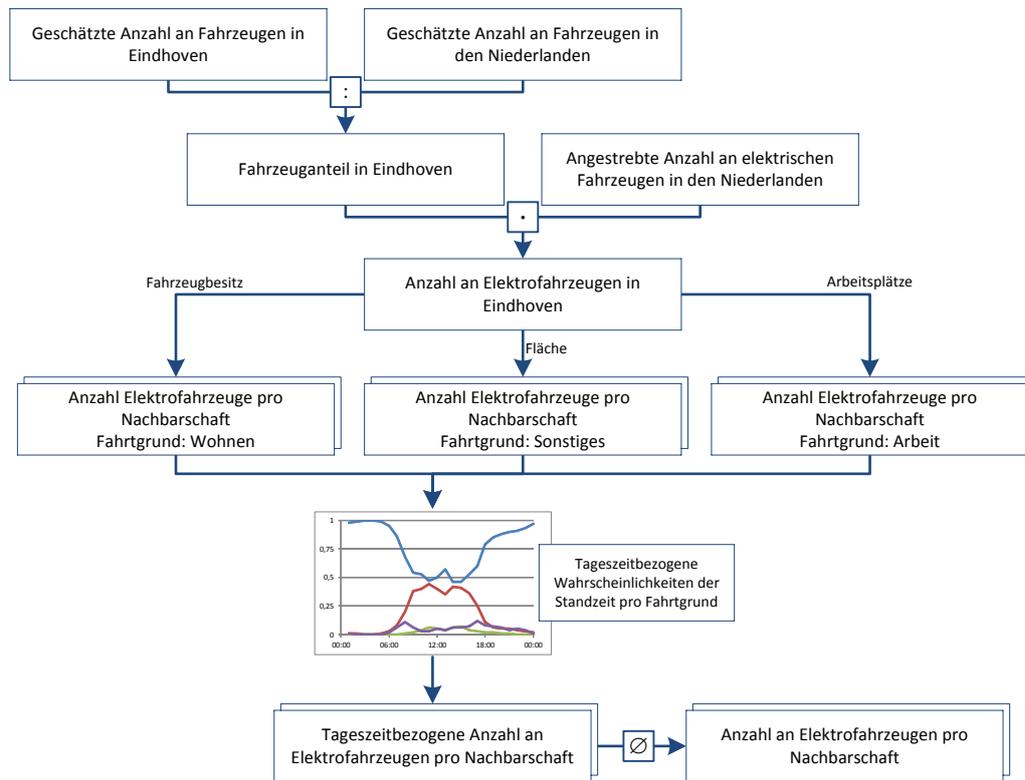


Abbildung 6 Ermittlung der durchschnittlichen Anzahl an Elektrofahrzeugen pro Zelle [Kanters (2013)]

und das arithmetische Mittel über den gesamten Tag gebildet, um die finale Anzahl an Fahrzeugen pro Zelle zu bestimmen.

Nach der Bestimmung der Anzahl an Elektrofahrzeugen pro Zelle und Fahrtgrund bewertet die Simulation sequenziell jeden dieser Standorte (s. Abbildung 7) und platziert eine Ladestation, wenn zwei Kriterien erfüllt sind:

1. die angebotene Ladeenergie muss größer als die nachgefragte Ladeenergie sein und
2. der erwartete Umsatz muss die Kosten der Ladestation decken.

Beide Bewertungskriterien sind abhängig von den im Abdeckungsbereich befindlichen Elektrofahrzeugen. Sind beide Bedingungen erfüllt, wird die Ladestation platziert und die Elektrofahrzeuge im Abdeckungsbereich als abgedeckt markiert (Abb. 7: 2). Diese Fahrzeuge werden aus der Bewertung der weiteren Ladestationen entfernt, was dazu führen kann, dass die Bedingungen durch angrenzende Standorte nicht mehr erfüllt werden und keine Platzierung stattfindet (Abb. 7: 3). Der Vorgang wird solange wiederholt bis alle potenziellen Standorte bewertet wurden.

Der Fokus der Arbeit liegt deutlich auf der Positionierung der Ladestationen. Kanters berücksichtigt zwar die Nutzermobilität (A 1 – Nutzer und Nutzergruppen) und extrahiert

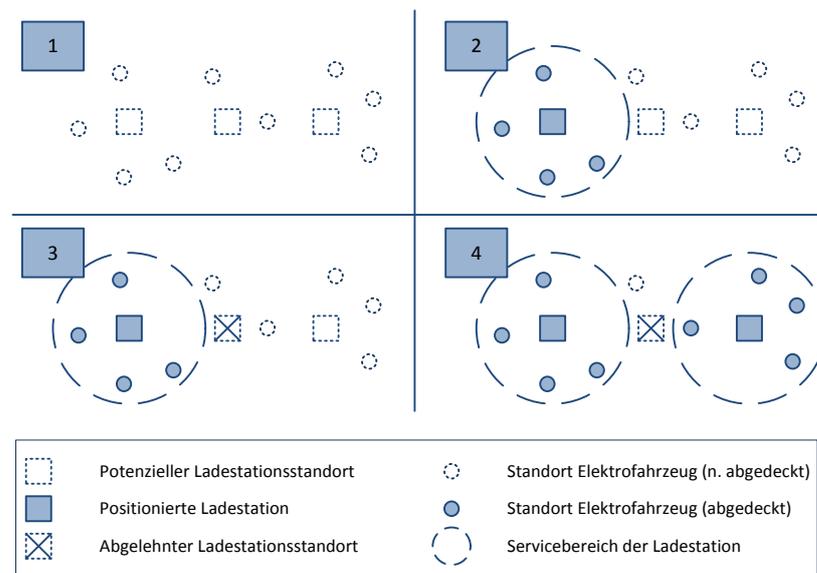


Abbildung 7 Vorgehen der Infrastrukturplatzierung nach Kanters (2013)

diese aus öffentlich zugänglichen Quellen (A 12 – Datenintegration), überführt diese jedoch in eine statische Darstellung. Darüber hinaus werden die technischen Eigenschaften der Fahrzeuge lediglich durch Durchschnittswerte vorgegeben (A 7 – Verbrauch; A 8 – Kapazität). Durch die fehlende Dynamik werden Standorte, Standzeiten, die zeitlich differenzierte Leistungsnachfrage vernachlässigt (A 10 – Zugang), wodurch weder nutzerseitig die Anwendbarkeit der Elektromobilität bewertet noch die Interaktion der Nutzer mit der Ladeinfrastruktur dargestellt werden kann.

2.3.2 Ohio Simulation

Xi et al. (2013) entwickeln ein Werkzeug, das die Bewegungen der Elektrofahrzeuge simuliert und die Ladestationen für diese Fahrzeuge optimal positioniert. Sie konzentrieren sich dabei auf die Ankunfts- und Abfahrtszeiten der Elektrofahrzeuge und bewerten die durch die Ladevorgänge verursachten Energietransfers. Xi et al. definieren zwei Ziele bei der Optimierung, die separat zu betrachten sind: die Maximierung der Anzahl an geladenen Fahrzeugen und die Maximierung der geladenen Energie. Die Mobilitätsdaten stellen die zentralen Eingangsdaten der Simulation dar. Die Autoren gehen davon aus, dass für das zu untersuchende Gebiet die Fahrzeugbewegungen zwischen den Verkehrszonen bekannt sind und in Form von fahrzeugspezifischen (synthetischen) Fahrplänen vorliegen. Das Vorgehen zur Bewertung und Optimierung der Ladeinfrastrukturlayouts besteht aus vier Schritten:

1. Bestimmung der Adoptionswahrscheinlichkeit,
2. Bestimmung von Fahrprofilen,

3. Simulation der Standzeiten sowie
4. Bestimmung der Standorte und Ausstattung der Ladeinfrastruktur.

Anhand von Adoptionswahrscheinlichkeiten wird bestimmt, wo und in welcher Menge konventionelle Fahrzeuge durch elektrische ersetzt werden. Dafür greifen sie auf die Regressionsanalyse von Curtin et al. (2009) zurück, die die lineare Funktion der Adoptionsquote von Plug-In Hybriden in Abhängigkeit von haushaltsdemografischen und makroökonomischen Variablen bestimmt haben. Xi et al. benutzen die geschätzten Parameter der Regression, um die Fahrzeuge in ihrem Untersuchungsgebiet virtuell durch Elektrofahrzeuge auszutauschen.

Nach der Bestimmung der Elektrofahrzeuge und deren Startpositionen werden Fahrtmuster für die Fahrzeuge bestimmt und diese simuliert. Bei ihrer Evaluation greifen die Autoren dazu auf ein bestehendes aktivitätskettenbasiertes Mobilitätsmodell der *Mid-Ohio Regional Planning Commission* (MORPC) zurück, das auf der Arbeit von Sener et al. (2009) basiert. Es erstellt aus demografischen Daten und mit Hilfe von Mobilitätsstudien eine synthetische Population inkl. derer Fahrtmuster für einen typischen Wochentag. Aus den ermittelten Bewegungsdaten des Mobilitätsmodells werden verkehrszonenbezogene Ankunfts- und Abfahrtszeiten bestimmt. Die Simulation berechnet in Abhängigkeit von der zur Verfügung stehenden Ladestationen und deren Ladeanschlüssen, die Anzahl der Fahrzeuge, die erfolgreich an den Zielorten geladen werden konnten. Abbildung 8 stellt die Logik exemplarisch dar. Das Fahrzeug stellt sich hierbei an eine Ladestation, sofern eine an dem Ziel vorhanden und frei ist und beginnt den Ladevorgang. Ansonsten parkt es an dem Standort ohne zu laden. Während der gesamten Standzeit verbleibt das Fahrzeug an der Ladestation – ungeachtet ob es bereits vollgeladen ist. Bei Abfahrt beendet das Fahrzeug den Ladevorgang auch wenn es noch nicht voll geladen ist. Zur Bestimmung des Ladezustandes des Fahrzeugs an den jeweiligen Zielorten wird die Distanz des Fahrzeugs von der Startzone bis hin zu der betrachteten Ladestation berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug mit der maximalen Kapazität startet. Der Ladezustand an einem Ziel eines Fahrzeugs ergibt sich durch:

$$\max(Kapazität_{min}, Kapazität_{max} - Verbrauch \cdot Distanz_{Start, Position}) \quad (1)$$

Zwischenladungen, die vor dem aktuellen Stopp durchgeführt wurden, werden demnach vernachlässigt. Xi et al. haben zur Überprüfung ein kompliziertes Simulationsmodell, das Zwischenladungen berücksichtigt, mit dem oben dargestellten verglichen. Der Vergleich des Testszenarios hat ergeben, dass das vereinfachte Modell die abgenommene Energiemenge je nach Budgetlimit um 3 – 3,5 % überschätzt. Des Weiteren kann an der Bestimmung der Kapazität erkannt werden, dass die Fahrzeuge nicht aufgrund von fehlender Energie liegen bleiben können.

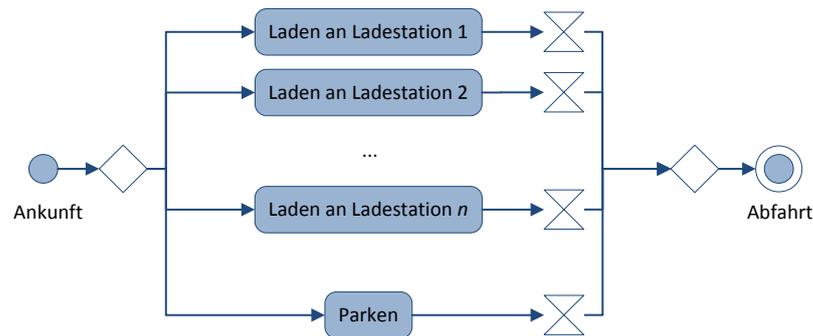


Abbildung 8 Simulative Abbildung von Lade- und Standzeiten [Xi et al. (2013), S. 3]

Die Ergebnisse der Simulation dienen als Eingangsparameter für ein lineares ganzzahliges Programm, das die Anzahl und Positionen der Ladestationen bestimmt. Zielfunktion ist, wie oben erwähnt, entweder die Maximierung der Anzahl an geladenen Fahrzeugen oder die Maximierung der geladenen Energiemenge. Dabei werden zwei Anschlussleistungen und deren Kosten sowie die notwendigen Transformatoren inkl. Kosten bei der Optimierung berücksichtigt. Insgesamt müssen die Anschlussleistungen mit den Transformatorleistungen abgestimmt sein, und die Kosten für die Ausbringung der Ladeinfrastruktur und die notwendigen Transformatoren dürfen nicht ein vorher bestimmtes Budgetlimit überschreiten.

Zusammenfassend liegt der Fokus der Arbeit von Xi et al. (2013) auf der Bestimmung der Ladeinfrastruktur. Im Gegensatz zu Kanters (2013) weist die Simulation von Xi et al. eine höhere Dynamik auf. Zum Beispiel nutzt die Simulation individuelle Tagespläne der Nutzer und bildet diese dynamisch ab. Allerdings fehlt bei der Modellierung die durchgängige Darstellung der Nutzermobilität, da lediglich die Fahrten vom Heimpunkt zu dem jeweils betrachteten Standort für die Bestimmung des Ladebedarfs berücksichtigt und Zwischenstopps vernachlässigt werden (A 3 – Aktivitätsgestaltung). Dadurch sind nutzerspezifische Metriken nicht berechenbar und somit die operative Adoptionsmöglichkeit des Nutzers nicht bewertbar (A 4 – Operative Kennzahlen). Ein weiterer Nachteil liegt darin, dass nur ein Tag simuliert wird. Für den Privatverkehr mag diese Annahme nicht sehr ins Gewicht fallen, da i. d. R. davon ausgegangen werden kann, dass die Fahrzeuge abends Zuhause sind, ein Stromanschluss zur Verfügung steht (Laternenparker ausgenommen) und die Fahrzeuge demnach mit voll geladener Batterie starten. Für gewerbliche Flotten trifft dies jedoch nicht zu, da die letzte Fahrt nicht zwangsläufig am eigenen Betriebsgelände endet (A 1 – Nutzer und Nutzergruppen). Darüber hinaus wird der Ladevorgang als Warteschlangensystem modelliert, in dem eine Allokation der Fahrzeuge nach anderen Mechanismen schwierig ist. Die Darstellung von Reservierungssystemen ist dadurch nicht möglich (A 11 – Kommunikation).

2.3.3 Simulation of Urban Mobility (SUMO)

Hess et al. (2012) nutzen einen genetischen Algorithmus in Kombination mit dem Verkehrssimulator *Simulation of Urban Mobility* (SUMO), um die Ladeinfrastruktur in Wien optimal zu platzieren. Die Autoren erweitern SUMO um zwei Modelle. Zunächst wird ein Lade-/Entlademodell eingeführt, das den Entladungsprozess der Batterie bei der Fahrt bzw. den Ladeprozess der Batterie bei notwendigen Zwischenstopps beschreibt. Die Ab- und Zunahme des State of Charge (SOC) wird in der Arbeit als linear angenommen. Die Abnahme ist abhängig von der zurückgelegten Distanz in Kilometer, die Zunahme von der Ladeleistung, die in Prozent pro Zeiteinheit angegeben ist. Das zweite Modell ist ein sog. *Attraction* Modell, das zum Einsatz kommt, wenn der Ladezustand eines Fahrzeugs unterhalb einer vorher definierten Grenze fällt. In diesem Fall wird das Fahrzeug die aktuelle Route verlassen und die nächste Ladestation anfahren. Nach welchen Kriterien diese Auswahl stattfindet, kann explizit in dem *Attraction* Modell implementiert werden. Hess et al. wählen in ihrem Experiment die Ladestation mit der geringsten Entfernung zur aktuellen Position, um mögliche Ausfälle auszuschließen. Sie optimieren die Ladestationen mithilfe eines genetischen Algorithmus, der die Fahrtzeiten der Fahrzeuge minimiert. Die Simulation und die Optimierung wird für einen Testfall in Wien angewandt. Jede Stunde werden 720 Fahrzeuge in die Simulation eingebracht, wobei die Start- und Zielpositionen probabilistisch (gleichverteilt) bestimmt werden. Daraufhin werden sechs potenzielle Standorte bewertet und die Anzahl an Ladeanschlüssen bestimmt. An welchen Punkten innerhalb Wiens diese potenziellen Standorte sind und wie der Algorithmus die Startlösungen variiert, ist nicht näher beschrieben.

Gharbaoui et al. (2013) greifen ebenfalls für die Bewertung von Ladeinfrastruktur auf die Verkehrssimulation SUMO zurück. Sie erweitern ähnlich wie Hess et al. (2012) die Simulation um die Berücksichtigung der Lade- und Entladeverhalten der elektrischen Fahrzeuge. Auch sie nehmen einen linearen Zusammenhang zwischen der gefahrenen Distanz und der Entladung der Batterie sowie der Ladeleistung der Ladestation und der Ladung der Batterie an. Die Autoren setzen voraus, dass die Standorte an Parkplätzen in der Nähe der Aktivitäten sind und erweitern daher das Simulationswerkzeug um die Möglichkeit der Modellierung von Parkplätzen und Ladestationen. Das Mobilitätsverhalten der Fahrzeugnutzer ist laut Gharbaoui et al. aktivitätsorientiert, wobei die eigentliche Aktivitätsmodellierung nur oberflächlich beschrieben ist. Innerhalb der Simulation wird jede Aktivität einzeln abgehandelt, indem für das jeweilige Fahrzeug eine Aktivität stochastisch ermittelt sowie die Hin- und Rückroute des Fahrzeugs vom Startpunkt zu der Aktivität

ermittelt wird.² Die modellierten Informationen über die Ladestationen (z. B. Stellplätze) und die Belegung der Ladeinfrastruktur entscheiden darüber, ob die Fahrzeuge laden können. Die Autoren verwenden für die Allokation der Fahrzeuge eine einfache First Come First Serve Strategie. Die Fahrzeuge starten in die Simulation mit einer zufällig gewählten Kapazität zwischen 10 % und 40 %. Die Standzeiten werden nicht aktivitätsorientiert ermittelt (z. B. dass im Mittel die Aktivität Arbeit eine längere Standzeit aufweist als die Aktivität Einkauf), sondern gleichverteilt mit einem Intervall von 20 bis 40 Min bestimmt.

Im Gegensatz zu den oben genannten Simulationsansätzen konzentrieren sich die Arbeiten von Hess et al. (2012) und Gharbaoui et al. (2013) auf das Nutzerverhalten. Das wird besonders durch die umfangreicheren Aktionsmöglichkeiten der Nutzer innerhalb der Simulation und die Nutzung nutzerspezifischer Metriken (z. B. Minimierung der Fahrzeiten) deutlich (A 4 – Operative Kennzahlen). Aber auch hier fehlt die letzte Konsequenz, weil die Durchgängigkeit der Nutzermobilität fehlt. Die Ansätze erzeugen rein zufällig den Verkehr und die Batteriekapazitäten der Fahrzeuge. Auch hier fehlt eine durchgängige Betrachtung der individuellen Mobilität (A 3 – Aktivitätsgestaltung). Eine nutzerspezifische Bewertung der neuen Technologie ist mit diesen Ansätzen ebenfalls nicht möglich (A 1 – Nutzer und Nutzergruppen).

2.3.4 Agent-Based Transport Simulations (MATSim)

Galus et al. [Galus et al. (2009); Galus et al. (2011); Galus et al. (2012b); Waraich et al. (2009)] schlagen eine Kombination der drei Domänen *Fahrzeugtechnik*, *Transport-* und *Energiesystem* zur Bewertung der Verbreitung von elektrischen Fahrzeugen vor. Der Fokus liegt auf der Bewertung von Ladestrategien auf die Betriebsmittelauslastung des Energienetzes. Die Arbeit verwendet dabei die Transportsimulation MATSim für die Darstellung der Verkehrs- und Energienachfrage.

MATSim ist ein agentenbasiertes Simulationssystem und stellt die Nutzer und deren Tagespläne individuell dar [Balmer et al. (2009); MATSim (2014a)] (s. Abschnitt 3.4.2 für eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise von MATSim). Die Agenten optimieren in einem iterativen Prozess ihren Tagesablauf durch Adaption der Aktivitäten und der Fahrten, z. B. Wahl des Startzeitpunktes einer Aktivität oder durch Routenwahl.

Für die Bewertung der Elektromobilität verknüpfen die Autoren MATSim mit zwei Modellen. Zum einen werden die technischen Eigenschaften der Elektrofahrzeuge integriert

² Wie das stochastische Modell die Aktivitäten und deren Reihenfolge ermittelt und wie die Ortswahl stattfindet kann dem Beitrag nicht entnommen werden. Aussagen über die Eingangsquellen für ein solches Modell werden ebenfalls nicht getätigt.

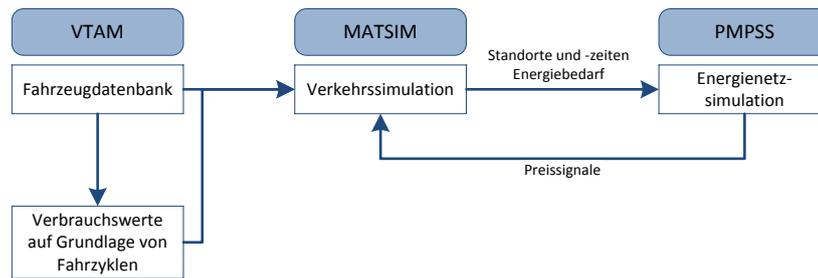


Abbildung 9 Zusammenspiel zwischen Fahrzeug-, Verkehrs- und Energienetzsimulator (komprimierte Darstellung) [Galus et al. (2012b)]

(Modell: VTAM) und zum anderen wird MATSim an eine Energienetzsimulation (Modell: PMPSS) gekoppelt, um die Wechselwirkung von Elektrofahrzeugen und Betriebsmittelauslastung evaluieren zu können (s. Abbildung 9). VTAM stellt die spezifischen Verbräuche der Fahrzeuge bereit. Diese wurden durch Fahrzyklen bestimmt und sind abhängig vom Antriebsstrang, Energieträger, Leistung und Gewicht des Fahrzeugs. Durch Regressionsanalysen wird der fahrzeugspezifische Verbrauch in Abhängigkeit der Geschwindigkeit beschrieben und an MATSim übergeben. Die Kopplung von MATSim und PMPSS erfolgt über die wechselseitige Übergabe von Simulationenwerten nach jeder Iteration. MATSim übergibt dabei Standort, Standzeit und Energiebedarf an PMPSS. Die Energienetzsimulation berechnet den Energienetzstatus und verteilt die zur Verfügung stehende Leistung mithilfe eines spieltheoretischen Ansatzes an die angeschlossenen Fahrzeuge. Neben der Leistung werden zudem Preissignale an die Fahrzeuge weitergegeben, damit diese ihr Verhalten (innerhalb des iterativen Optimierungsprozesses) adaptieren können. Die Nutzenfunktion der einzelnen Agenten bewertet die Kosten der Ladevorgänge als negativen Nutzen, und der Optimierungsprozess versucht, diesen zu minimieren.

Die Transportsimulation MATSim hat seine Ursprünge in der Verkehrsforschung und bildet die zeitlichen und räumlichen Prozesse nutzerspezifisch ab. Durch die Agentenorientierung stellt es zudem die Möglichkeit bereit, Nutzer individuell mit eigenen Tagesfahrplänen zu modellieren und so durchgängige Aktivitätsketten inkl. Fahrten bewerten zu können (A 3 – Aktivitätsgestaltung). Galus et al. haben gezeigt, dass auch die technischen Eigenschaften der Fahrzeuge integriert werden können (A 7 – Verbrauch; A 8 – Kapazität). Lediglich die Positionierung und Skalierung der Ladeinfrastruktur wird nicht betrachtet (A 10 – Zugang). Zusammenfassend stellt MATSim ein potenzielles Werkzeug dar, um die Anforderungen dieser Arbeit zu erfüllen. Eine weiterführende Diskussion über die Anwendbarkeit von MATSim erfolgt in den Abschnitten 2.4 und 3.5.

2.4 Zusammenfassung und Diskussion

Die oben dargestellten verwandten Arbeiten zeigen, dass eine Vielzahl von Methoden existiert, wie der Bedarf von Nutzern oder Nutzergruppen bestimmt werden kann und wie eine Ladeinfrastruktur zu errichten ist, um diesen zu decken. In diesem Abschnitt werden die Ansätze hinsichtlich ihres Abdeckungsgrads bewertet. Das Ergebnis ist zusammenfassend in Tabelle 2 dargestellt.

Die entwickelten Werkzeuge für die Entscheidungsunterstützung einzelner Stakeholder decken dabei am wenigsten die Anforderungen dieser Arbeit ab. Die dargestellten Arbeiten zeigen, dass diese Werkzeuge entweder einen sehr speziellen Anwenderkreis adressieren oder nur ein bestimmtes Szenario bzw. eine bestimmte Region bewerten. Die Modelle arbeiten meist nur auf Durchschnittswerten und/oder weisen einen geringen Formalisierungsgrad auf. Eine Übertragung der Methoden auf andere Regionen bzw. die Adaption der Methoden für ähnliche Fragestellung ist daher nur schwer möglich. Ausnahme stellt die Arbeit von Kley (2011) dar. Er integriert viele der Aspekte, die auch für diese Arbeit von Relevanz sind. So werden die technischen Eigenschaften und Zugangsmöglichkeiten der Infrastruktur (A 9 – Technische Lösung; A 10 – Zugang), die technischen Eigenschaften der Fahrzeuge (A 7 – Verbrauch; A 8 – Kapazität) sowie die durchgängige Nutzermobilität bei der Bewertung berücksichtigt (A 1 – Nutzer und Nutzergruppen; A 3 – Aktivitätsgestaltung). Darüber hinaus bewertet Kley durch die Verwendung der Daten des deutschen Mobilitätspanels die nutzergruppenspezifische Integrationsfähigkeit von Elektrofahrzeugen. Damit werden grundsätzliche Eigenschaften der Ladeinfrastruktur ermittelt. Kley klammert allerdings die räumliche Perspektive bei seinen Untersuchungen aus (A 5 – Strukturdaten; A 6 – Verkehrsnetz) und arbeitet mit starken Vereinfachungen.

Das räumliche Problem der Zusammenführung von Angebot und Nachfrage (an Ladeleistung) wird von Ansätzen aus dem *Operation Research* (*Facility Location* Modelle) aufgenommen. Sie verwenden und lösen dafür mathematische Gleichungssysteme. Die anfangs einfach gehaltenen Modelle wurden dabei stetig weiterentwickelt und berücksichtigen immer mehr Aspekte. So wurde z. B. die Möglichkeit einer Abweichung der Nutzer von den ursprünglichen Pfaden integriert oder eine mehrjährige stufenweise Ausbringung der Infrastruktur betrachtet. Dennoch wurde der Komplexität des Problems immer wieder mit Vereinfachungen des Modells oder des Lösungsraums begegnet. Die *Facility Location* Modelle bspw. berücksichtigen die Nachfrage nur statisch, d. h. von einer Zone oder von einer Kante des Straßengraphen ausgehend. Auf die Anforderungen der einzelnen Individuen wird nicht eingegangen. Einige Modellformulierungen vernachlässigen wegen der Fokussierung auf die Brennstofftechnologie die technischen Eigenschaften der Fahrzeuge, da diese für das jeweilige Szenario nicht entscheidend sind. Modelle, die sich auf Elektrofahrzeuge konzentrieren, berücksichtigen zwar die Batteriekapazität, vernachlässigen

sigen allerdings aufgrund der fehlenden Dynamik die Verbrauchs- und Ladeverläufe. Darüber hinaus ist bei den Modellen nicht immer deutlich wie die Nachfrage der Kanten bzw. Zonen entstehen. Die Flow-based Location Modelle führen eine Dynamik ein, indem die Pfade der Fahrzeuge als Nachfrage betrachtet werden. Damit erfolgt auch eine detailliertere Modellierung der Fahrzeuge, da die Reichweite eine entscheidende Rolle bei der Positionierung der Ladestationen entlang der Pfade spielt. Dennoch werden auch hier Vereinfachungen durchgeführt, um die mathematischen Probleme lösen zu können. Diese werden dadurch erreicht, dass Pfade mit geringer Auslastung und mit geringer Entfernung aus der Menge entfernt werden und dass angenommen wird, dass die Fahrzeuge immer mit 50 % der Reichweite in das System eintreten. Ansätze, die nicht die Elektromobilität adressieren, vernachlässigen die Leistung der Ladestationen. Zudem fehlt den Modellen eine durchgängige Nutzermodellierung, die auch die Fahrten und Tankvorgänge berücksichtigt, die abseits des untersuchten Netzes stattfinden. Somit erfüllen diese Modelle nicht die Anforderung dieser Arbeit an den notwendigen Detaillierungsgrad der Nutzermodellierung (A 1 – Nutzer und Nutzergruppen). Darüber hinaus ist nicht ermittelbar, welchen Einfluss technologische Änderungen der Fahrzeuge oder der Ladeinfrastruktur auf die nutzerspezifische Integrierbarkeit der Fahrzeugkonzepte haben (A 9 – Technische Lösung; A 11 – Kommunikation).

Simulationsansätze im Kontext der Bewertung von Elektromobilität haben gezeigt, dass sie geeigneter sind die räumlichen und zeitlichen Prozesse abzubilden und somit die Lücke zu schließen, die die oben erwähnten Ansätze offen gelassen haben. Der zentrale Vorteil der Simulationsansätze ist die individuelle Modellierung der Nutzer und deren Bewegungen. Erst dadurch ist es möglich, durchgängig die Mobilitätsmuster darzustellen, diese mit den Verbrauchs- und Ladeverläufen der Fahrzeuge zu koppeln und letztendlich die Adoptionsfähigkeit von einzelnen Nutzern zu bewerten. Die in diesem Kapitel dargestellten Ansätze zeigen allerdings auch auf, dass sich die Simulatoren durch ihren Detaillierungsgrad und der Art der Modellierung (insb. der Nutzermobilität) unterscheiden. Erweiterte Verkehrssimulatoren (MATSim und SUMO) decken dabei den größten Teil der Anforderungen dieser Arbeit ab. MATSim bildet den Nutzer individuell ab, indem dieser Entscheidungsmöglichkeiten über Routenwahl und Tankvorgänge hat. Es entsteht so eine räumlich und zeitlich differenzierte Interaktion der Nutzer mit der Umwelt (Ladeinfrastruktur). Darüber hinaus werden die technischen Eigenschaften der Fahrzeuge berücksichtigt. Der Fokus der Arbeiten mit MATSim im Zusammenhang mit der Elektromobilität ist allerdings die Anbindung an die Energiesimulation. Demnach wird die Integrationsfähigkeit der Fahrzeuge sowie die notwendige Ausstattung der Ladeinfrastruktur vernachlässigt. Die Arbeiten um das Simulationswerkzeug SUMO haben genau diesen Fokus. Sie bewerten die Ausstattung und Positionierung der Ladeinfrastruktur, indem sie die Bewegungen und Ladevorgänge der Nutzer simulieren. Im Gegensatz zu

Tabelle 2: Abdeckungsbereiche der Methoden zur Bewertung von Elektromobilität

Methode	Quelle	A 1 – Nutzer und Nutzergruppen	A 2 – Haushaltsstandorte	A 3 – Aktivitätsgestaltung	A 4 – Operative Kennzahlen	A 5 – Strukturdaten	A 6 – Verkehrsnetz	A 7 – Verbrauch	A 8 – Kapazität	A 9 – Technische Lösung	A 10 – Zugang	A 11 – Kommunikation	A 12 – Datenintegration	A 13 – Erweiterbarkeit
Argumentativ-deduktive Analyse	[Cheng et al. (2008)]	●								○				●
Argumentativ-deduktive Analyse	[May und Matilla (2009)]		○							○				●
Argumentativ-deduktive Analyse	[Morrow et al. (2008)]			○						○				●
Facility Location Model	[Bapna et al. (2002); Bersani et al. (2009); Chan et al. (2007); Goodchild und Noronha (1987); Jia et al. (2012)]					○	●			○				
Facility Location Model	[Ge et al. (2011); He et al. (2012); Lin et al. (2008); Liu et al. (2012)]					○	●			○				
Flow-based Location Model	[Capar und Kuby (2012); Kuby und Lim (2005); Kuby und Lim (2007); Lam et al. (2013)]						●			○				
Flow-based Location Model	[Chung und Kwon (2013); Kim (2010); Upchurch et al. (2009)]						●			○				
Formale Analyse	[Kley (2011)]				○					●				
Simulation (MATSim)	[Galus et al. (2011); Galus et al. (2009); Galus et al. (2012); Warach et al. (2009)]			●		●	●	○	○	○				●
Simulation (SUMO)	[Gharbaoui et al. (2013)]					●	●	○	○	○		●		●
Simulation (SUMO)	[Hess et al. (2012)]				○	●	●	○	○	○		●		●
Simulation (Netlogo)	[Kanters (2013)]					●	●	○	○	○				●
Simulation	[Xi et al. (2013)]					●	●	○	○	○				●

● = Anforderung erfüllt; ○ = Anforderung teilweise erfüllt

MATSim ist es den (simulierten) Nutzern während der Simulation möglich, ihre geplante Route für Tankvorgänge zu verlassen. Somit können die dadurch entstehenden Umwege und Wartezeiten bewertet werden. Die Arbeiten um SUMO lassen allerdings eine detaillierte Modellierung des Nutzers vermissen (insb. die Verknüpfung von Aktivitäten). Die Ansätze verwenden zufällige Verkehrsnachfragen, um die Analysen durchführen zu können. Damit ist die Bewertung der Integrationsfähigkeit auf Nutzerseite nicht möglich.

Diese simulationsbasierten Herangehensweisen stellen die größte Übereinstimmung mit dem Anforderungsprofil dieser Arbeit dar, wobei nicht alle Aspekte berücksichtigt werden. Insbesondere die Interaktionsfähigkeit der einzelnen Nutzer untereinander bzw. der Nutzer mit der Infrastruktur ist bisher nur unzureichend behandelt worden. Somit ist der Effekt von technischen Kommunikationsmitteln auf die Integrationsfähigkeit der Elektrofahrzeuge mit den Werkzeugen aus den dargestellten Arbeiten nicht möglich, obwohl diese als zentral für die Ausbringung von Elektrofahrzeugen angesehen werden [Hess et al. (2012); Gharbaoui et al. (2013)]. Die Simulationsansätze weisen zudem Schwächen bei der Nutzermodellierung auf. Sämtliche Ansätze betrachten lediglich den Privatverkehr. Gerade gewerbliche Flotten bieten aufgrund der hohen Auslastung der Fahrzeuge und der hohen Planbarkeit der Fahrten ein großes Potenzial für die Adoption der neuen Fahrzeugtechnologie [ISI (2012), S. 13; Arnold et al. (2010), S. 62; Hoberg et al. (2010), S. 20; Peters und Dütschke (2010), S. 20]. Ein Ansatz zur Bewertung der Integrationsfähigkeit sollte daher diese Nutzergruppen berücksichtigen können. Darüber hinaus stellen die simulationsbasierten Ansätze, mit Ausnahme von MATSim, die Nutzermobilität nicht durchgängig dar, d. h. eine Verkettung und Verortung von Aktivitäten auf Nutzerebene findet nicht statt.

Aufgrund der hohen Abdeckung der Anforderungen dieser Arbeit durch die simulationsbasierten Ansätze werden diese im weiteren Verlauf dieser Arbeit detaillierter betrachtet. Es hat sich herausgestellt, dass Simulationsanwendungen, die auf die Verkehrsinfrastrukturbewertung ausgerichtet sind, bereits eine große Methodenvielfalt bezüglich der Modellierung von Nutzerverhalten mitbringen. Mit diesen Methoden befasst sich das nächste Kapitel und prüft welche Methoden in dieser Arbeit verwendet bzw. adaptiert werden können.

3 Modellierung und Simulation von Nutzermobilität

Das vorangegangene Kapitel hat deutlich gemacht, dass ein Großteil der Ansätze zur Analyse des Systems der Elektromobilität die Darstellung der individuellen Nutzermobilität vernachlässigen. Vor dem Hintergrund der in Abschnitt 1.2 geforderten räumlich und zeitlich differenzierten Betrachtung (s. Z 1) und den daraus abgeleiteten Anforderungen in Abschnitt 1.3.1 ist die Ermittlung, Darstellung und Simulation dieser individuellen Mobilitätsmuster ein entscheidender Faktor bei der Bewertung der nutzerspezifischen Adoptionsmöglichkeiten der neuen Fahrzeugtechnologie. Das in dieser Arbeit entwickelte Bewertungswerkzeug muss demnach Modelle bereitstellen, mit denen die Aufenthaltsorte und Standzeiten der Fahrzeuge durchgängig abgebildet werden können.

Im Bereich der Verkehrsforschung ist die Bestimmung und Abbildung der Verkehrsnachfrage eine zentrale Aufgabe zur Bewertung von Verkehrsinfrastruktur. In diesem Zusammenhang sind eine Vielfalt an Modellen und Frameworks entstanden. Dieses Kapitel beleuchtet daher den Stand der Technik bei der Modellierung und Simulation von Nutzermobilität mit dem Ziel, die angewandten Methodiken dahingehend zu überprüfen, ob sie geeignet sind, die Mobilitätsmuster entsprechend der Anforderungen dieser Arbeit darzustellen. Dabei wird neben der Abbildungsmöglichkeit auch die Möglichkeiten der Kalibrierung untersucht, um entsprechend Anforderung A 12 – Datenintegration eine einfache Verwendung von zugänglichen Daten zu ermöglichen.

Das Kapitel ist wie folgt organisiert: Zunächst erfolgt die Darstellung der generellen Herangehensweise zur Modellierung von Verkehrsnachfrage und deren Umlegung auf das Verkehrsnetz (Abschnitt 3.1). Mit Hinblick auf die Anforderungen dieser Arbeit wird die aktivitätsbasierte Modellierung inkl. der drei Unterschritte Populationssynthese (3.2), Aktivitätsgenerierung (3.3) und Simulation (3.4) näher beleuchtet. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion über die Anwendbarkeit der Ansätze für die Aufgabenstellung dieser Arbeit.

3.1 Generelle Modellierungsarten

In den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde das Grundmodell erstellt, mit dem Verkehrsszenarien entwickelt und bewertet werden können. Das generelle Vorgehen des sog. klassischen Verkehrsmodells (aufgrund der vier Teilmodelle auch 4-Stufen-Modell genannt) ist heute noch gültig und wird von vielen Frameworks genutzt, wobei die Methoden innerhalb der einzelnen Teilmodelle sich sukzessive verbessert haben und immer detaillierter geworden sind [Dios Ortúzar und Willumsen (2011), S. 20]. Diese Modelle haben die Aufgabe, die Verkehrsnachfrage zu bestimmen und auf die Verkehrsnetze zu verteilen, damit Verkehrsplaner Probleme innerhalb der Verkehrsinfrastruktur identifizieren und Maßnahmen bewerten können. In der Regel werden für die Modelle die Ver-

kehrnetze des Untersuchungsgebiets bestimmt sowie das Untersuchungsgebiet in Zonen (sog. Traffic Analysis Zones (TAZ)) eingeteilt, die durch unterschiedliche demographische Daten charakterisiert sind. Diese Daten dienen als Grundlage für die vier Stufen des klassischen Verkehrsmodells (s. Abbildung 10). Der Prozess beginnt mit der Verkehrserzeugung. Die demographischen Daten bestimmen bei diesen Modellen welche Fahrzeugmengen die jeweilige Zone in das System einbringt und welche sie absorbiert. In dem zweiten Schritt, der Verkehrsverteilung, werden diese Quell- und Zielmengen miteinander kombiniert, so dass eine Verknüpfung zwischen den einzelnen Zonen stattfindet. Dabei kommen häufig Gravitationsmodelle zum Einsatz, in denen die Anziehungskraft einer Zone in Abhängigkeit ihrer demografischen Daten (z. B. Anzahl an Arbeitsplätzen) und der Entfernung zu einer betrachteten Quellzone beschrieben wird. Der dritte Schritt besteht aus der Aufteilung des Verkehrs auf die einzelnen Verkehrsmittel. Der letzte Schritt teilt die unterschiedlichen Verkehrsbeziehungen der Zonen auf die jeweiligen Netze auf und bestimmt deren Belastung. Diese Aufteilung kann dabei, je nach Datenverfügbarkeit, statisch oder zeitlich differenziert erfolgen. Generell sieht das Modell auch Rückschleifen zu vorherigen Teilschritten vor, da die Entscheidungen nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können. Zum Beispiel ist die Wahl des Verkehrsmittels abhängig von der Belastung des jeweiligen Netzes, so dass ggf. auf ein anderes Verkehrsmittel ausgewichen wird, wenn das zunächst präferierte Netz überlastet ist. Generell müssen die vier Stufen nicht sequentiell und getrennt voneinander betrachtet werden [Dios Ortúzar und Willumsen (2011), S. 22]. Neben der Streckenbelastung stellen Quell-Ziel-Matrizen, die die einzelnen Fahrten zwischen den Zonen beschreiben, zentrale Ergebnisse der Modelle dar. Insgesamt liegt der Vorteil des 4-Stufen-Modells in dessen einfachen Anwendbarkeit und den geringen Datenanforderungen. Aufgrund seiner Konzentration auf einzelne Fahrten zwischen den Zonen bringt es gewisse Nachteile mit sich [Balmer (2007), S. 6]. Es vernachlässigt das Verhalten des einzelnen Verkehrsteilnehmers und die Gestaltung seiner täglichen Aktivitäten. Die Einzelfahrten sind weder zeitlich noch räumlich miteinander verknüpft, was zu Verzerrungen in der Darstellung führen kann [Bhat et al. (2003b), S. 7; Sivakumar (2007)]. Dieser Aggregationslevel kann darüber hinaus zu falschen Bewertungen von Verkehrsmaßnahmen führen, da die Modelle nur eine begrenzte Reaktionsmöglichkeit seitens der Verkehrsteilnehmer antizipieren. Sie können zum Beispiel die Verkehrsmittel- oder Routenwahl betrachten, vernachlässigen aber, dass die Teilnehmer Aktivitäten zu anderen Zeitpunkten und Tagen sowie an anderen Orten durchführen können oder Aktivitäten anders arrangieren können, um auf eine veränderte Situation zu reagieren [Dios Ortúzar und Willumsen (2011), S. 21–22].

Seit den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts wurden aufgrund der Kritik zunehmend personen- und demnach verhaltensorientierte Herangehensweisen zur Modellierung von Verkehrsverhalten verwendet [Hägerstrand (1970); Jones (1979)]. Der Kern der Ansätze

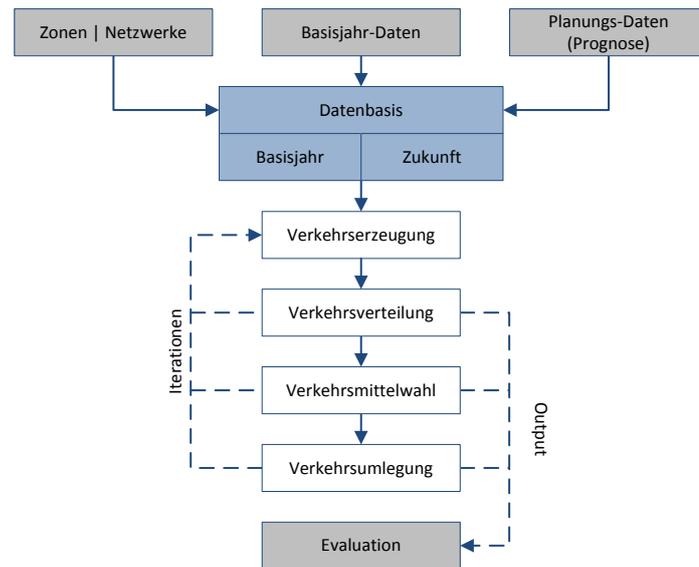


Abbildung 10 Klassisches Verkehrsmodell (4-Stufen-Modell)

ist die Erkenntnis, dass Verkehr kein Selbstzweck darstellt, sondern aus dem Bedürfnis des Bürgers nach bestimmten Aktivitäten heraus entsteht. Diese Aktivitäten sind räumlich verteilt und können nicht Zuhause durchgeführt werden, wodurch eine Ortsverschiebung stattfinden muss [Chapin (1974)]. Zeitpunkt und Ziel einer Ortsveränderung kann dabei abhängig von internen oder externen Faktoren sein, wie z. B. die Straßenbelastung, Fahrzeugverfügbarkeit, Aktivitätspläne anderer Personen im selben Haushalt etc. Um ein besseres Verständnis von Verkehr und seiner Entstehung zu erhalten, ist laut Bhat und Koppelman ein Verständnis von Aktivitätsentscheidungen ein vielversprechender Ansatz [Bhat und Koppelman (1993), S. 433]. Es können damit nicht nur direkte verkehrsbezogene Maßnahmen bezogen auf den Effekt der Verkehrsbelastung evaluiert werden, sondern auch Effekte, die nicht unmittelbar mit dem Verkehr zu tun haben. Zum Beispiel kann das gestiegene Umweltbewusstsein seitens der Verkehrsteilnehmer dazu geführt haben, dass Aktivitäten besser miteinander verknüpft werden, um überflüssige Fahrten zu vermeiden. Die klassischen Methoden sind nicht in der Lage diese Aspekte abzubilden, da sie nur die Strukturdaten der Region zur Bestimmung der Verkehrsnachfrage nutzen.

Abbildung 11 stellt das generelle Vorgehen von aktivitätsbasierter Verkehrsnachfragegenerierung dar. Dieses sieht zunächst die Bildung einer synthetischen Population vor. Diese Population entspricht nicht der realen Population (aufgrund meist nicht vorhandener Daten), sondern bildet lediglich die demographische Struktur der Untersuchungsregion ab. Für jede Person werden anhand seiner demographischen Werte im zweiten Schritt individuelle Aktivitätspläne erstellt. Diese Pläne beinhalten die Menge und Art der Aktivitäten, an denen die Person teilnehmen will, deren Anfangs-, Endzeiten, Orte und das



Abbildung 11 Allgemeines Vorgehen von meso- und mikroskopischen Verkehrssimulationen

verwendete Verkehrsmittel. Die Aktivitätsgenerierung fasst demnach die Schritte 1 bis 3 des klassischen Verkehrsmodells zusammen. Einige Frameworks, die aktivitätsbasiert die Nachfrage bestimmen, überführen die ermittelten Aktivitätspläne in Quell-Ziel-Matrizen, wie sie im klassischen Verkehrsmodell zum Einsatz kommen [Bowman (1998); Pinjari et al. (2008)], allerdings gehen Aktivitätsketten bei dieser Vorgehensweise verloren und die Nachteile der fahrtenbasierten Betrachtungsweise bleiben erhalten. Meso- und mikroskopische Simulationsframeworks gehen dabei einen Schritt weiter, indem die Individuen und deren Aktivitätspläne erhalten bleiben und entsprechend simuliert werden (Abbildung 11: Schritt 3) [Balmer et al. (2009)]. Darüber hinaus gibt es Möglichkeiten der Rückkopplung zwischen der Simulation (Umlegung) und der Aktivitätsgenerierung, so dass Aktivitätsentscheidungen anhand der Simulationsergebnisse geändert bzw. optimiert werden können. Die Methoden, die innerhalb der drei Schritte Populationssynthese, Aktivitätsgenerierung und Verkehrssimulation zum Einsatz kommen, werden in den folgenden Abschnitten aufgrund der Relevanz zur Konzeption des in dieser Arbeit entwickelten Bewertungswerkzeugs (Kapitel 4) näher beleuchtet.

3.2 Populationssynthese

Die Populationssynthese befasst sich mit der Bereitstellung einer geografisch und demographisch differenzierten Population für Mikrosimulationen. Diese Population setzt sich aus Individuen zusammen, die ggf. in Form von Haushalten zusammengefasst sind. Die demographischen Parameter der Individuen haben Einfluss auf die nachgelagerte Aktivitätsgenerierung und werden demnach mit einem hohen Detaillierungsgrad benötigt [Auld und Mohammadian (2010)]. In der Regel stehen die vollständigen Daten für die komplette Untersuchungsregion nicht bereit, weshalb Methoden entwickelt wurden, mit denen bekannte disaggregierte aber unvollständige Daten soweit expandiert werden, dass sie bekannte, aggregierte und auf die Untersuchungsregion bezogene Werte widerspiegeln [Dios Ortúzar und Willumsen (2011), S. 479]. Hierbei kommt das von Beckman et al. (1996) entwickelte Verfahren Iterative Proportional Fitting (IPF) zum Einsatz. Das Ziel des Verfahrens ist die Bestimmung einer n-dimensionalen Kontingenztafel, die die absoluten Häufigkeiten von Personen mit entsprechenden Dimensionskombinationen darstellt.

Das in Abbildung 12 aufgeführte Beispiel verdeutlicht den kompletten Prozess für einen zweidimensionalen Fall. Hier wird die Anzahl von Personen eines bestimmten Geschlechts und einer bestimmten Altersgruppe gesucht. Die Zensusdaten stellen lediglich die dimensionenbezogenen Randsummen bereit. Mikrozensusdaten stellen die gesuchten Häufigkeiten der Dimensionskombinationen bereit, repräsentieren allerdings nur einen Teil der gesamten Population und/oder sind nicht auf die Region bezogen. Das IPF-Verfahren nimmt die Mikrozensusdaten als sog. *Seed* auf und passt iterativ Spalte für Spalte und Zeile für Zeile die inneren Werte der Kontingenztabelle so an, dass die Randsummen denen des Zensus entsprechen. Die Iterationen werden solange durchgeführt bis die Abweichung der Randsummen der geschätzten Verteilung zu den Randsummen der Zensusdaten einen vorher definierten Schwellwert unterschreitet.

Das ursprüngliche Verfahren hat Schwächen, die in der Vergangenheit von mehreren Forschern untersucht und beseitigt wurden [Müller und Axhausen (2011)]. Bei kleinen Stichproben und bei vielen Dimensionen und Ausprägungskategorien ist es möglich, dass für eine dieser Kategorien die Randsumme im *Seed* Null entspricht. Das führt dazu, dass

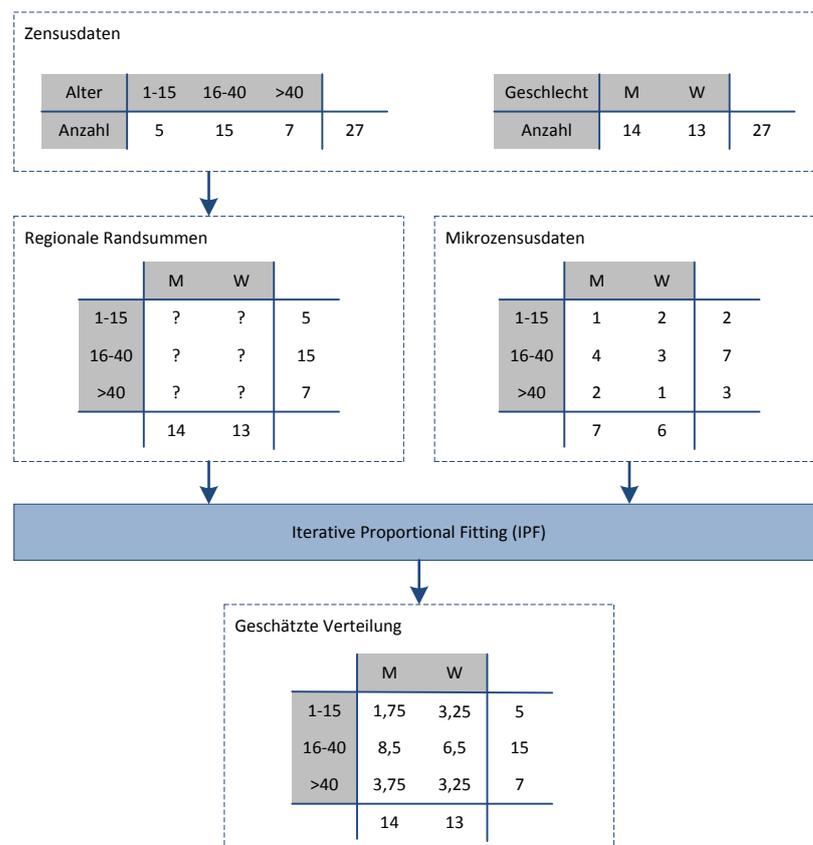


Abbildung 12 Populationssynthese

das Verfahren aufgrund von Divisionen durch Null nicht durchgeführt werden kann. Eine Möglichkeit besteht in der Besetzung dieses Wertes mit einer sehr kleinen Zahl, was allerdings zu der Einführung eines Bias führen kann. Um das Problem zu umgehen, wurden andere Verfahren entwickelt, um die Null-Werte zu eliminieren. Guo und Bhat (2007) und Auld und Mohammadian (2010) schlagen die Reduktion von Kategorien vor, was allerdings zu einer Aggregation der Daten führt. Der zweite Ansatz liegt darin, Daten aus benachbarten Zonen oder übergeordneten Regionen zu verwenden, um das fehlende Verhältnis der Dimensionskategorie zu beschreiben [Ye et al. (2009)]. Darüber hinaus führen dünnbesetzte Matrizen zu Speicherproblemen bei der Berechnung. Diese entstehen durch das exponentielle Wachstum der Kontingenztafel in Abhängigkeit zu den verwendeten Dimensionen und insbesondere zu deren Kategorien. Pritchard (2008) und Pritchard und Miller (2012) verwenden aus diesem Grund eine Repräsentation der Kontingenztafel als Liste, die nur die Werte beinhaltet, die nicht Null sind.

Die inneren Werte der geschätzten Verteilung sind nicht ganzzahlig und müssen daher für die Generierung der Population sowie der nachgelagerten Aktivitätsgenerierung und der Simulation in ganzzahlige Werte umgewandelt werden. Da Rundungen zu Verfälschungen bei den Randsummen führt, wird hierfür i. d. R. eine Monte-Carlo-Simulation verwendet, die solange entsprechend der relativen Häufigkeit der Kontingenztafel Personen generiert, bis die Zielpopulation erreicht ist.

3.3 Aktivitätsgenerierung

Die Aktivitätsgenerierung befasst sich mit der Gestaltung der täglichen Aktivitätspläne der in der Populationssynthese erstellten Haushalte bzw. deren Mitglieder. Die verwendeten Methoden fokussieren sich dabei auf den Privatverkehr. Der Wirtschaftsverkehr wird i. d. R. durch ein zufälliges Rauschen oder durch die Anwendung des klassischen Verkehrsmodells abgebildet. Dennoch gibt es auch hier Ansätze – wenn auch nur einzelne –, die die Verkehrsnachfrage von Wirtschaftsverkehr aktivitätsorientiert betrachten. Die folgenden Unterabschnitte befassen sich mit den angewandten aktivitätsorientierten Modellen und Methoden im Privatverkehr (3.3.1) und im Wirtschaftsverkehr (3.3.2). Die Ausführungen stellen die Vor- und Nachteile der verwendeten Methoden dar und bilden die Grundlage für die Konzeptionsentscheidungen in Kapitel 4.

3.3.1 Privatverkehr

Ziel der Modelle ist es, den Entscheidungsprozess der Personen und/oder Haushalte abhängig von demographischen und strukturellen Variablen möglichst realitätsnah abzubilden. Diese Art der Modellierung, im Gegensatz zum 4-Stufen-Modell, soll zum Verständnis beitragen, welche Faktoren für die Gestaltung von Aktivitäten und den daraus entstehenden Verkehr relevant sind. Mit dieser Erkenntnis wird die Reaktion der Perso-

nen/Haushalte auf die sich verändernden demographischen und strukturellen Werte geschätzt und deren Effekt auf die Verkehrsentwicklung und auf den Belastungszustand des Transportsystems prognostiziert. Alle aktivitätsorientierten Modelle benötigen für die Aktivitätsgenerierung Informationen über personen- und haushaltsspezifische Parameter sowie Daten über die Aktivitätsgestaltung der Individuen, die Struktur der Untersuchungsregion und des Transportnetzes.

Der Entscheidungsprozess eines Individuums befasst sich damit, welche Aktivitäten, in welcher Reihenfolge, zu welchem Zeitpunkt, an welchem Ort mit welchem Transportmittel durchgeführt werden. Die aktivitätsbasierten Modellen unterteilen diesen Prozess grob in die fünf Module Aktivitätsbestimmung, Aktivitätsallokation, Zeit-, Ziel- und Verkehrsmittelwahl (s. Abbildung 13), wobei sich je nach Modell die genutzten Module, deren Ausführungsreihenfolge, die berücksichtigten Aktivitätsgründe, die angewandten Methoden, das Modellierungsdetail und die Komplexität innerhalb der Module variieren kann. Bei vielen Frameworks werden die Schritte sequenziell durchlaufen, d. h. es besteht eine Abhängigkeit der nachgelagerten Entscheidungsebenen zu den vorgelagerten. Die Verkehrsmittelwahl ist bspw. abhängig von der Zielwahl der Aktivität: je größer die zurückzulegende Distanz, umso wahrscheinlicher wird es, dass ein motorisiertes Fahrzeug oder der öffentliche Nahverkehr genutzt werden. Einige Modelle bilden neben diesen nach unten gerichteten Abhängigkeiten auch Rückflüsse ab, so dass die Entscheidungen auf höheren Ebenen auch abhängig von Entscheidungen auf unterer Ebene sind. Dieser Mechanismus kann z. B. durch *Nested-Logit-Modelle* [Bowman (1998)] realisiert werden oder durch iterative Anpassung des Aktivitätsplanes [Kitamura et al. (1996)]. Beides benötigt Informationen über den potenziellen Nutzen, den ein Individuum erhält, wenn er eine Aktivität durchführt bzw. über den negativen Nutzen, der durch Fahrzeiten oder Untätigkeit entsteht.

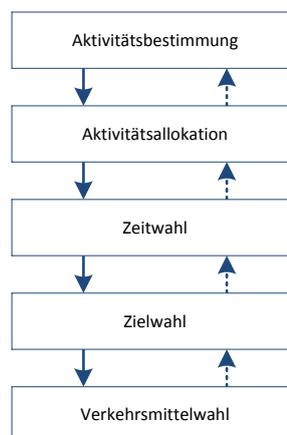


Abbildung 13 Allgemeines Vorgehen zur Aktivitätsgenerierung

Der Schritt *Aktivitätsbestimmung* generiert eine Anzahl an Aktivitäten, die für den spezifischen Haushalt bzw. für die spezifischen Personen typisch sind bzw. dieser Gruppe einen hohen Nutzen versprechen. Die Aktivitäten sind in diesem Schritt lediglich durch ihren Grund charakterisiert. Sofern eine Abhängigkeit der Aktivitäten von unterschiedlichen Haushaltsmitgliedern modelliert wird, erfolgt in dem zweiten Schritt die *Aktivitätsallokation*. Hierbei wird bestimmt, welche Person welche Aktivität durchführt und ggf. welche Fahrgemeinschaften gebildet werden [Pinjari et al. (2008); Papaleontiou (2008); Papaleontiou und Dikaisakos (2009)]. Die *Zeitwahl* bestimmt den Abfahrtszeitpunkt der Aktivitäten sowie die Dauer. Dabei können bestimmte Aktivitäten als fixiert betrachtet werden. Arentze und Timmermans (2004) oder Kitamura und Fujii (1998) bspw. nehmen die primären Aktivitäten (Arbeit und Ausbildung) als fixiert an und planen nur die zusätzlichen Aktivitäten. Die *Zielwahl* ermittelt die Orte, an denen die Aktivitäten stattfinden, i. d. R. anhand von Strukturdaten der Region. Je nach Modellierungsansatz werden sowohl bei der Zeit- als auch bei der Zielwahl unterschiedliche Bedingungen berücksichtigt, um konsistente Pläne zu generieren. Die verwendeten Methoden greifen zum großen Teil auf die Theorie des Raum-Zeit-Prismas von Hägerstrand (1970) oder auf die Gravitationsmodelle des klassischen Verkehrsmodells zurück. Die *Verkehrsmittelwahl* bestimmt, welches Verkehrsmittel welchem Haushaltsmitglied und für welche Fahrten zur Verfügung steht. Dieser Schritt analysiert die durch die Aktivitätsgenerierung entstandenen Touren, die von bekannten Standorten (i. d. R. Zuhause und Arbeitsplatz) starten und enden. In der Regel wird angenommen, dass für sämtliche Fahrten innerhalb einer Tour dasselbe Verkehrsmittel genutzt wird. Die Reihenfolge der durchlaufenden Schritte bringt implizite Annahmen mit sich. Die Zeit- und Zielwahl könnte z. B. abhängig von der Verkehrsmittelwahl sein und würde so zu anderen Aktivitätsketten führen. Methodisch lassen sich innerhalb der oben dargestellten Schritte ökonomische, probabilistische und regelbasierte Modelle unterscheiden, wobei auch hybride Modelle existieren, die diese Methoden kombinieren. Diese werden im folgenden näher beschrieben und jeweils anhand eines Implementierungsbeispiels erläutert.

Ökonometrische Modelle bilden die Abhängigkeit von demographischen Variablen zu Aktivitäts- bzw. Fahrtenentscheidungen in mathematischen Modellen ab. Sie nutzen Methoden der diskreten Entscheidungstheorie, z. B. in Form von Logit-Modellen, um den Nutzen einer potenziellen Aktivitätskette und damit die Wahrscheinlichkeit der Realisierung zu bestimmen. Insgesamt liegt der Vorteil der Modelle darin, dass statistische Methoden verwendet werden können, um kausale Zusammenhänge zwischen demographischen Indikatoren und Nutzerverhalten prüfen und validieren zu können. Der Nachteil dieser Modelle besteht darin, dass die Methoden nicht explizit die Entscheidungsmechanismen der Nutzer abbilden und sich somit schwer in verhaltenstheoretische Modelle integrieren lassen [Guo und Bhat (2001), S. 7]. Ein bekanntes Modell ist das

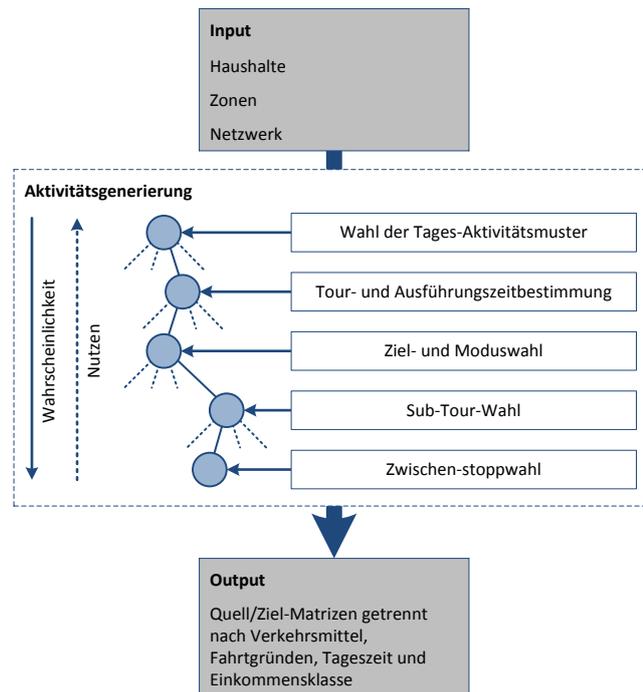


Abbildung 14 Aktivitätsgenerierung nach Bowman (1998)

Nested-Logit-Modell von Bowman (1998) (s. Abbildung 14). Er betrachtet die Wahl der Aktivitätskette als einen Priorisierungsprozess, wobei die Priorität durch den Nutzen der Aktivitätsgestaltung bestimmt wird. Der Nutzen ist abhängig von den Entscheidungsebenen der Zeit-, Ziel- und Verkehrsmittelbestimmung. Die Entscheidungen sind hierarchisch in einem Baum angeordnet. Ziel ist es, den Nutzen und damit die Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Aktivitätskette zu finden, d. h. für einen Pfad von der Wurzel des Baums bis zu einem Blatt. Diese Wahrscheinlichkeiten sind nicht nur abhängig von dem Nutzen der Entscheidung auf der jeweiligen Ebene sondern auch von Entscheidungen auf darunterliegenden Ebenen. Um die Prioritäten der Aktivitätsketten zu bestimmen, muss demnach der komplette Baum durchlaufen, der Nutzen auf unteren Ebenen bestimmt und an die darüber liegenden Ebenen weitergegeben werden. Dieser Prozess ist besonders bei vielen Entscheidungsmöglichkeiten auf den Ebenen komplex und rechenintensiv. Das hat schließlich dazu geführt, dass Bowman die Zeitbestimmung der Touren auf die Kategorien morgens, mittags, abends, sonstige reduziert und lediglich die Gründe Zuhause, Arbeit, Ausbildung und Sonstige berücksichtigt. Damit ist die räumliche und zeitliche Auflösung des Modells deutlich reduziert [Guo und Bhat (2001), S. 8].

Probabilistische Modelle stellen die Entscheidungsebenen einer Person/Gruppe in Form von Häufigkeitsverteilungen dar. Diese werden genutzt, um Anzahl, Gründe, Sequenz, Orte, Start- und Endzeiten der Aktivitäten durch eine Monte-Carlo-Simulation zu ermit-

teln, so dass die Aktivitätsmuster der Population möglichst realitätsnah abgebildet werden. Die unterschiedlichen Entscheidungsebenen sind über bedingte Wahrscheinlichkeiten miteinander verknüpft, d. h. die Entscheidungen auf niedriger Ebene sind abhängig von den Entscheidungen auf höheren Ebenen. Das Ziel von solchen Modellen ist es demnach deskriptiv die Entscheidungen der Individuen abzubilden ohne den eigentlichen Entscheidungsprozess eines jeden Individuums (inkl. Nutzenbewertungen) zu modellieren. Der Vorteil liegt in der einfachen Anwendbarkeit und einfachen Kalibrierbarkeit durch die zugänglichen Daten. Diese Ansätze wurden allerdings aus Sicht der Verkehrsforschung dafür kritisiert, aufgrund ihrer deskriptiven Struktur, keine Änderungen des Verkehrsverhaltens in Abhängigkeit von sich verändernden externen Faktoren (Flächennutzung, Transportsystemänderungen) zu ermöglichen. Demnach sind sie ungeeignet, um verkehrsrechtliche oder -bauliche Maßnahmen zu bewerten [Guo und Bhat (2001), S. 15; Veldhuisen et al. (2000), S. 431].

Veldhuisen et al. (2000) entwickeln ein solches Verfahren namens RAMBLAS. Sie untersuchen, inwiefern allgemein verfügbare Daten (ohne aufwendige lokale Datenerhebungen) und eine relativ einfache Darstellung des Generierungsprozesses dazu beitragen können, die Verkehrsnachfrage und -verteilung zu bestimmen. Sie verwenden dafür Mobilitätsdaten, die auf nationaler Ebene erhoben wurden und wenden diese auf eine bestimmte Region an. Der erste Schritt des Prozesses (s. Abbildung 15) ist die Segmentierung der Population (Berufsstand, Geschlecht und Alter). Der nationale Mobilitätsdatensatz wird ebenfalls anhand dieser Kategorien unterteilt und die gruppenspezifischen Aktivitätsketten ermittelt. Für eine Person eines jeweiligen Segments wird eine Aktivitätskette aus dem jeweiligen Pool gezogen (Schritt 2). Das heißt es findet keine Überführung der beobachteten Aktivitäten in (bedingte) Häufigkeitsverteilungen statt, sondern die beobachteten Aktivitätsketten bleiben erhalten. Das verwendete Verkehrsmittel sowie die Start- und Endzeitpunkte werden ebenfalls aus der Mobilitätsstudie in Abhängigkeit des Aktivitätsgrundes bestimmt (Schritt 3). Für die Verortung der Aktivitäten werden die in den

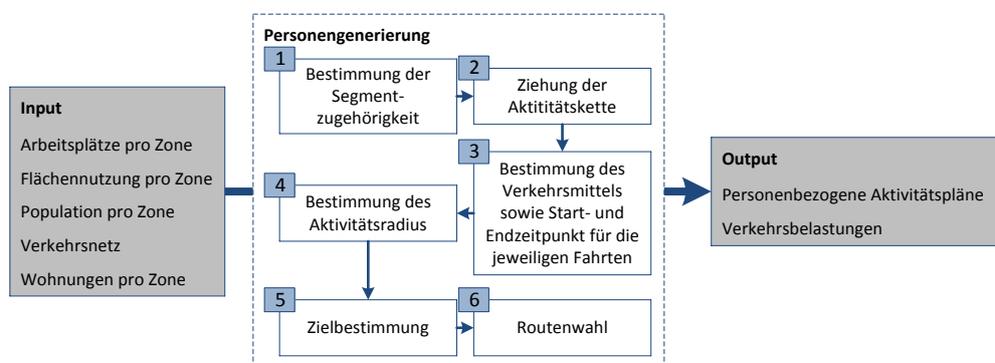


Abbildung 15 Aktivitätsgenerierung RAMBLAS [Veldhuisen et al. (2000)]

Mobilitätsdaten erfassten Reisezeiten als maximal akzeptable Fahrzeit interpretiert, die ein Individuum bereit ist, für die jeweilige Aktivität zu reisen (Schritt 4). Für den Aktivitätsgrund Arbeit wird der spezifische Arbeitsplatz anhand der regionsspezifischen Verteilung der Arbeitsplätze (limitiert durch die Reichweite) ohne Zurücklegen gezogen (Schritt 5). Analog werden die Distanzen für die Gründe Einkauf und Freizeit bestimmt, wobei Einkauf von der Anzahl der Arbeitsplätze in dem Sektor und Freizeit von der Anzahl der Haushalte in den Zonen abhängen. Eine Mikrosimulation bestimmt die Standorte der einzelnen Personen auf Minutenbasis und bestimmt die Verkehrsbelastungen (Schritt 6).

Ähnliche Ansätze der probabilistischen Generierung von Aktivitäten können für den Privatverkehr MATSim [Balmer (2007)], SUMO: Traffic Modeler [Papaleontiou (2008); Papaleontiou und Dikaisakos (2009)] und SIMAP [Guo und Bhat (2001)] bzw. für den Wirtschaftsverkehr Machledt-Michael (2000) (s. Abschnitt 3.3.2) entnommen werden. Neben diesen rein probabilistischen Verfahren existieren Kombinationen, die die in Abbildung 15 dargestellten Schritte sequenziell durchlaufen und je nach Entscheidungsproblem ein ökonomisches oder probabilistisches Modell verwenden. CEMDAP ist eines dieser Frameworks [Pinjari et al. (2008); Bhat et al. (2003b); Bhat et al. (2003a); Bhat et al. (2004)]. Es kombiniert 57 Teilmodelle (Logit-Modelle, Regressionsmodelle, Hazard-Duration-Modelle) um Aktivitäten innerhalb eines Haushalts zu bestimmen, diese auf die Personen im Haushalt zu verteilen und in den Tagesablauf einzuplanen.

Regelbasierte Modelle bilden Gesetzmäßigkeiten des Entscheidungsprozesses ab, indem „wenn...dann“-Relationen zwischen den externen und internen Parametern der Person/des Haushalts und den Aktivitätsentscheidungen identifiziert werden. Daraus entsteht ein System von Entscheidungsbäumen, die für die jeweilig vorliegenden Parameter Entscheidungsverläufe darstellen. Der Entscheidungsverlauf basiert demnach auf Heuristiken anstatt auf der individuellen Nutzenmaximierung, was zu einer realitätsnäheren Abbildung der individuellen Entscheidungen führen soll, indem auch suboptimale Entscheidungen getroffen werden können [Gärling (1998)]. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die Entscheidungsbäume durch gängige Methoden der Statistik und der künstlichen Intelligenz aus Mobilitätsstudien induziert werden können. ALBATROSS stellt ein solches Modell dar [Arentze und Timmermans (2004)]. Die Autoren gehen davon aus, dass Aktivitäten zur Existenzsicherung (Arbeit, Schule) extern vorgegeben und somit fixiert sind. ALBATROSS erwartet dieses sog. Aktivitätsskelett als Eingabe und wählt die Art, Dauer und Startzeitpunkte der sekundären (flexiblen) Aktivitäten durch einen regelbasierten Ansatz aus.

Der in Abbildung 16 dargestellte Prozess ist in sechs Schritte untergliedert, wobei die Entscheidungen in jedem Schritt durch einen Entscheidungsbaum repräsentiert sind. Der Prozess beginnt damit, den fixierten Aktivitäten ein Verkehrsmittel zuzuordnen. Dieses ist wiederum entscheidend für die Aktivitätsgestaltung der anderen Mitglieder des Haushalts. Der zweite Schritt bestimmt darauf iterativ, welche flexiblen Aktivitäten in das Skelett der fixierten Aktivitäten eingefügt werden. Dazu werden die Aktivitäten anhand von Prioritäten bestimmt, die abhängig von den demographischen Werten der Person sind. Des Weiteren werden hier ggf. Mitfahrer zu den Aktivitäten zugeordnet und die minimale Dauer ermittelt. Durch die Berücksichtigung der Zeitfenster, die durch die fixierten Aktivitäten vorgegeben sind, können ggf. Aktivitäten mit hoher minimalen Dauer verworfen werden, auch wenn diese hoch priorisiert sind. Der dritte Schritt beinhaltet die Bestimmung der Tageszeit. Dabei wird davon ausgegangen, dass hoch priorisierte Aktivitäten so früh wie möglich eingeplant werden (sofern ein ausreichendes Zeitfenster zur Verfügung steht). Im Anschluss (vierter Schritt) werden die Aktivitäten verknüpft. Die flexiblen Aktivitäten können entweder als eigene Tour verstanden oder zu dem Hin- bzw. Rückweg einer fixierten Aktivität zugeordnet werden. Als Ergebnis entsteht ein Plan aus Touren, die von Zuhause aus starten und dort enden. Für jede dieser Touren wird ein Verkehrsmittel bestimmt, welches innerhalb einer Tour nicht gewechselt werden kann.

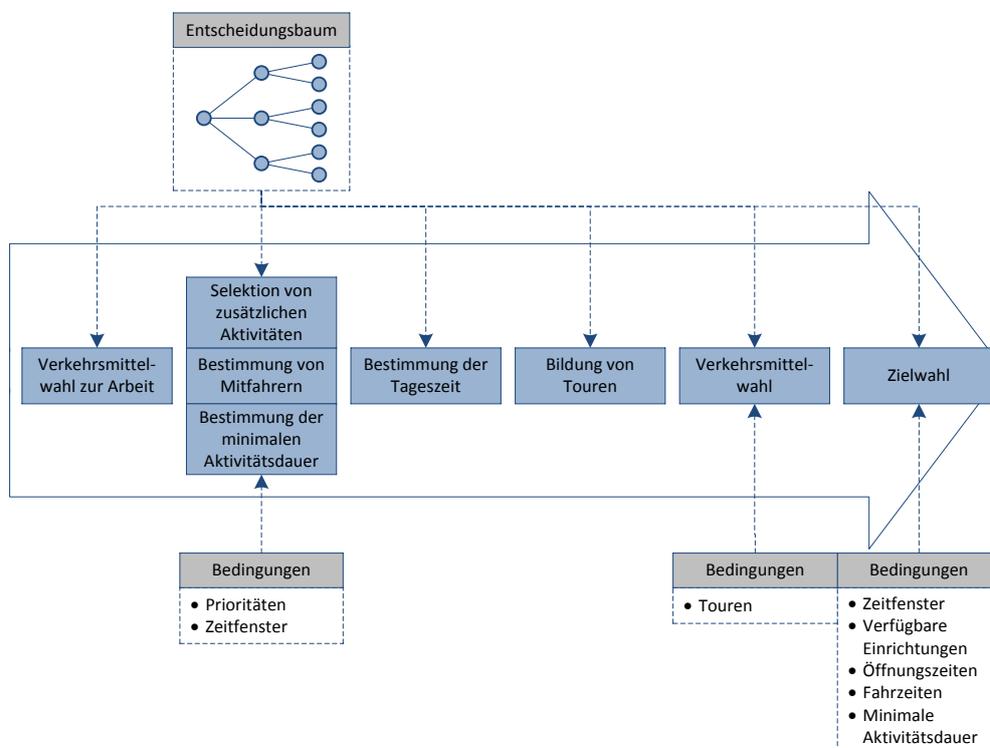


Abbildung 16 Aktivitätsgenerierungsprozess ALBATROSS [Arentze und Timmermans (2004)]

Der letzte Schritt bestimmt die Ziele der Aktivitäten. Zielorte sind Einrichtungen, die anhand ihrer Attraktivität und Entfernung priorisiert werden. Bei der Auswahl werden Öffnungszeiten der Einrichtungen und die verfügbaren Zeitfenster berücksichtigt.

Zusammenfassend unterscheiden sich die Modellarten durch ihre Komplexität und den daraus hervorgehenden Datenbedarf. Ökonometrische Modelle benötigen sehr genaue regionale Daten über die Aktivitätspräferenzen der Individuen und sind je nach Gestaltung sehr komplex und rechenintensiv (z. B. CEMDAP) oder stark vereinfacht und unflexibel (z. B. Modell von Bowman). Probabilistische Modelle sind einfacher zu erstellen und zu kalibrieren und benötigen lediglich Daten aus Befragungen zu alltäglichem Verkehrsverhalten sowie Strukturdaten (i. d. R. frei zugängliche Daten). Sie bilden allerdings die individuellen Gründe der Entscheidungen nicht ab, weshalb die Modelle weniger geeignet sind, um Prognosen für verkehrliche Maßnahmen zu bestimmen. Regelbasierte Modelle nutzen Heuristiken zur Beschreibung des Entscheidungsablaufs. Sie benötigen allerdings ein starres Gerüst an Bedingungen an denen sie sich orientieren können, um realistische Tagespläne zu generieren (z. B. ALBATROSS). Sämtliche untersuchten Aktivitätsgenerierungsframeworks betrachten ausschließlich den Privatverkehr.

3.3.2 Wirtschaftsverkehr

Die Modellierung des Wirtschaftsverkehrs hat in der Vergangenheit eine geringere Durchdringung als die des Privatverkehrs erfahren. Die Gründe liegen in der höheren Komplexität des Wirtschaftsverkehrs und dem erschwerten Zugang zu meist sensiblen kommerziellen Daten, um solche Modelle aufzubauen [Holguín-Veras et al. (2001), S. 2]. Im Allgemeinen haben sich dieselben klassischen Methoden etabliert, die auch beim Privatverkehr zum Einsatz kommen (s. 4-Stufen-Modell, Abbildung 10), und konzentrieren sich auf die Schätzung der Verkehrsnachfrage. Die ermittelte und prognostizierte Verkehrsnachfrage unterstützt den Verkehrsplaner bei Entscheidungen bezüglich baulicher und regulatorischer Maßnahmen und hilft bei der Evaluierung von operativen Mechanismen der Transportnachfragesteuerung. Je nach betrachteter Problemstellung eignen sich unterschiedliche Methoden, die den notwendigen Detaillierungsgrad aufweisen und damit unterschiedliche Anforderungen an Daten haben (s. Abbildung 17). *Kapazitätsanalysierende Modelle* schätzen maximal mögliche Transportströme unter den vorherrschenden Gegebenheiten, wie z. B. Verkehrsnetzstruktur und -auslastung. Sie schätzen demnach nicht die aktuelle Verkehrsnachfrage, sondern bewerten unterschiedliche Szenarien. Zu den Techniken gehören simulationsbasierte Ansätze oder die Warteschlangentheorie. *Regionale Frachtmodelle* schätzen das Angebot und die Nachfrage nach bestimmten Gütern innerhalb einer Region bzw. zwischen mehreren Regionen. Auf dieser Grundlage werden die Ströme zwischen den Quellen und Senken ermittelt. Methodisch basieren diese Modelle auf Input-Output Modellen, räumlichen Interaktionsmodellen sowie Quell-

und Ziel-Synthese. Anlehnend an die regionalen Frachtmodelle basieren *marktspezifische Frachtmodelle* auf der Analyse einer abgegrenzten Menge von Märkten. Ein Markt kann durch einen Transportkorridor, spezifische Anbieter/Nachfrager oder durch bestimmte Warengruppen definiert werden. *Operationale (Simulations-) Modelle* bilden das Netzwerk und deren Teilnehmer auf einer mikroskopischen Ebene ab, um operative Maßnahmen, wie z. B. Verkehrsleitsysteme oder Planungsalgorithmen zu testen und zu optimieren (s. Abschnitt 3.4.1). Prinzipiell existieren auch hier die selben Probleme, die das 4-Stufen-Modell mit sich bringt:

1. Die genannten Methoden betrachten die Verkehrsnachfrage nur fahrtenbezogen und nicht touren oder tagesbezogen, d. h. die Verknüpfung der Fahrten ist nicht modelliert.
2. Der Großteil der Modelle beschränkt sich auf den Güterverkehr. Dienstleistungsfahrten werden vernachlässigt.
3. Die Modelle betrachten vornehmlich den Fernverkehr. Städtische oder regionale Aspekte werden nicht berührt.

Machledt-Michael (2000) erstellt ein alternatives Verfahren zur Beschreibung des Wirtschaftsverkehrs. Das von ihr entwickelte aktivitätsorientierte Verfahren zur Generierung von Fahrketten für Wirtschaftsunternehmen wird im Folgenden mit Hinblick auf die Relevanz für die Konzeption in Kapitel 4 kurz erläutert. Das Verfahren generiert probabilistisch Fahrkettenmuster und besteht aus fünf Schritten:

Segmentierung: Machledt-Michael nutzt hierarchische Clusterverfahren zur Gruppierung der Fahrzeuge, die ein ähnliches Mobilitätsverhalten aufweisen. Die Gruppen werden bestimmt durch die Fahrzeugtypen (PKW, LKW, Motorrad etc.) und die Wirtschaftszweige (Handel, Baugewerbe etc.).

Aktivitätskettenwahl: Anhand der Fahrtenbücher werden Aktivitätskataloge erstellt, die

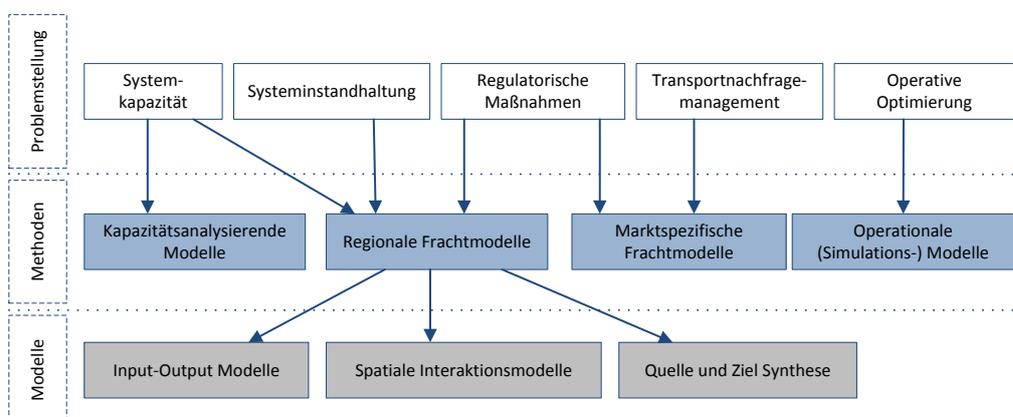


Abbildung 17 Modelle zur Abbildung des Wirtschaftsverkehrs [Holguín-Veras et al. (2001), S. 13–14]

für die jeweilige Gruppe repräsentativ sind. Dazu werden für jede Gruppe Häufigkeitsverteilungen ermittelt, die die Anzahl der Touren, die Anzahl der Fahrten innerhalb der Touren und die Zielarten beinhalten. Unter Verwendung dieser Verteilungen wird eine vorher definierte Anzahl an Aktivitätsketten innerhalb eines Monte-Carlo-Prozesses zusammengestellt. Die Aktivitätsketten werden demnach vollständig synthetisiert. Im Anschluss wird geprüft, ob die relativen Häufigkeiten der generierten Aktivitätsübergänge, z. B. wie häufig der Aktivitätsgrund *Privatkundenbesuch* auf den Aktivitätsgrund *Baustelle* folgt, sich mit denen der beobachteten Übergänge decken. Als Kriterium der Übereinstimmung wird die euklidische Distanz verwendet. Sollten die Übergangintensitäten nicht übereinstimmen, wird durch einen genetischen Algorithmus ein Teil der Aktivitätsketten durch neu generierte ausgetauscht. Sollte sich die Distanz verringert haben, wird der neue Katalog übernommen und ggf. erneut Aktivitätsketten ausgetauscht. Der Prozess wird solange wiederholt bis eine vorher definierte Anzahl an Iterationen durchlaufen ist oder die euklidische Distanz einen bestimmten Schwellenwert unterschritten hat. Zu diesem Zeitpunkt werden die Aktivitäten innerhalb der Aktivitätskataloge nur durch ihre Gründe und ihre Reihenfolge bestimmt.

Standortwahl: Der Standort des Unternehmens wird anhand der Verteilung der Fahrzeuge innerhalb der Region zufällig ausgewählt. Dazu wird die Region in Zonen eingeteilt und die Mengen pro Fahrzeugtyp innerhalb der Zonen bestimmt.

Zielwahl: Die konkreten Ziele der Aktivitäten werden mithilfe eines Gravitationsmodells bewertet, das das aktivitätsspezifische Potenzial der jeweiligen Zone, den Widerstand zwischen den Zonen und die Stellung der Fahrt innerhalb der Aktivitätskette berücksichtigt. Das aktivitätsspezifische Potenzial wird durch Strukturdaten der Zonen festgelegt. Zum Beispiel wird für den Aktivitätsgrund *Privatkundenbesuch* die Anzahl der Haushalte innerhalb der Zonen als Attraktionsgrad herangezogen. Die Distanz zwischen den Zonen dient als Widerstand, wobei dieser von der Fahrzeugart und der Zielart abhängt (z. B. ist der Widerstand für LKW geringer als für PKW). Die Annahme, dass die Touren der Fahrzeuge als Rundfahrten organisiert sind, geht als letzter Faktor in das Gravitationsmodell ein. Dazu wird die Richtung von dem Unternehmensstandort weg und zum Unternehmensstandort hin berücksichtigt. Die Fahrtrichtungen von Aktivitäten innerhalb der ersten Hälfte der Aktivitätskette werden wahrscheinlicher vom Unternehmensstandort weg gerichtet sein und die Fahrtrichtungen von Aktivitäten der zweiten Hälfte wahrscheinlicher zum Unternehmensstandort hinführen. Die Distanzen der beobachteten Fahrten werden demnach nicht stochastisch und direkt bestimmt sondern werden indirekt durch das Gravitationsmodell realisiert (s. Machledt-Michael (2000) für eine detaillierte Beschreibung der räumlichen Ausprägung der Fahrtrketten).

Zeitwahl: Mithilfe von Tagesganglinien werden die Abfahrtszeitpunkte der Aktivitäten bestimmt. Dabei geht keine Prüfung von Bedingungen ein, wie z. B. die Öffnungszeiten von Betrieben.

Neben dem oben dargestellten Ansatz existieren sog. *Land-Use* Mikrosimulationen, die die Dynamik der Flächennutzung abbilden und den daraus resultierenden Verkehr ableiten (z. B. ILLUMAS [Beckmann et al. (2007)]). Dieses betrifft auch die gewerbliche Flächennutzung und den Wirtschaftsverkehr. Allerdings werden bei diesen Modellen keine expliziten Fahrketten betrachtet.

3.4 Verkehrssimulation

Der dritte Schritt der aktivitätsbasierten Modellierungsframeworks stellt die Verkehrssimulation dar. Sie bildet die aus der Aktivitätsgenerierung ermittelten Fahrten ab und legt diese auf die Verkehrsinfrastruktur um. Die eingesetzten Simulatoren werden anhand ihres Detaillierungsgrades unterschieden, die sich grob in makro-, meso- und mikroskopisch untergliedern (s. Abbildung 18). Im Folgenden wird näher auf die *mikro- und mesoskopischen Simulationsmodelle* eingegangen, da diese den Fahrer individuell modellieren und damit die Anforderungen A 1 – Nutzer und Nutzergruppen und A 3 – Aktivitätsgestaltung erfüllen können.³ Die *makroskopischen Modelle* bilden Verkehrsströme mithilfe von physikalischen Gesetzen aus der Fluid- oder Gasdynamik ab (Abbildung 18: 1). Damit wird der Verkehr als Ganzes dargestellt, ohne die individuellen Fahrzeuge zu modellieren. Da die verwendeten Kennwerte wie Verkehrsfluss, Belegungsgrad, durchschnittliche Geschwindigkeit etc. nicht dafür geeignet sind, das individuelle Verhalten von Nutzer oder Nutzergruppen abzubilden, werden diese Ansätze nicht weiter behandelt.⁴

3.4.1 Mikroskopische Simulationen

Mikroskopische Verkehrsmodelle bilden das Verkehrsnetz in einer sehr hohen Auflösung ab. Dabei ist jedes Fahrzeug und dessen Verhalten (z. B. Beschleunigen, Bremsen, Spur wechseln etc.) einzeln dargestellt. Das verwendete Verkehrsnetz muss demnach Daten über die Anzahl der Spuren inkl. derer Verknüpfungen, Vorfahrtsvorschriften sowie Ampelschaltungen bereitstellen. Die räumliche Darstellung kann kontinuierlich oder diskret erfolgen (s. Abbildung 19). Raumkontinuierliche Modelle beschreiben die Position eines

³ Bei der Darstellung der Simulationsframeworks wird aufgrund der möglichen Erweiterbarkeit lediglich auf Open-Source-Projekte eingegangen. Kommerzielle Anwendungen wie z. B. VISSIM [PTV AG (2011)] werden hier nicht betrachtet.

⁴ Für eine Darstellung der Methoden von makroskopischen Modellen sei auf [Treiber und Kesting (2010)] verwiesen.

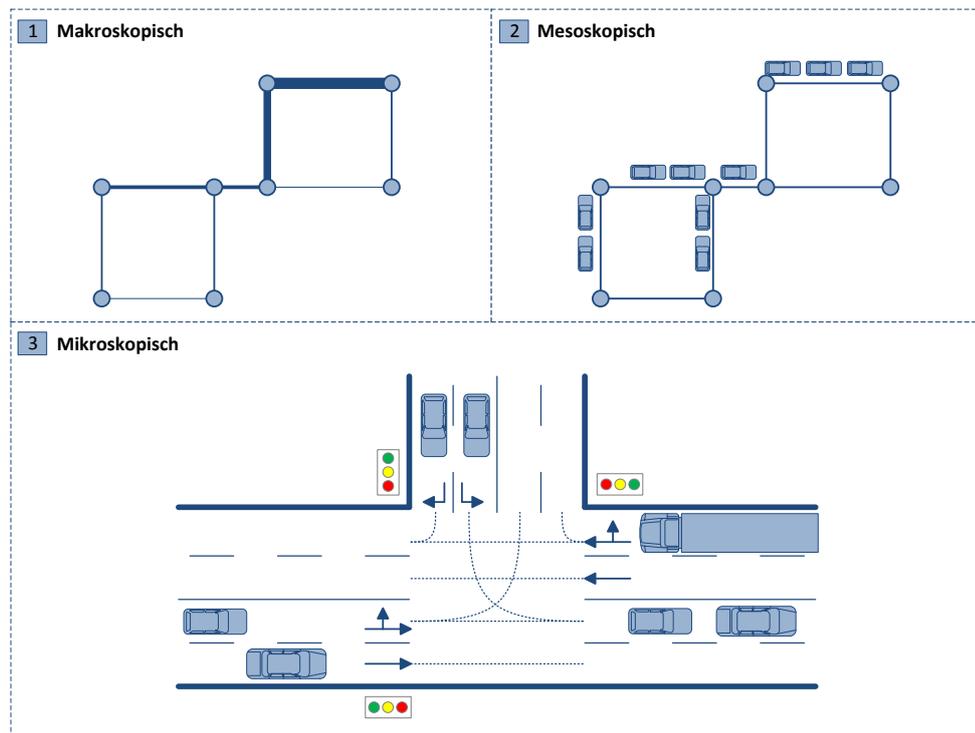


Abbildung 18 Detailebenen von Verkehrssimulationen

Fahrzeuge auf einer Kante bzw. einer Fahrspur durch die Entfernung von dem letzten passierten Netzknoten (Beginn der Kante). Diese Modellarten nutzen sog. Fahrzeugfolgemodelle, um die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge in Abhängigkeit zur Verkehrssituation zu beschreiben. Wie der Name bereits vermuten lässt, wird die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs durch den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug sowie dessen Geschwindigkeit bestimmt. Wiedemann (1974), Treiber und Helbing (2002), Kerner et al. (2008) und Krauß (1998) entwickelten solche Modelle, die sich in dem Grad der Kollisionsvermeidung (gewählter Sicherheitsabstand) sowie dem Verhalten beim Spurwechsel unterscheiden. Raumdiskrete Simulationsmodelle unterteilen den Straßengraphen in Segmente mit vordefinierter Länge, die nur von einem Fahrzeug belegt sein können. Je nach Länge des Fahrzeugs und der Länge des Segments können Fahrzeuge ggf. mehrere Segmente belegen. Modelle dieser Art nutzen zum größten Teil einen zellularen Automaten [Nagel und Schreckenberg (1992)] zur Repräsentation des Verkehrsflusses.

Im Folgenden wird das vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelte Framework *Simulation of Urban Mobility* (SUMO) stellvertretend für mikroskopi-

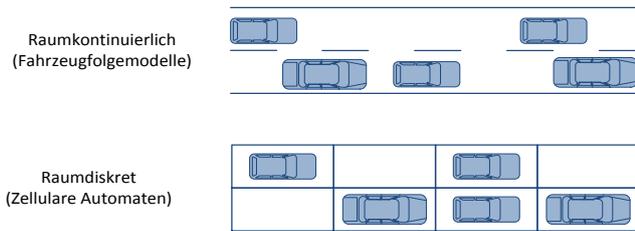


Abbildung 19 Raumdarstellung von mikroskopischen Simulationsmodellen

sche Verkehrssimulationen näher erläutert.⁵ SUMO ist eine mikroskopische, multimodale, raumkontinuierliche und zeitdiskrete Verkehrssimulation, in der jedes Fahrzeug einzeln abgebildet wird und entsprechend seiner Attribute einen bestimmten Platz im Netzwerk einnimmt. Ein Positionswechsel wird durch die aktuelle Geschwindigkeit und der Position beim letzten Zeitschritt berechnet, wobei die Zeitschritte in einem Intervall von 1 ms bis 1 s festgelegt werden können. Als Standard-Fahrzeugfolgmodell wird in SUMO das Modell von Krauß (1998) angewandt, das einen realistischen Fahrzeugfluss ohne Kollisionen abbildet. SUMO erlaubt die Modellierung von mehrstreifigen Fahrspuren, den fahrzeugseitigen Wechsel von Fahrspuren während der Fahrt, Vorfahrtsregeln an Kreuzungen, Ampelmodellierung und die Einbindung von Sensoren wie z. B. Induktionsschleifen.

SUMO stellt darüber hinaus Funktionen bereit, um Fahrten aus unterschiedlichen Datenquellen zu generieren. Diese können aus Ergebnissen des klassischen Verkehrsmodells (z. B. Quell-Ziel-Matrizen) generiert oder aktivitätsbasierend bestimmt werden [Papaleontiou (2008); Papaleontiou und Dikaisakos (2009); Krajzewicz et al. (2012)]. Die Simulation arbeitet dabei nur auf Fahrtebene, d. h. ein Fahrzeug wird zum Start der Fahrt generiert und wird nach Beendigung wieder gelöscht. Fahrketten können demnach nicht ohne eine zusätzliche Komponente realisiert werden, die die Fahrzeuge und deren komplette Aktivitätsketten über einen Zeitraum hinweg verwaltet. Die zwischen den Start und Zielkanten gewählte Route wird mit dem sog. Dynamic User Assignment Router (DUA-Router) durchgeführt. Ziel ist es, die Wege der Fahrzeuge möglichst realitätsnah zu modellieren, d. h. abhängig von Tageszeit und Verkehrsbelastung. Der DUA-Router kann dazu auf zwei Algorithmen zurückgreifen, die diese Aspekte berücksichtigen: c-logit [Casceta et al. (1996)] und der Algorithmus von Gawron [Gawron (1999)]. Beide laufen

⁵ Zur Herleitung des Handlungsbedarfs dieser Arbeit ist die Darstellung von SUMO ausreichend. Weitere mikroskopische Verkehrssimulationsframeworks, die – im Gegensatz zu SUMO – teilweise andere räumliche Darstellungen verwenden (zellulare Automaten), sind TRANSIMS Ley 2008; [TRANSIMS (2014) oder AIMSUN [Barceló et al. (1998); AIMSUN (2011)]. Für mehr Informationen sei auf die referenzierten Quellen bzw. die Internetauftritte der Projekte verwiesen.

iterativ ab, d. h. das Routing wird sooft verändert und anhand der Verkehrssituation angepasst bis ein Gleichgewicht entsteht.

Eine Stärke von SUMO ist die Abbildung von Car2Car- und Car2Infrastructure-Kommunikation. Für die notwendige Kopplung mit einer Netzwerksimulation verwendet SUMO das Traffic Control Interface (TraCI), mit dem die Verkehrssimulation gesteuert wird (Starten, Stoppen, Schritte durchführen) und die Werte der Entitäten (Kreuzungen, Ampeln, Kanten, Fahrstreifen, Induktionsschleifen und Fahrzeuge) innerhalb der Simulation abgefragt werden können. Mit TraCI können die Werte der Systemelemente verändert werden, so dass z. B. Fahrzeuge in Abhängigkeit der Information neue Routen wählen können. Die Fahrzeugpositionen werden über TraCI an die Netzwerksimulation weitergegeben, die die Kommunikationsmöglichkeiten und -prozesse sowie die Entscheidungen abbildet und das Ergebnis an SUMO zurückliefert. Der Fokus von Untersuchungen im Kontext der Kommunikationsmöglichkeiten von Fahrzeugen und Infrastruktur liegt vornehmlich in der Effizienzsteigerung der bestehenden Verkehrsinfrastruktur oder in der Ermittlung der situativen Routingfähigkeit von Nachrichten über die mobilen Netzknoten (Fahrzeuge). Anwendung findet SUMO bei der Evaluation von dynamischer Navigation, Ampelschaltungsprogrammen, Verkehrsüberwachungssystemen und Emissionsbewertungen. Da in SUMO keine Kollisionen abgebildet werden, können Kommunikationsprozesse zur Erhöhung der Verkehrssicherheit nur indirekt ermittelt werden (z. B. durch Detektieren von Notbremsungen) [Krajzewicz et al. (2012), S. 132].

3.4.2 Mesoskopische Simulationen

Die mesoskopischen Modelle stellen eine Mischung aus den makro- und mikroskopischen Ansätzen dar, wobei das Spektrum zwischen den Modellen groß ist und eine eindeutige Einordnung nicht existiert. Mesoskopische Modelle können demnach beliebige Elemente der mikro- und makroskopischen Ansätze verwenden und somit beliebig nah an eine der beiden Modellierungsformen reichen [Treiber und Kesting (2010), S. 54]. Häufig wird die individuelle Darstellung der Nutzer bzw. die Verkehrsteilnehmer aus den mikroskopischen Modellen übernommen, nicht jedoch deren aufwendige und rechenintensive Darstellung des physikalischen Verkehrsflusses. Der Verkehr wird auf makroskopischer Ebene betrachtet, indem z. B. Warteschlagensysteme zur Beschreibung des Netzbelegungszustandes herangezogen werden. METROPOLIS [Palma und Marchal (2002)], DYNASMART [Oh et al. (1999)], DynaMIT [Ben-Akiva et al. (1998)] und MATSim [Balmer et al. (2009)] sind einige Beispiele für solche Simulationsmodelle, bei denen der Verkehrsfluss (teilweise) durch Warteschlangensysteme abgebildet ist. Im Folgenden

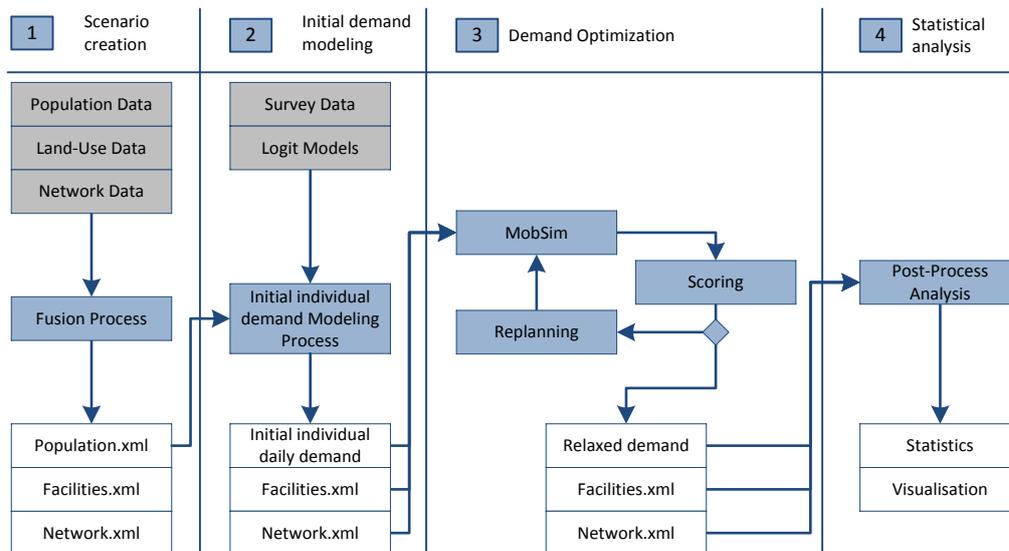


Abbildung 20 Prozessstruktur von MATSim [in Anlehnung an Balmer et al. (2009), S. 61]

wird, stellvertretend für die mesoskopische Modellierung, das Framework MATSim näher erläutert.⁶

MATSim ist ein modulares agentenbasiertes System, mit dem groß angelegte Transportszenarien simuliert und bewertet werden können. Der Fokus von MATSim liegt in der Minimierung der Rechenzeit, die benötigt wird, um einen Tag abzubilden [MATSim (2014a)]. Hauptaufgabe bei der Durchführung einer Verkehrsuntersuchung mit MATSim ist die Bestimmung der Verkehrsnachfrage durch die einzelnen Personen bzw. Agenten und die daraus resultierenden Effekte auf die Verkehrsinfrastruktur. Dieser Prozess von der Verarbeitung der Eingangsdaten bis hin zur Auswertung ist in Abbildung 20 dargestellt. Innerhalb der Simulation sind sämtliche Personen als Agenten modelliert, die ihren eigenen individuellen Tagesplan optimieren. Sie bewegen sich auf einem Straßennetz, um ihre Aktivitäten in dafür vorgesehenen Einrichtungen (Facilities) durchzuführen. Das zu bewertende Transportszenario und die verfügbaren Eingangsdaten sind maßgeblich für die räumliche Auflösung des Netzwerks und der Einrichtungen sowie die Heterogenität der Agenten und deren Tagespläne. Aus diesem Grund sind sämtliche Module als Schnittstellen modelliert, die bei Bedarf durch eigene Klassen an die jeweiligen Bedürfnisse angepasst werden können [Balmer et al. (2009)].

⁶ Wie bei den mikroskopischen Modellen reicht für die Herleitung des Handlungsbedarfs die detaillierte Darstellung des Frameworks MATSim aus. Für Informationen bezüglich der anderen erwähnten Simulationstools sei auf die referenzierte Literatur verwiesen.

Der Prozess einer Untersuchung mit MATSim beginnt mit der Fusion der Eingangsdaten aus unterschiedlichen Datenquellen (s. Abbildung 20: 1). Als Ergebnis liegen das Netzwerk, die Einrichtungen inkl. geografischer Standorte und Kapazitäten und die Population inkl. demographischer Werte und geografischer Standorte vor. Der zweite Schritt (Abbildung 20: 2) besteht darin, eine Sequenz der Aktivitäten der einzelnen Agenten zu bestimmen, eine erste Verortung durchzuführen und Abfahrtszeitpunkte sowie Verkehrsmittel festzulegen (s. dazu Abschnitt 3.3.1). Dadurch wird für jede Person innerhalb des Untersuchungsgebiets (entsprechend der Populationsdatei) ein individueller Tagesplan erstellt, der repräsentativ für seine demographischen Werte ist. Die Summe aller Tagespläne ergibt die initiale Verkehrsnachfrage [Balmer (2007), S. 93–100; Balmer et al. (2006)].

Die Hauptkomponente von MATSim (s. Abbildung 20: 3) liegt in der Simulation der Verkehrsbewegung (MobSim), der Nutzenbewertung (Scoring) und Änderung (Replanning) der individuellen Tagespläne. Ziel ist es, die Tagespläne jedes einzelnen Agenten pro Iteration zu verbessern. Jeder Tagesplan erhält dazu einen Nutzen, der sich aus dem positiven Nutzen für die Durchführung von Aktivitäten und dem negativen Nutzen für Fahrzeiten oder Verspätungen zusammensetzt [Galus et al. (2012b)]. Je nach Fragestellung und Detaillierungsgrad der Modellierung kann diese Nutzenfunktion erweitert oder auch reduziert werden. Da die Fahrzeit abhängig von der aktuellen Verkehrsbelastung ist, ist der Nutzen abhängig von den Tagesplänen und Routen der anderen Agenten [Balmer et al. (2009)].

Die Mobilitätssimulation (MobSim) führt die Bewegungen der Agenten über das Netzwerk unter Berücksichtigung einzelner Kantenkapazitäten sowie Beginn und Beendigung von Aktivitäten aus. Welche Tätigkeiten ein Agent innerhalb eines Simulationslaufes in welcher Reihenfolge ausführt und welche Route er wählt, um von einer Aktivität zur nächsten zu gelangen, ist vorher durch den Tagesplan (Demand) bestimmt und wird in der Simulation nicht geändert. Damit unterscheidet sich MATSim von den mikroskopischen und einigen mesoskopischen Ansätzen, bei denen eine Routenänderung durchaus möglich ist (z. B. SUMO oder DYNASMART). Ein Agent hat nur innerhalb der nachgelagerten Replanning Phase die Möglichkeit seinen Tagesplan zu ändern.⁷ Die Bewegungen der Agenten können innerhalb der Mobilitätssimulation auf unterschiedliche Weise erfolgen, wobei, wie oben erwähnt, die Kanten grundsätzlich als Warteschlangen modelliert sind [Charypar et al. (2006)]. Die Standard Simulationsklasse QSim bspw. aktuali-

⁷ Die QSim Klasse wird aktuell um ein mögliches Within-Day-Replanning erweitert. Diese Erweiterung befand sich während der Konzeption und der Verfassung dieser Arbeit noch in einem experimentellen Status (Stand: Februar 2014). Vgl. hierzu MATSim (2014b).

siert jede Kante in jedem Zeitschritt. Das Intervall zwischen den Aktualisierungen liegt bei mindestens einer Sekunde. Agenten werden demnach verschoben, wenn der Austrittszeitpunkt gekommen ist und die nachgelagerte Kante genügend Kapazität aufweist. Sollte die nächste Kante nicht frei sein, wartet der Agent. Die Simulationsklasse DEQSim arbeitet im Gegensatz zu QSim event-basiert und ermöglicht eine effizientere Ausführung gerade bei einem wenig belasteten Netzwerk [Charypar et al. (2006)].

Die Agenten lösen durch ihre Bewegungen und ihre Tätigkeiten (z. B. Verlassen einer Kante, Beginn einer Aktivität etc.) Events innerhalb der Simulation aus. Auf diese Events können die nachgelagerten Module (Scoring, Replanning, Visualisation) reagieren. Damit wird z. B. das Zählen von Fahrzeugen auf einer Straße oder das Bewerten von Tagesplänen ermöglicht. Das Scoring Modul nimmt die Events und/oder die Ausgangsdaten der Simulation auf und berechnet den Nutzen der aktuellen Tagesfahrpläne jedes Agenten. Jeder Agent besitzt einen Pool an Tagesfahrplänen, dessen Kapazität im Vorfeld vom Nutzer bestimmt wird. Nach jeder Iteration wird der Tagesplan dem Pool hinzugefügt und, sofern die maximale Kapazität erreicht ist, der schlechteste Plan gelöscht. Somit erhöht sich der Nutzen der Fahrpläne nach jeder Iteration oder bleibt auf dem gleichen Level [Balmer et al. (2009)].

Innerhalb des Replanning Moduls generieren die Agenten neue Tagespläne, um ihren Nutzen zu erhöhen. Ein Agent hat dazu vorher definierte Strategien, um einen neuen Tagesplan zu erstellen. Je nach Strategie können die Agenten neue Routen zu den Zielorten wählen und Ort, Dauer und Reihenfolge von Aktivitäten neu bestimmen. Die Veränderung wird im Allgemeinen unabhängig von den Entscheidungen anderer durchgeführt und kann zufällig oder unter Verwendung einer Heuristik erfolgen [Balmer et al. (2009); Balmer et al. (2010)].

Der gesamte Kreislauf ist eine koevolutionäre Optimierung, die iterativ den Gesamtnutzen des Systems erhöht und schließlich in einem Gleichgewicht endet, indem der durchschnittliche Nutzen pro Agent nicht mehr verbessert werden kann. Die daraus resultierenden Tagesfahrpläne und die zeitlich differenzierte Straßenbelastung ergibt die tatsächliche Verkehrsnachfrage.

3.5 Zusammenfassung und Diskussion

Die Beschreibung, Abbildung und Bewertung von Nutzermobilität ist in der Verkehrsforschung weit fortgeschritten. Neben der weit verbreiteten Anwendung des klassischen fahrtenbasierten 4-Stufen-Modells kommen immer mehr aktivitätsorientierte Ansätze zur Darstellung von individuellen Tagesplänen zum Einsatz. Die verwendeten Modelle sind dabei unterschiedlich komplex und benötigen unterschiedliche Datengrundlagen für die Kalibrierung. Die ökonomischen Modelle bilden dabei explizit den von internen und

externen Faktoren abhängigen Entscheidungsprozess der Individuen ab. Das Ziel besteht darin, die Entscheidungen durch Änderungen dieser Faktoren zu antizipieren. Damit sind die Modelle gut geeignet, um Verkehrsbelastungen durch Veränderung der demographischen Werte, der Verkehrsinfrastruktur oder des regulatorischen Rahmens zu prognostizieren. Allerdings benötigen diese Modelle sehr detaillierte Daten über die Präferenzen der Nutzer in Abhängigkeit von internen und externen Daten. Diese werden für die Untersuchungsregion z. B. in Form von sog. *Stated-Preference* Befragungen bereitgestellt, deren Erhebung sehr aufwendig ist. Darüber hinaus bilden die Modelle weitestgehend nur Entscheidungen von Privatpersonen bzw. Privathaushalten ab. Die probabilistischen Modelle fokussieren sich mehr auf die Repräsentation der aktuellen Lage, ohne aufwendige eigene Befragungen durchführen zu müssen. Sie greifen auf Mobilitätsstudien zurück, leiten daraus Häufigkeitsverteilungen ab und generieren durch die Kombination dieser Verteilungen die individuellen Aktivitätsmuster. Diese Modelle können mit Daten kalibriert werden, die bereits vorhanden und meist öffentlich zugänglich sind (z. B. Mobilitätsstudien oder -panels). Der fehlende Erklärungsansatz geht allerdings zu Lasten der Prognosefähigkeit dieser Modelle. Ein Vorteil besteht darin, dass diese Modelle sowohl für den privaten als auch den gewerblichen Verkehr einsetzbar bzw. adaptierbar sind, obwohl noch kein integriertes Modell existiert. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird aus folgenden Gründen ein probabilistisches Modell weiterverfolgt:

- Es ist einfach durch öffentlich zugänglichen Daten zu kalibrieren, z. B. durch Mobilitätsstudien (A 12 – Datenintegration).
- Es kann sowohl den privaten als auch gewerblichen Nutzer adressieren (A 1 – Nutzer und Nutzergruppen).
- Verkehrsrelevante Untersuchungen sind nicht Gegenstand dieser Arbeit (Schwäche der probabilistischen Modelle).

Die individuellen Tagespläne können entweder mikro- oder mesoskopisch simuliert werden. Die Darstellung der beiden Simulationsframeworks SUMO (mikroskopisch) und MATSim (mesoskopisch) haben gezeigt, dass die Frameworks bereits viel Funktionalität bereitstellen und zum großen Teil für die Aufgabenstellung dieser Arbeit adaptierbar sind (s. Tabelle 3). SUMO hat seine Stärken in der realitätsnahen Abbildung der Verkehrsflüsse und in der Aufbereitung von offenen Straßenkarten, wie sie z. B. das OpenStreetMap-Projekt bereitstellt (A 12 – Datenintegration). In SUMO sind Heuristiken integriert, mit denen die Straßenkarten ohne manuellen Modellierungsaufwand um Vorfahrtsregeln und Ampelschaltungen ergänzt werden können. Eine weitere Stärke von SUMO liegt in der Möglichkeit der Darstellung von Kommunikationsvorgängen von Fahrzeugen untereinander oder von Fahrzeugen mit Verkehrsinfrastruktur. SUMO bietet Schnittstellen zu diversen Simulatoren an, die diese Kommunikationsprozesse abbilden können. Damit

kann der Einfluss von Reservierungssystemen auf die Integrationsfähigkeit der Elektrofahrzeuge evaluiert werden (A 11 – Kommunikation). Ein weiterer Vorteil von SUMO liegt darin, dass Fahrzeuge auf Ereignisse (z. B. durch die Kommunikation) reagieren können. Das heißt, in Abhängigkeit der Verkehrslage, des eigenen Zustands der Fahrzeuge oder sonstiger externer Faktoren können die Fahrzeuge die Route und/oder die Zielorte anpassen. Problematisch stellt sich bei SUMO allerdings die Modellierung des Nutzers und dessen Fahrketten dar. Jedes Fahrzeug innerhalb der Simulation erhält eine eigene ID und fährt eine Route vom Start zum Ziel ab. Nach Erreichung des Ziels wird es aus der Simulation entfernt. Einen oder mehrere Tagesabläufe von einzelnen Nutzern sind somit nicht simulierbar. Darüber hinaus fehlen Informationen, mit welchem Ladezustand das Fahrzeug am Zielort ankommt, wie lange es dort stehen bleibt und wann es wieder abfahren wird (A 3 – Aktivitätsgestaltung). Es existiert zwar ein Aktivitätsgenerator für SUMO (TrafficModeler [Papaleontiou (2008); Papaleontiou und Dikaisakos (2009)]). Dieser überführt die erstellten Tagespläne der Haushalte allerdings in Einzelfahrten unterschiedlicher Fahrzeuge, was die tatsächliche Nutzung nicht darstellt. Neben den nicht erfüllten Anforderungen ist darüber hinaus fraglich, ob eine detaillierte Abbildung des Verkehrsflusses durch Fahrzeugfolgemodelle benötigt wird und der damit einhergehende hohe Rechenaufwand notwendig ist, um die Bewertung der Integrationsfähigkeit der Elektrofahrzeuge durchzuführen. Mesoskopische Ansätze bieten dafür den geeigneteren Detaillierungsgrad.⁸

MATSim ist ein agentenbasiertes Simulationsframework, d. h. die Nutzer werden als eigenständige Agenten modelliert, die eigene Tagespläne haben und diese versuchen zu optimieren. Dadurch ist es möglich, komplette Aktivitätsketten inkl. Standorte und Standzeiten darzustellen und hinsichtlich der Integrationsmöglichkeit von Elektrofahrzeugen zu überprüfen. In MATSim können darüber hinaus Einrichtungen modelliert und somit potenziell Ladeinfrastruktur dargestellt werden (A 10 – Zugang). Außerdem protokolliert MATSim die Bewegungen der Fahrzeuge sowie Ankunfts- und Abfahrtszeiten, wodurch die geforderten Metriken bezüglich Verspätungen und Umwege berechnet werden können (A 4 – Operative Kennzahlen). Problematisch stellt sich die fehlende Adaptionfähigkeit des Nutzers innerhalb der Simulation sowie die fehlenden Kommunikationsmöglichkeiten der Agenten für die Aufgabenstellung dieser Arbeit heraus. MATSim verfolgt strikt den in Abbildung 20: Schritt 3 dargestellte Optimierungskreislauf. Die Mobilitätssimulation (MobSim) fokussiert sich auf die Berechnung der Belastungen der Verkehrsnetze. Eine Anpassung der vom Agenten gewählten Route (z. B. aufgrund von geringem Ladezustand) ist nur über die anschließende Bewertung des Nutzens (Scoring) und der Möglich-

⁸ Eine Untersuchung dieser Annahme findet in Abschnitt 5.2 statt.

keit der Neuplanung (Replanning) realisierbar. Darüber hinaus sieht das Framework keine direkte Interaktion der Agenten untereinander vor. Kommunikationsprozesse sind somit nicht direkt darstellbar und können nur über den Umweg Scoring und Replanning indirekt dargestellt werden. Darüber hinaus ist die Simulationszeit von MATSim auf einen Tag beschränkt. Das erschwert die Darstellung von mehrtägigen Aktivitätsketten, die erforderlich sind, um die Integrationsfähigkeit von Elektrofahrzeugen zu bewerten. Die Vor- und Nachteile der beiden Simulationsframeworks sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 dargestellt.

Zusammenfassend war es das Ziel dieses Kapitels, Modelle zur Beschreibung und Verfahren zu Ermittlung der Verkehrsnachfrage zu identifizieren, die es ermöglichen die Standorte von Verkehrsteilnehmer und deren Aktivitäten entsprechend der Anforderun-

Tabelle 3 Anforderungsabdeckung der Simulationsframeworks MATSim und SUMO

Simulationsframework	Nutzer				Region		Fahrzeug		Ladeinfrastruktur		Sonstige		
	A 1 – Nutzer und Nutzergruppen	A 2 – Haushaltsstandorte	A 3 – Aktivitätsgestaltung	A 4 – Operative Kennzahlen	A 5 – Strukturdaten	A 6 – Verkehrsnetz	A 7 – Verbrauch	A 8 – Kapazität	A 9 – Technische Lösung	A 10 – Zugang	A 11 – Kommunikation	A 12 – Datenintegration	A 13 – Erweiterbarkeit
MATSim	○	○	●	●	●	●	○	○	○	○	✗	○	✗
SUMO	○	○	✗	✗	●	●	○	○	○	○	○	○	○

● = Anforderung bereits abgedeckt;

○ = Integration möglich;

✗ = Integration schwer möglich

Tabelle 4: Vor- und Nachteile der Verkehrssimulation SUMO zur Bewertung von Elektromobilität

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Realistischer Verkehrsfluss • Modellierung von Emissionen • Realistische Ampelschaltung (kalibrierbar durch OSM-Daten) • Visualisierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrtenorientierung • Keine Implementierung von Infrastruktur • Aktivitätsgenerator ist auf den Pendlerverkehr fokussiert

Tabelle 5: Vor- und Nachteile der Verkehrssimulation MATSim zur Bewertung von Elektromobilität

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Optimierung der Tagespläne • Visualisierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Simulation eines Tages • Keine Kommunikationsmöglichkeiten der Fahrzeuge während der Simulation • Keine Änderung der Routen während der Simulation

gen dieser Arbeit abzubilden. Im Hinblick auf die geforderte einfache Datenintegration (A 12) haben sich die probabilistischen Modelle als geeignet erwiesen, die Anforderungen dieser Arbeit im Bereich der Nutzermobilität zu erfüllen. Diese gehen daher in die Konzeption des Mobilitätsmodells im folgenden Kapitel ein. Ein weiteres Ziel lag darin Simulationsframeworks hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit zu untersuchen. Dabei stellte sich heraus, dass kein Framework zugleich mehrtägige zusammenhängende Nutzeraktivitäten inkl. Verortung abbilden, Kommunikationsprozesse der einzelnen Fahrzeuge simulieren und das adaptive Verhalten der Agenten innerhalb der Simulation darstellen konnte. Die Frameworks können Emissionswerte aufgrund des Verbrauchs der Fahrzeuge berechnen. Allerdings modellieren sie den Verbrauch der Fahrzeuge in Form von (geschwindigkeitsabhängigen) Durchschnittswerten. Zudem liegt der Fokus auf der Bewertung der Verkehrsinfrastruktur und weniger auf der Infrastruktur an den Zielorten. Die Abbildung der geforderten Effekte aus den Anforderungen A 7 – Verbrauch, A 8 – Kapazität und A 9 – Technische Lösung sind somit nur schwer mit diesen Frameworks umsetzbar. Die weitere Aufgabe dieser Arbeit besteht deshalb darin, Werkzeuge zu konzipieren, um die Anforderungen aus Abschnitt 1.3 zu erfüllen.

4 Multi-agenten basierte Bewertung alternativer Antriebssysteme (*Mambaa*)

Die vorangegangenen Kapitel 2 und 3 haben gezeigt, dass insbesondere simulationsbasierte Ansätze einen Großteil der Anforderungen aus Abschnitt 1.3 zur Bewertung der nutzerseitigen Adoptionsfähigkeit von Elektrofahrzeugen sowie die Bewertung von Ladeinfrastrukturlayouts abdecken. Besonders Multi-Agenten-Simulationen (z. B. MATSim) haben sich dabei als vielversprechend herausgestellt. Die Eignung dieses Simulationsparadigmas zur Abbildung des vorliegenden Systems ergibt sich durch seine vielen heterogenen Elemente (Verkehrsmittel, Straßen, Ladeinfrastruktur) und deren geografische Verteilung. Durch diese Dezentralität des Systems haben agentenbasierte Vorgehen erhebliche Stärken. Diese ergeben sich durch

- die fehlende Möglichkeit, das System naturgetreu zentral steuern zu können,
- die Vielzahl von Parametern, die in die Bewertung einfließen und
- die Darstellung von stochastischen Elementen.

Darüber hinaus bietet ein dezentrales System eine gute Skalierbarkeit sowie die nötige Integrationsfähigkeit weiterer Elemente (A 13 – Erweiterbarkeit) [Adler und Blue (2002), S. 441; Chen und Cheng (2010), S. 485; Henesey et al. (2003), S. 109–110]. Die Evaluation der Simulationsframeworks im Verkehrsbereich hat allerdings gezeigt, dass kein Framework alle Anforderungen erfüllt. Insbesondere eine mehrtägige aktivitätsorientierte Darstellung von individueller Verkehrsnachfrage (A 3 – Aktivitätsgestaltung) *und* eine gleichzeitige Abbildung der Kommunikation zwischen den Individuen und der zur Verfügung stehenden Infrastruktur (A 11 – Kommunikation) wird bisher nicht abgebildet.

Dieses Kapitel beschreibt den Lösungsansatz, um diese Lücke zu schließen. Abschnitt 4.1 geht dabei auf den konzeptionellen Lösungsansatz ausführlich ein. Dieses Konzept wurde in Form eines Prototypen umgesetzt. Auf spezielle Implementierungsdetails geht Abschnitt 4.2 ein. Abschnitt 4.3 schließt dieses Kapitel, indem es den Abdeckungsgrad der geforderten Modellierungskomponenten und Funktionalitäten diskutiert.

4.1 Konzeption

Der Prozess zur Bewertung der Fähigkeit von privaten Haushalten und Unternehmen, elektrische Fahrzeuge integrieren zu können, folgt weitestgehend dem Vorgehen der aktivitätsbasierten Ansätze aus Kapitel 3: Populationssynthese, Aktivitätsgenerierung, Simulation und Bewertung. Dieser allgemeine Prozess wird dabei durch ein sog. Planungs-

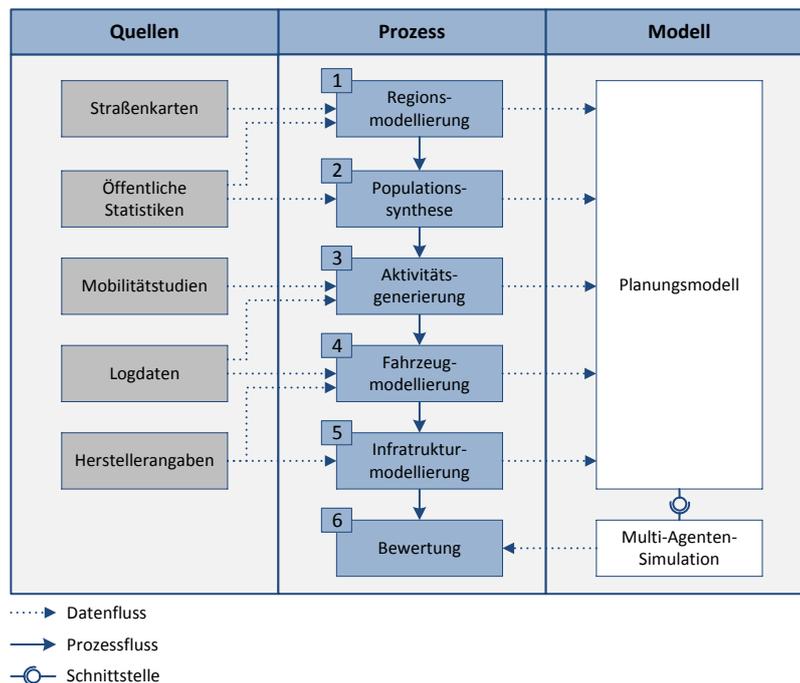


Abbildung 21 Prozess- und Modellebene

dell und durch eine eventbasierte Multi-Agenten-Simulation unterstützt (s. Abbildung 21). Abstrakt dargestellt, ermitteln die ersten fünf Schritte des Prozesses⁹

1. wie die Region strukturiert ist (A 5 – Strukturdaten und A 6 – Verkehrsnetz),
2. wo sich die Haushalte und deren Mitglieder innerhalb der Region befinden und welche demografischen Werte diese aufweisen (A 1 – Nutzer und Nutzergruppen und A 2 – Haushaltsstandorte),
3. welchen Aktivitäten die Haushaltsmitglieder wo und wann nachgehen (A 3 – Aktivitätsgestaltung),
4. welche (Elektro-)Fahrzeuge ihnen zur Verfügung stehen (A 7 – Verbrauch und A 8 – Kapazität) und
5. welche Ladeinfrastruktur Zuhause und an den jeweiligen Aktivitätsstandorten bereitsteht (A 9 – Technische Lösung und A 10 – Zugang).

Die fünf Schritte werden durch das Planungsmodell unterstützt, indem es die relevanten Objekte beschreibt und Verfahren integriert, um diese aus externen Datenquellen zu erstellen (A 12 – Datenintegration). Es bietet somit eine Grundlage, mit der unterschiedliche Szenarien in Bezug auf Fahrzeugeigenschaften und der Ausbreitung und Ausstattung

⁹ Die jeweils adressierten Anforderungen sind in Klammern genannt.

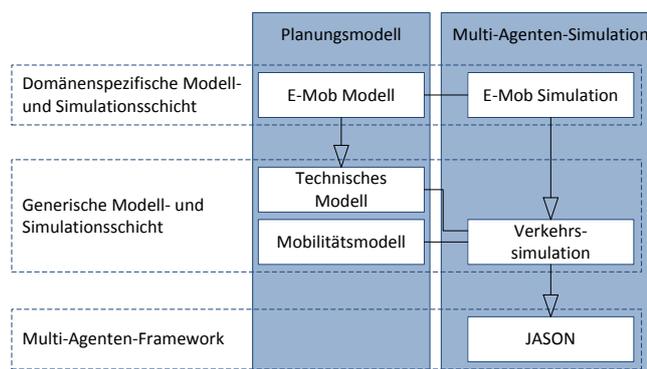


Abbildung 22 Abstraktionsschichten

der Ladeinfrastruktur definiert werden können. Diese Szenarien gehen in den sechsten Schritt, die Bewertung, ein. Eine Multi-Agenten-Simulation nimmt die Objekte des Planungsmodells auf, simuliert die räumlichen und zeitlichen Prozesse der Fahrzeuge inkl. der Interaktionen mit den Ladestationen (A 11 – Kommunikation) und berechnet die Metriken zur Bewertung der Integrationsfähigkeit der Elektrofahrzeuge (A 4 – Operative Kennzahlen).

Sowohl das Planungsmodell als auch die Multi-Agenten-Simulation sind über mehrere Abstraktionsschichten verteilt (s. Abbildung 22), um mehrere Ansatzpunkte für weitere Anwendungen bereitzustellen (A 13 – Erweiterbarkeit). Auf der untersten und mittleren Schicht stellen sie abstrakte Elemente für die Multi-Agenten-Simulation von Transportsystemen zur Verfügung. Auf der obersten Schicht sind diese Komponenten für die domänenspezifische Simulation und Bewertung der Elektromobilität erweitert.

Das **Planungsmodell** ist in die zwei Subkomponenten Mobilitätsmodell und technisches Modell unterteilt. Das *Mobilitätsmodell* beschreibt die zu untersuchenden privaten Haushalte und Unternehmen, deren Standorte und das Mobilitätsverhalten der einzelnen Nutzer. Die Mobilitätsdarstellung erfolgt analog zu den in Abschnitt 3.1 dargestellten aktivitätsorientierten Ansätzen. Aufgrund der geforderten Verwendung von allgemein zugänglichen Daten (A 12 – Datenintegration), wird bei dieser Arbeit ein probabilistisches Verfahren angelehnt an Veldhuisen et al. (2000) (vgl. Abschnitt 3.3.1) und Machledt-Michael (2000) (vgl. Abschnitt 3.3.2) genutzt. Wie bei der Beschreibung der probabilistischen Modelle bereits erwähnt, fehlt diesen Modellen der Erklärungsansatz der individuellen Aktivitätswahl und somit die Prognosefähigkeit der Aktivitätsgestaltung unter veränderten Bedingungen. Somit sind die Modelle weniger geeignet bauliche und rechtliche Verkehrsmaßnahmen zu bewerten. Da der Fokus des hier entwickelten Werkzeugs nicht die Bewertung von Verkehrsmaßnahmen sondern die Bewertung der Mobilitätsabdeckung der unterschiedlichen Nutzergruppen durch Elektrofahrzeuge ist, sind die Vorteile der

einfachen Kalibrierbarkeit und die Verwendung von öffentlich zugänglichen Datenquellen höher zu bewerten als die dargestellten Nachteile. Die Mobilitätsmuster der Haushalte werden in diesem probabilistischen Modell durch (bedingende) Häufigkeitsverteilungen beschrieben. Diese bilden die Basis für die individuelle Generierung der haushalts- und personenspezifischen Aktivitätspläne (A 3 – Aktivitätsgestaltung). Dazu bietet das Mobilitätsmodell Funktionen an, um diese Häufigkeitsverteilungen aus allgemein zugänglichen Mobilitätsstudien zu induzieren. Die Verortung der Haushalte und der einzelnen Aktivitätsziele wird durch ein Regionsmodell ermöglicht, das die zonenbasierten Mengengerüste der betrachteten Haushaltstypen und die zonenbasierten Strukturdaten beinhaltet (A 2 – Haushaltsstandorte und A 5 – Strukturdaten). Diese sind so konzipiert, dass sie die Daten darstellen können, die von öffentlichen Stellen bereitgestellt werden. Wie in Abschnitt 3.2 erläutert, stehen diese Daten aufgrund von Anonymisierungsvorschriften teilweise nur hoch aggregiert zur Verfügung. Das Regionsmodell stellt daher Funktionen bereit, diese Daten unter Verwendung des Iterative Proportional Fitting (IPF) zu disaggregieren. Mit der Integrationsfähigkeit sowohl der öffentlichen Statistiken als auch der Mobilitätsstudien wird damit die Anforderung A 12 – Datenintegration adressiert. Das *technische Modell* beinhaltet alle notwendigen Objekte eines Verkehrssystems. Es ist auf der generischen Modellebene dabei weitestgehend abstrakt und stellt Erweiterungspunkte bereit, um die Objekte, über die Verwendung von Polymorphie, domänenspezifisch zu spezialisieren. So ermöglicht das Verkehrsmodell eine Abbildung unterschiedlicher Fahrzeugtypen (z. B. PKW, LKW oder Motorroller) und Infrastrukturtypen (z. B. Parkplätze, Ladestationen oder Tankstellen), die in der domänenspezifischen Architekturschicht zu konkreten Elektrofahrzeugtypen und Ladestationstypen erweitert werden (A 13 – Erweiterbarkeit). Sämtliche Elemente beinhalten Konzepte zur Darstellung und Verwaltung des Transports von Gütern und Treibstoff sowie zur Darstellung von Schadstoffemissionen beim Verbrauch. Damit deckt das Planungsmodell die Anforderung A 7 – Verbrauch, A 8 – Kapazität, A 9 – Technische Lösung und A 10 – Zugang ab.

Die Basis der **Multi-Agenten-Simulation** bildet das eigenentwickelte Multi-Agenten-Framework JASON. Es stellt die abstrakten Komponenten für eine event- und nachrichtenbasierte Simulation bereit und verfolgt die zentralen Konzepte, dass Agenten

- über Nachrichten kommunizieren und zuvor definierten Kommunikationsprotokollen folgen,
- unterschiedliche Möglichkeiten haben, mit der Umwelt bzw. mit anderen Agenten zu interagieren,
- mehrere Aktionen parallel ausführen können und
- ihr Verhalten (auf Grundlage der Nachrichten) während der Simulation adaptieren können.

Die Verkehrssimulation in der nächst höheren Abstraktionsschicht erweitert die Elemente von JASON um rudimentäre Funktionen für die Untersuchung von Transportszenarien. Das betrifft z. B. die Modellierung von Fahrzeug- oder Infrastrukturagenten, welche bereits für Untersuchungen genutzt werden können. Die E-Mob Simulation, auf der nächst höheren Abstraktionsschicht, erweitert die Verkehrssimulation um elektromobilitätspezifische Aspekte, wie die Modellierung des Ladeprozesses und die konkrete Implementierung von Ladeinfrastruktur- und Elektrofahrzeugagenten. Die Multi-Agenten-Simulation adressiert mit seinen Konzepten die Anforderungen A 4 – Operative Kennzahlen, A 10 – Zugang, A 11 – Kommunikation und A 13 – Erweiterbarkeit. Die oben erwähnten Ideen werden in den folgenden Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 näher beschrieben.

4.1.1 Planungsmodell

Das Planungsmodell gliedert sich in die beiden Modelle Mobilitätsmodell und technisches Modell. Die verwendete probabilistische Modellierung (s. Abschnitt 3.3) wird grundsätzlich aus dem Stand der Technik übernommen und soweit adaptiert, dass in dem Modell sowohl privater als auch gewerblicher Verkehr abgebildet werden kann (A 1 – Nutzer und Nutzergruppen). Die gängigen Modelle aus der Verkehrsforschung vernachlässigen eine Kombination und konzentrieren sich vornehmlich auf den Privatverkehr (s. Abschnitt 3.5). Das eigenentwickelte technische Modell bildet die Elemente der Elektromobilität so ab, dass die geforderten Effekte (s. Anforderungen A 7, A 8 und A 9 aus Abschnitt 1.3) berücksichtigt werden können (z. B. der Einfluss der Außentemperatur auf die Kapazität der Batterie). Bisherige Modelle im Verkehrsbereich bringen nicht die notwendige Flexibilität mit, um diese Effekte abzubilden (s. Tabelle 2 auf Seite 33). Die Bestandteile des Planungsmodells werden im Folgenden näher erläutert.

4.1.1.1 Mobilitätsmodell

Das Mobilitätsmodell bildet die individuellen Eigenschaften von privaten Haushalten und Unternehmen, die Aktivitätspläne der dazugehörigen Fahrzeuge sowie den regionalen Kontext ab (s. Abbildung 23). Das Modell ist dabei in mehrere Komponenten unterteilt, die sich auf die jeweiligen oben genannten Aspekte konzentrieren.

Im Zentrum steht die Beschreibung des Haushalts und dessen Fahrzeuge. Der Haushalt ist durch seine Struktur charakterisiert (wie z. B. Anzahl an Mitglieder, Einkommensstruktur etc.). Ein Mobilitätscluster fasst Haushalte zusammen, deren Mobilitätsverhalten ähnlich ist. Jeder Haushalt ist einem Mobilitätscluster zugeordnet. Die Beschreibung des Mobilitätsverhaltens erfolgt, wie oben beschrieben, in Form von Häufigkeitsverteilungen. Ein Monte-Carlo-Prozess (probabilistische Aktivitätsgenerierung) generiert für die zugehörigen Haushalte die Anzahl der Fahrzeuge, sowie deren Aktivitätsketten inkl. zeitlicher und räumlicher Verteilung. Das Regionsmodell stellt dafür die räumlichen Strukturen bereit,

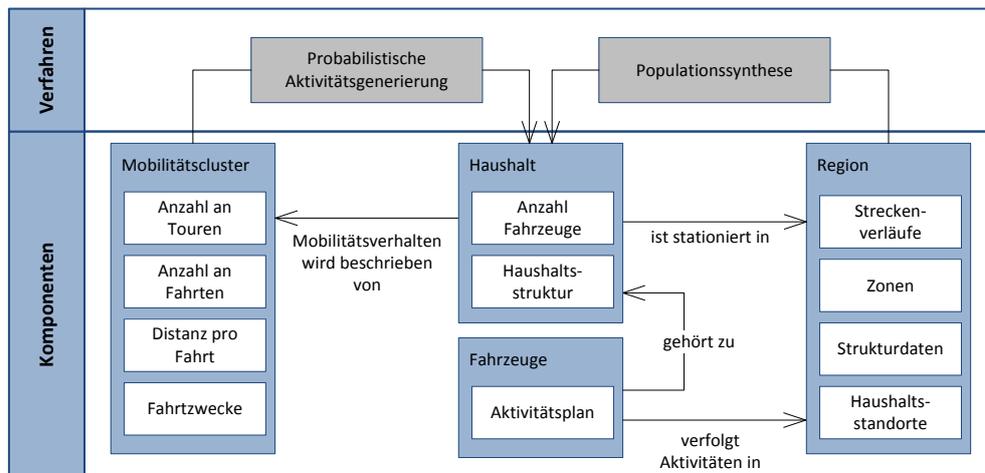


Abbildung 23 Entwurf des Mobilitätsmodells

um zum einen die Anzahl und Standorte der Haushaltstypen zu bestimmen und zum anderen die Verortung der Aktivitäten innerhalb des Generierungsprozesses zu ermöglichen.

Für das Verständnis der beschriebenen Konzepte ist zunächst die Begriffe Aktivität, Aktivitätskette, Fahrt und Fahrkette festzulegen [Dios Ortúzar und Willumsen (2011), S. 474].

Definition Aktivität: Eine Aktivität ist eine kontinuierliche Interaktion mit der physikalischen Umwelt. Eine Aktivität ist charakterisiert durch den Grund (Aktivitätstyp) der Interaktion.

Definition Aktivitätskette: Eine Aktivitätskette ist die chronologische Aneinanderreihung von Aktivitäten eines konkreten Tages.

Definition Fahrt: Eine Fahrt ist eine konkrete räumlich und zeitlich determinierte Aktivität eines Fahrzeugs.

Definition Fahrkette: Eine Fahrkette ist die chronologische Aneinanderreihung von Fahrten eines konkreten Tages.

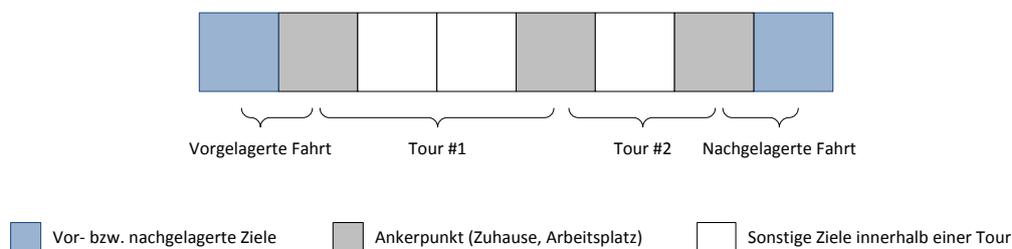


Abbildung 24 Aufbau einer Aktivitätskette

Jede Aktivitätskette beinhaltet Ziele, die für den jeweiligen Haushalt Ankerpunkte in dessen täglichen Mobilität darstellen (s. Abbildung 24). Für einen privaten Haushalt stellen diese Ziele z. B. das eigene Zuhause, der Arbeitsplatz oder die Schule und für ein Unternehmen z. B. das eigene Firmengelände oder das private Zuhause des Fahrzeugnutzers dar. Diese Ankerpunkte unterteilen die Aktivitätskette in Touren, die von einem Ankerpunkt starten, die Teilnahme an eine oder mehrere Aktivitäten beinhalten und an einem Ankerpunkt enden. Eine Tour kann folglich auch nur aus einem Ortswechsel bestehen, wenn eine Fahrt von einem Ankerpunkt zu einem anderen führt. Insgesamt stellt die Aktivitätskette eine Aneinanderreihung von Touren dar, die für den Fall dass die Aktivitätskette nicht an einem Ankerpunkt startet oder endet jeweils von vor- und nachgelagerten Aktivitäten flankiert wird.

Das Mobilitätsmodell greift diese Betrachtungsweise der täglichen Aktivitätsgestaltung auf, indem es die oben beschriebenen Elemente in Form von Häufigkeitsverteilungen beschreibt. Die folgenden Ausführungen gehen näher auf diese Modellierung ein und zeigen wie die einzelnen Komponenten Mobilitätscluster, Region und Haushalt ineinandergreifen, um aus der allgemeinen Beschreibung des Mobilitätsverhaltens konkrete Fahrtketten eines konkreten Fahrzeugs in der abgebildeten Region zu erstellen.

Mobilitätscluster

Das Mobilitätscluster setzt sich zusammen aus zwei zentralen Klassen: *Statistics* und *ActivityCatalog* (s. Abbildung 25). Die *Statistics*-Klasse dient als Container für die zur Mobilitätsbeschreibung verwendeten Häufigkeitsverteilungen. Diese werden in wochentagabhängig und -unabhängig unterteilt. Die wochentagunabhängigen Verteilungen beinhalten Informationen über die Anzahl an Fahrzeugen des Haushalts getrennt nach unterschiedlichen Fahrzeugtypen (PKW, LKW, Bus etc.). Die wochentagabhängigen Verteilungen werden innerhalb der Klasse *weekdayStatistic* zusammengefasst. Anlehnend an das oben dargestellte Verständnis der Strukturierung einer Aktivitätskette, beinhaltet die Klasse unter anderem Häufigkeitsverteilungen über die Anzahl der Touren innerhalb einer Aktivitätskette, die Anzahl an Fahrten innerhalb der Touren (abhängig von der Tourenanzahl) und deren Aktivitätsgründe sowie die Anzahl an vor- und nachgelagerten Aktivitäten. Sämtliche Verteilungen sind zunächst als diskrete Häufigkeitsverteilungen (Histogram) modelliert, können aber bei Bedarf um kontinuierliche Verteilungsfunktionen erweitert werden. Die *ActivityCatalog*-Klasse stellt einen Katalog an Aktivitätsketten bereit, die in der Summe repräsentativ die chronologische Aneinanderreihungen von Aktivitäten beschreiben. Die Aktivitätsketten sind zunächst nur durch die Reihenfolge der Aktivitäten und deren Aktivitätsgründe bestimmt. Abfahrtszeitpunkte und Orte sind zunächst nicht gegeben, da diese nur im regionalen Kontext zu ermitteln sind. Neben den oben beschriebenen Klassen stellt das *MobilityCluster* Informationen für

Aktivitätskette aktiv sein, wird sukzessive die Kette aufgebaut, indem zunächst die Anzahl der Touren und davon abhängig die Anzahl der Fahrten innerhalb der Touren bestimmt werden. Für jede Aktivität innerhalb der Touren wird ein Aktivitätsgrund bestimmt. Das Tourengerüst wird ggf. um nachgelagerte Aktivitäten, die nicht Zuhause enden und um vorgelagerte Aktivitäten, die nicht Zuhause starten ergänzt. Sollte innerhalb des Prozesses der Fall vorkommen, dass weder Touren noch nachgelagerte Aktivitäten verfolgt werden, wird bestimmt, ob die vorgelagerten Aktivitäten Zuhause enden oder ob eine Aktivitätskette vorliegt, die keinen Stopp Zuhause aufweist. Sollten weder Touren noch vor- noch nachgelagerte Aktivitäten ermittelt worden sein, wird der Prozess wiederholt, da eine aktive Aktivitätskette mindestens eine Fahrt aufweisen muss.

Der Aktivitätskatalog wird erstellt, indem mehrfach Aktivitätsketten generiert, eingefügt und wieder ausgetauscht werden bis der Katalog als repräsentativ angesehen wird. Zur Bestimmung der Repräsentativität werden die Übergangintensitäten herangezogen. Diese sind als die standardisierten relativen Häufigkeiten des Überganges eines Aktivitäts-

Tabelle 6: Häufigkeitsverteilungen des Mobilitätsclusters

Verwendung	Häufigkeitsverteilung	Beschreibung
Fahrzeugbestimmung	nrOfVehicles	Diskrete Häufigkeitsverteilung der Mengen an Fahrzeugen.
	secondaryLocationDistance	Diskrete Häufigkeitsverteilung der Distanz zum zweiten Ankerpunkt der täglichen Mobilität (Arbeitsplatz, Schule etc.) (Intervallgröße: 5 km)
Fahrtkettenbestimmung	activityDistance	Diskrete Häufigkeitsverteilung der zurückzulegenden Distanz (Intervallgröße: 5 km)
	activityDuration	Diskrete Häufigkeitsverteilung der Standdauern (Intervallgröße: 15 Min)
	departureTime	Diskrete Häufigkeitsverteilung der Abfahrtszeitpunkte (Intervallgröße: 30 Min → 48 Klassen)
	activityParticipation	Diskrete Häufigkeitsverteilung mit 2 Klassen. Sie beschreibt, ob eine Person an einem Tag aktiv ist (oder nicht).
Aktivitätskataloggenerierung (optional)	nrOfTours	Diskrete Häufigkeitsverteilung der Anzahl an Touren pro Tag
	nrOfTrips	Diskrete Häufigkeitsverteilung der Anzahl an Fahrten pro Tour
	nrOfPostTrips	Diskrete Häufigkeitsverteilung der Anzahl an Fahrten nach der letzten Tour
	nrOfPreTrips	Diskrete Häufigkeitsverteilung der Anzahl an Fahrten vor der ersten Tour
	postTourDestination	Diskrete Häufigkeitsverteilung des End-Aktivitätsgrundes
	preTourOrigin	Diskrete Häufigkeitsverteilung des Start-Aktivitätsgrundes
	noHome	Diskrete Häufigkeitsverteilung mit zwei Klassen. Sie beschreibt, ob tourenlose Aktivitätsketten Zuhause enden.
	activityType	Diskrete Häufigkeitsverteilung der Aktivitätsgründe der Fahrten.

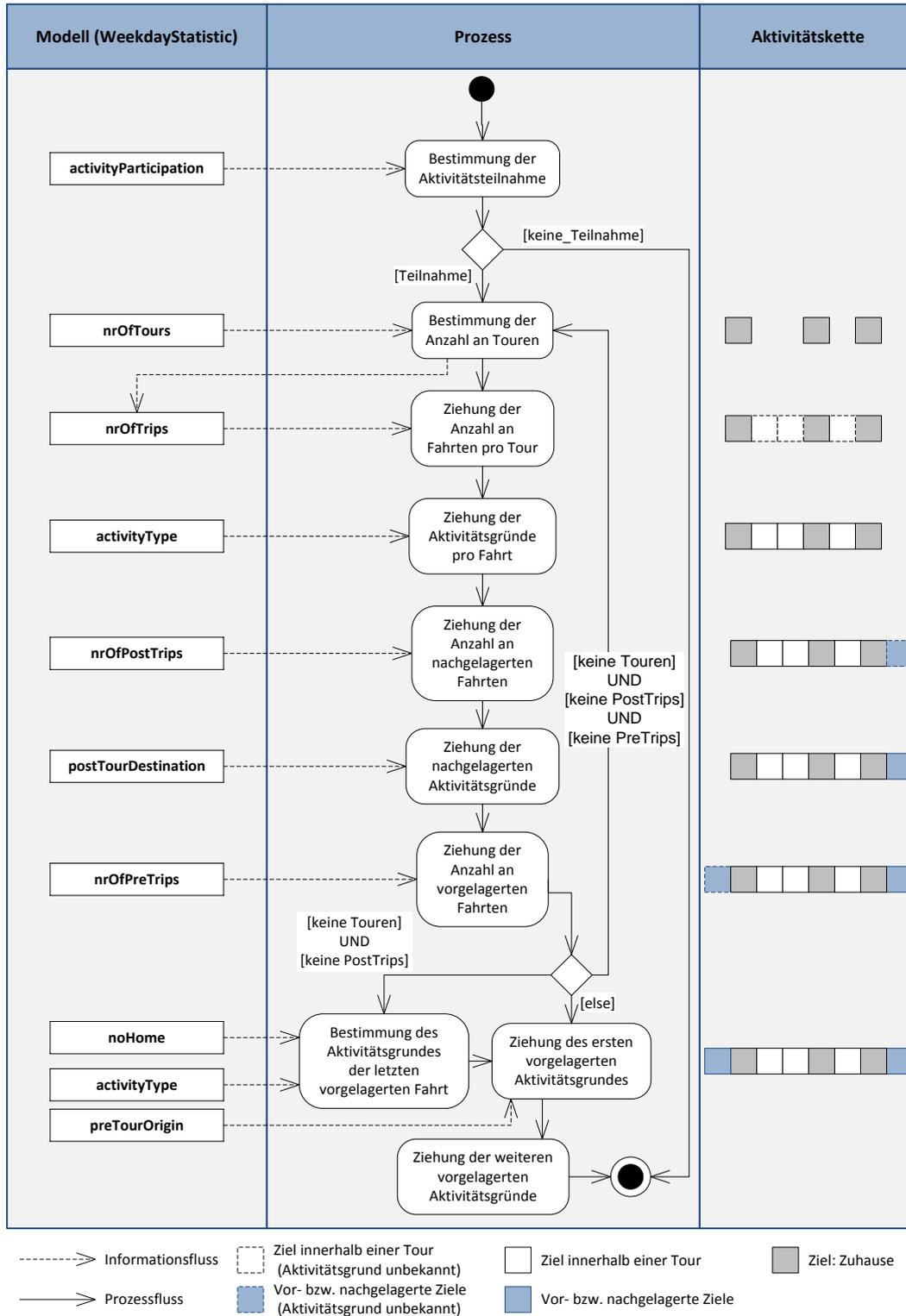


Abbildung 26 Prozess der Aktivitätsgenerierung

grundes in einen anderen definiert [Machledt-Michael (2000), S. 104–106]. Abbildung 27 stellt die Berechnung exemplarisch dar. Die Übergangsintensitäten ergeben sich durch den Quotient aus den relativen Häufigkeiten und dem Produkt der Randsummen der jeweiligen Start- und Zielaktivität. Durch die Verwendung der Übergangsintensitäten wird die Abhängigkeit der relativen Häufigkeiten von der absoluten Aktivitätenhäufigkeit eliminiert [Wermuth (1978), S. 188ff]. Der Vergleich der Übergangsintensitäten der statistischen Quelle und des generierten Aktivitätskatalogs erfolgt durch die Bildung der euklidischen Distanz. Abbildung 28 stellt den Prozess zur Generierung des Aktivitätskatalogs dar. Dieser endet sobald die euklidische Distanz geringer als ein definierter Schwellwert ist oder bis eine definierte Anzahl an Iterationen durchlaufen wurde. Der Prozess beginnt mit der Erstellung einer definierten Anzahl an Aktivitätsketten. Aus diesen werden die Übergangsintensitäten berechnet und mit denen der statistischen Quelle verglichen. Sollte der Schwellenwert nicht unterschritten und die Anzahl an Iterationen nicht überschritten worden sein, wird der ursprüngliche Aktivitätskatalog kopiert, per Zufall eine Austauschquote q bestimmt und zu q Anteilen Aktivitätsketten in der Kopie ausgetauscht. Dabei ist es möglich, unterschiedliche Funktionsverläufe zu verwenden, um die Austauschquote zu bestimmen. Machledt-Michael verwendet bspw. eine logarithmische Funktion zur Bestimmung der Austauschquote [Machledt-Michael (2000), S. 119]. Der aktuelle Aktivitätskatalog wird daraufhin mit dem ursprünglichen verglichen und übernommen, sollte sich die euklidische Distanz der Übergangsintensitäten verringert haben. Danach beginnt die nächste Iteration falls die Abbruchkriterien nicht greifen.

Als Ergebnis steht ein Pool an Aktivitätsketten zur Verfügung, der repräsentativ ist, aber

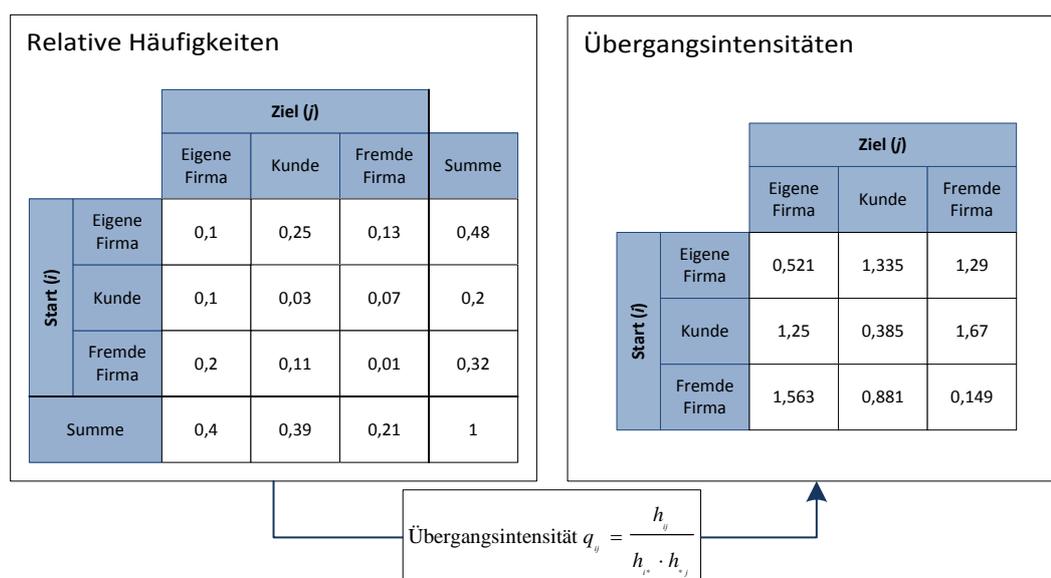


Abbildung 27 Berechnung der Übergangsintensitäten (fiktive Werte)

nicht zwangsläufig der statistischen Quelle entspricht. Damit wird eine größere Vielfalt an Aktivitätsketten erreicht, ohne zu weit von den beobachteten Werten abzuweichen. Das MobilityCluster kann nun verwendet werden, konkrete Fahrketten für die Haushalte bzw. für deren Fahrzeuge zu generieren (s. Abschnitt Haushalt und Fahrzeuge unten).

Region

Insgesamt stellt die Region-Komponente des Mobilitätsmodells ein Datenmodell bereit, das die Generierung und Verortung der Haushalte sowie der jeweiligen Aktivitäten und deren Gründe unterstützt. Abbildung 29 zeigt das entsprechende Klassendiagramm. Der Ansatz lehnt sich weitestgehend an die klassischen Verkehrsmodelle an, indem Zonen (Zone) die Region unterteilen. Diese sind durch Strukturvariablen charakterisiert, die für das spätere Gravitationsmodell relevant sind. Die Zuordnung der Strukturvariablen und

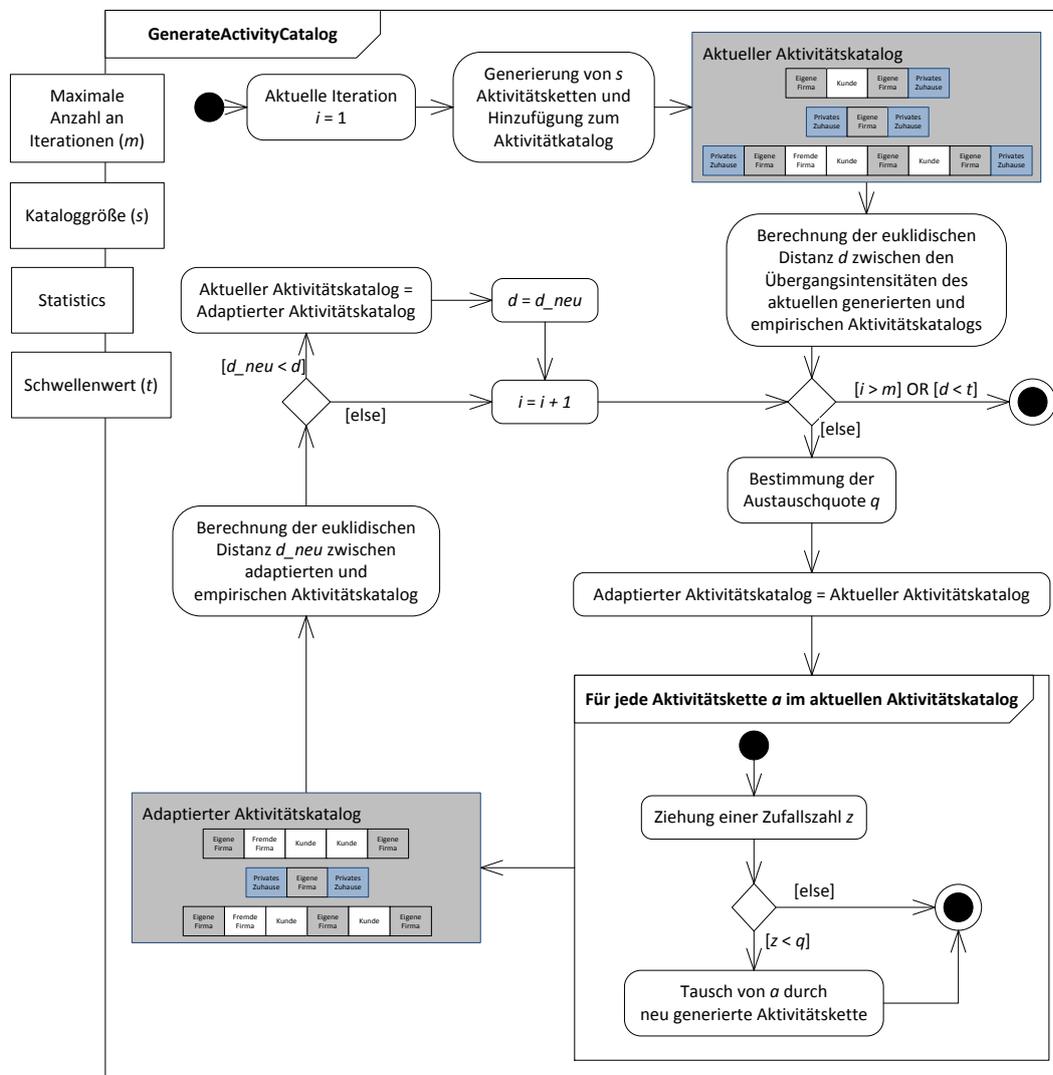


Abbildung 28 Aktivitätsdiagramm der Aktivitätskatalogerstellung [Machledt-Michael (2000)]

deren Ausprägung zu den jeweiligen Zonen erfolgt über die `StructureValue`. Neben den Strukturvariablen stellt die Zone ein Mengengerüst an Haushalten getrennt nach Mobilitätsclustern bereit (`HouseholdQuantity`), das in den späteren Haushaltsgenerierungsprozess eingeht. Das Straßennetz wird durch einen Graph beschrieben, der sich definitionsgemäß aus einer Menge von Knoten und Kanten zusammensetzt. Zone-, Node- und Link-Klasse weisen eine Geometrie (`Geometry`) auf, um Entfernungen innerhalb des Graphen ermitteln und Überschneidungen feststellen zu können. Diese Funktionalität ist notwendig für den unten dargestellten Verortungsprozess (s. nächster Abschnitt).

Haushalte und Fahrzeuge

Ein Haushalt agiert innerhalb der Region entsprechend der definierten Mobilitätsmuster. Abbildung 30 stellt das entsprechende Klassendiagramm dar. Um die Mobilitätscharakteristiken eines Haushalts zu beschreiben, ist der übergeordneten Klasse `Household` ein `MobiltyCluster` zugeordnet. Der Standort eines `Household` ist durch einen Knoten (`Node`) innerhalb einer Zone bestimmt. Die Fahrzeuge eines Haushalts (`Vehicle`) weisen einen bestimmten Fahrzeugtyp (`VehicleType`) auf und haben ebenfalls einen Standort innerhalb der Region. Dieser Standort dient dazu, einen weiteren bekannten geografischen Ankerpunkt des Fahrzeugs bzw. des Fahrers zu beschreiben. Im privaten Fall kann das z. B. der Arbeitsplatz oder die Schule sein und im gewerblichen Fall das private Zuhause des Fahrers für den Fall, dass er das Fahrzeug auch privat nutzt. Jedes Fahrzeug weist darüber hinaus eine Fahrtkette (`TripChain`) auf. Die `TripChain`-Klasse erweitert die `ActivityChain`-Klasse um ein konkretes Datum der Ausführung. Analog erweitert die in der `TripChain` enthaltene `Trip`-Klasse die `Activity`-Klasse, indem sie durch einen konkreten Abfahrtszeitpunkt, einer Aufenthaltsdauer, einer Distanz und ein Ziel (`endNode`) ergänzt wird. Entsprechend der zu Beginn dieses Abschnitts eingeführten Definiti-

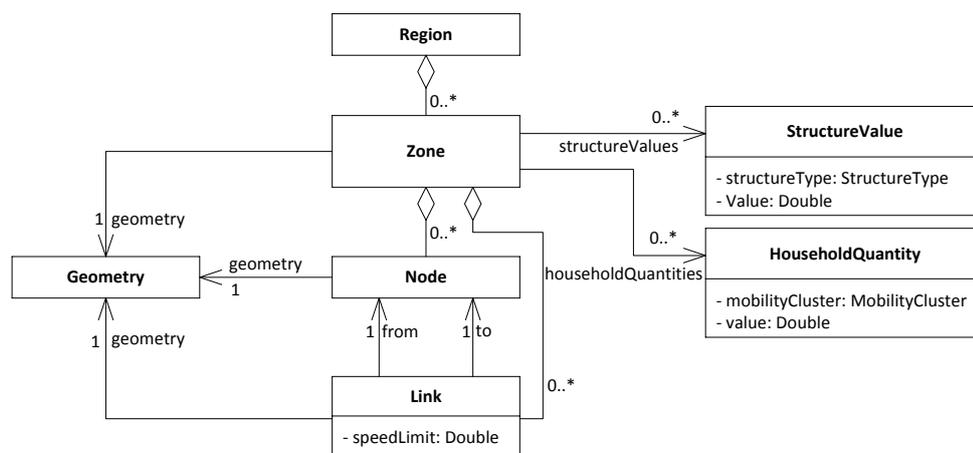


Abbildung 29 Klassendiagramm Region-Komponente

onen repräsentiert ein Trip somit eine Fahrt und ein TripChain eine Fahrtkette.

Um eine Fahrtkette für ein Fahrzeug des Haushalts zu generieren, werden je nach Anzahl der zu erstellenden Tage, Aktivitätsketten aus dem Aktivitätskatalog des haushaltszugehörigen Mobilitätsclusters gezogen. Dabei gehen nicht alle Aktivitätsketten ein. Um die unten beschriebene Verortung der Fahrten zu erleichtern, werden für die Ziehung der ersten Aktivitätskette nur solche Aktivitätsketten berücksichtigt, die von Zuhause (des Haushalts) aus starten. Alle weiteren Ziehungen berücksichtigen nur Aktivitätsketten, die denselben Start-Aktivitätsgrund aufweisen, der dem End-Aktivitätsgrund der vorgelagerten Aktivitätskette entspricht. Daraufhin werden die Aktivitäten in Fahrten überführt, indem die entsprechenden Häufigkeitsverteilungen der `weekdayStatistic` herangezogen werden (vgl. Tabelle 6). Der Prozess (s. Abbildung 31) ermittelt somit die Aktivitätsdauern und Distanzen der Aktivitäten, abhängig von dem jeweiligen Aktivitätsgrund. Die Ankunfts- und Abfahrtszeiten für die jeweiligen Fahrten innerhalb der Fahrtkette werden zum Schluss entsprechend folgender Formeln bestimmt.

Für alle $\{c \in C \mid n_c > 1\}$ gilt:

$$dep_c^t = \begin{cases} z(n_c) & , \text{ wenn } t = 1 \\ arr_c^t + dur_c^t & , \text{ wenn } t > 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$arr_c^t = \begin{cases} dep_c^t & , \text{ wenn } t = 1 \\ dep_c^{t-1} + tdur_c^t & , \text{ wenn } t > 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$tdur_c^t = \frac{dist_c^t}{s} \cdot d \quad , \quad d \geq 1 \quad (4)$$

wobei c eine Fahrtkette sämtlicher Fahrtketten C eines Fahrzeugs entspricht, n_c die Anzahl an Fahrten innerhalb der Fahrtkette repräsentiert, t den Index der Fahrt innerhalb der Fahrtkette angibt, dep_c^t die Abfahrts- und arr_c^t die Ankunftszeit der t -ten Fahrt der Fahrtkette c beschreibt, dur_c^t die Aktivitätsdauer am Zielort darstellt und $tdur_c^t$ die geschätzte Fahrtzeit repräsentiert. Letztere wird durch den Quotienten der Distanz der jeweiligen Fahrt ($dist_c^t$) und der durchschnittlichen Geschwindigkeit s bestimmt. Da die Distanzen nicht das Straßennetz berücksichtigen, werden die geschätzten Fahrtzeiten um den Faktor d skaliert. Für alle aktiven Fahrtketten ($n_c > 1$) werden entsprechend der Formeln (2) und (3) die Abfahrts- und Ankunftszeiten bestimmt. Hierbei wird für die jeweilige erste Fahrt innerhalb der Fahrtkette ($t = 1$) die Abfahrtszeit aus der Fahrtanzahl abhängigen Häufigkeitsverteilung zufällig bestimmt ($z(n_c)$). Die Verteilung $z(n_c)$ entspricht dem `departureTime`-Attribut (Histogram) der `weekdayStatistic`. Alle weiteren Abfahrtszeitpunkte werden durch die Summierung der Ankunftszeit und der Aktivitätsdauern ermittelt. Die Ankunftszeit der ersten Fahrt ist nicht relevant und wird auf die Abfahrtszeit gesetzt. Alle

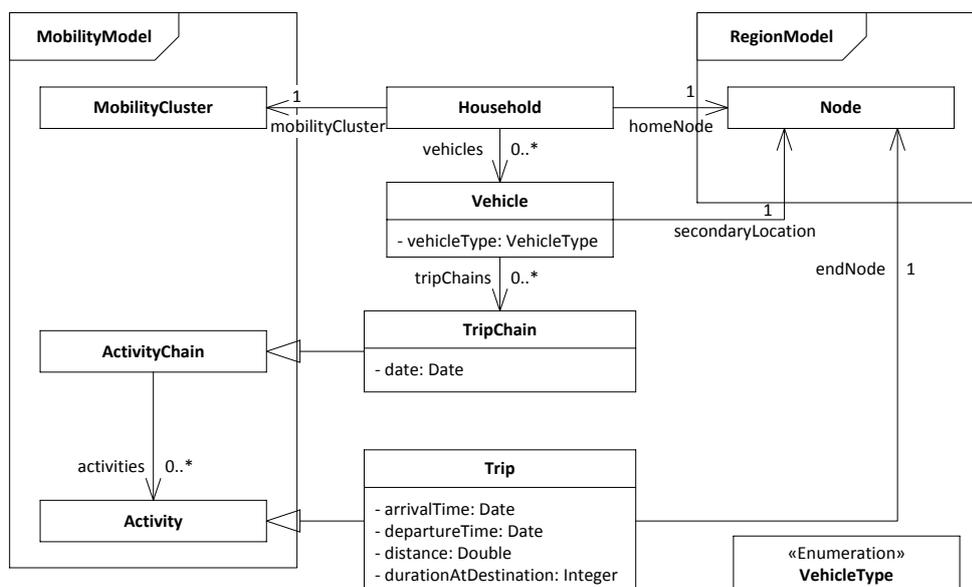


Abbildung 30 Klassendiagramm Haushalt-Komponente

anderen Abfahrtszeiten ergeben sich durch die Summierung der Standzeit der vorangegangenen Fahrt und der geschätzten Fahrtzeit.

Der letzte Schritt beim Bestimmen der Fahrten eines Fahrzeugs besteht aus der Verortung der Fahrten. Das Ziel ist es, anhand der ermittelten Distanzen der Fahrten, die indirekt aus einer i. d. R. nicht auf die Untersuchungsregion bezogenen Mobilitätsstudie entnommen wurden, möglichst konsistent auf die Region zu übertragen. Konsistenz bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Zonen entsprechend ihrer Gravitation angefahren werden und dass die Distanz bei der Realisierung der verorteten Fahrten (sprich konkrete Fahrten auf dem Verkehrsnetz) im Mittel der Distanz entspricht, die durch den oben dargestellten Generierungsprozess vorgegeben wurde. Die Verortung findet tourenbasiert statt, indem ausgehend von den bekannten Standorten der Haushalte und der Fahrzeuge und den ermittelten Distanzen entsprechende Rundtouren generiert werden. Abbildung 32 stellt ein Beispiel für diesen Prozess für eine kurze gewerbliche Fahrtkette *EigeneFirma – Kunde – FremdeFirma – EigeneFirma* dar. Für die Gravitationsberechnung der einzelnen Zonen stellt das *MobilityCluster* die relevanten Strukturvariablen (*StructureType*) des jeweiligen Aktivitätsgrundes bereit. Bei der geografischen Verortung kommen die Geometrieobjekte der Zonen und Knoten aus der Region-Komponente zum Einsatz (*Geometry*). Für die erste Fahrt wird ein Radius entsprechend der Fahrtdistanz um den (bekannten) Standort gezogen (Schritt 1). Die Verortung findet ohne Berücksichtigung des Verkehrsnetzes statt, um rechenintensive Routingabfragen zu vermeiden. Daher werden die generierten Distanzen (Luftlinie) um einen konstanten Faktor g skaliert, um realistische Fahrt-distanzen zu erhalten. Mehrere Experimente haben $g = 0,775$ als geeigneten Faktor

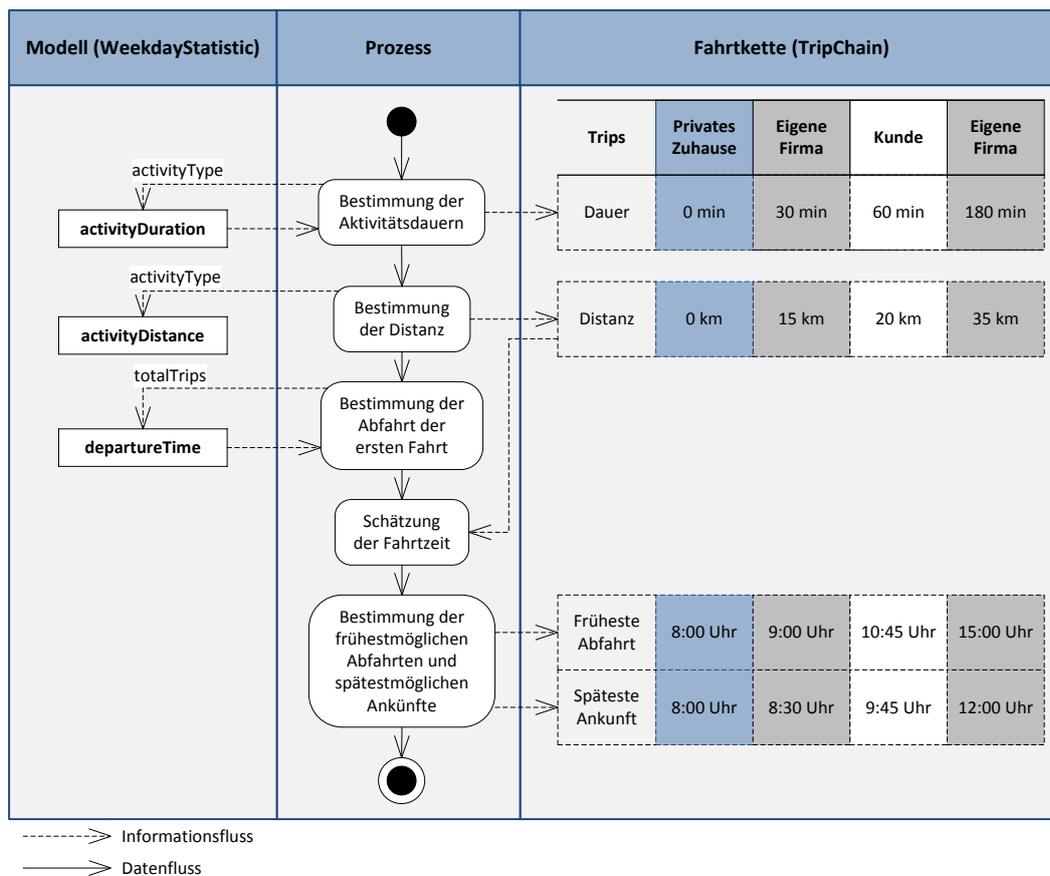


Abbildung 31 Fahrkettengenerierung

ermittelt.¹⁰ Die von dem Kreis geschnittenen Zonen gehen in die Bestimmung des nächsten Zielortes ein. Die Wahrscheinlichkeit für die Auswahl einer Zone ist durch die relevanten Strukturvariablen gewichtet, die das MobilityCluster anhand des Aktivitätsgrundes vorgegeben hat. Für das Fahrtziel wird ein Punkt entlang des Bogens (Schnittbogen des Kreises und der Zone) innerhalb der Zone zufällig ausgewählt. Falls die Fahrkette nicht bereits beendet ist, wird dieser Prozess solange wiederholt bis die Fahrt $t = n_c - 2$ (hier: Fahrt #2: Kunde) erreicht ist. Der letzte fehlende Zielort ($t = n_c - 1$) wird durch die Schneidung der Distanzradien der vorletzten Fahrt um den letzten ermittelten Zielort und der letzten Fahrt um den bekannten Standort ermittelt (Schritt 3). Die Schnittpunkte bestimmen die Zonen, die für die vorletzte Fahrt herangezogen werden. Durch den probabilistischen Prozess kann es vorkommen, dass sich bei der Ermittlung der vorletzten Fahrt die beiden gebildeten Kreise entweder nicht schneiden oder sich überlagern (s. Abbildung 33). Im Falle der fehlenden Überschneidung wird eine direkte Linie zwischen den beiden

¹⁰ Welchen Effekt die Reduzierung des Suchradius auf die realisierten Fahrtweiten hat, zeigt die Validierung in Abschnitt 5.1.2.2.

Standorten gezogen und die Schnittpunkte dieser Linie mit den jeweiligen Kreisen zur Bestimmung der Zielzonen verwendet. Im Falle der Überlagerung der Kreise wird ebenfalls eine direkte Linie zwischen den Orten gezogen. Diese wird bis zum Rand des äußersten Kreises verlängert. Die gemeinsame Schnittgerade aus der Linie und der Differenzfläche des äußeren und des inneren Kreises bestimmt die Auswahl der Zonen für die Verortung. Durch die zufällige Auswahl der Standorte innerhalb der Zonen und durch die beiden Sonderfälle entsteht eine Differenz zwischen den generierten und den aus der Statistik gezogenen Distanzen. Dieser Effekt wird in Abschnitt 5.1.2.3 näher untersucht. Mit Abschluss der Verortung sind sämtliche Haushalte, deren Fahrzeuge und Fahrtketten bestimmt und können für die Bewertung verwendet werden. Der nächste Abschnitt erläutert die Modelle, die zur technischen Beschreibung der Fahrzeuge und der verfügbaren Ladeinfrastruktur verwendet werden.

4.1.1.2 Technisches Modell

Bei Untersuchungen der nutzerseitigen Adoptionsfähigkeit elektrischer Fahrzeuge geht es darum, zu bewerten, ob die technischen Möglichkeiten der Fahrzeuge und der Ladeinfra-

Fahrtkette (tripChain)	Eigene Firma	Kunde	Fremde Firma	Eigene Firma
Distanz	---	10	15	25
Relevanter Strukturtyp (structureType)	---	Anzahl Haushalte	Anzahl Arbeitsplätze	---

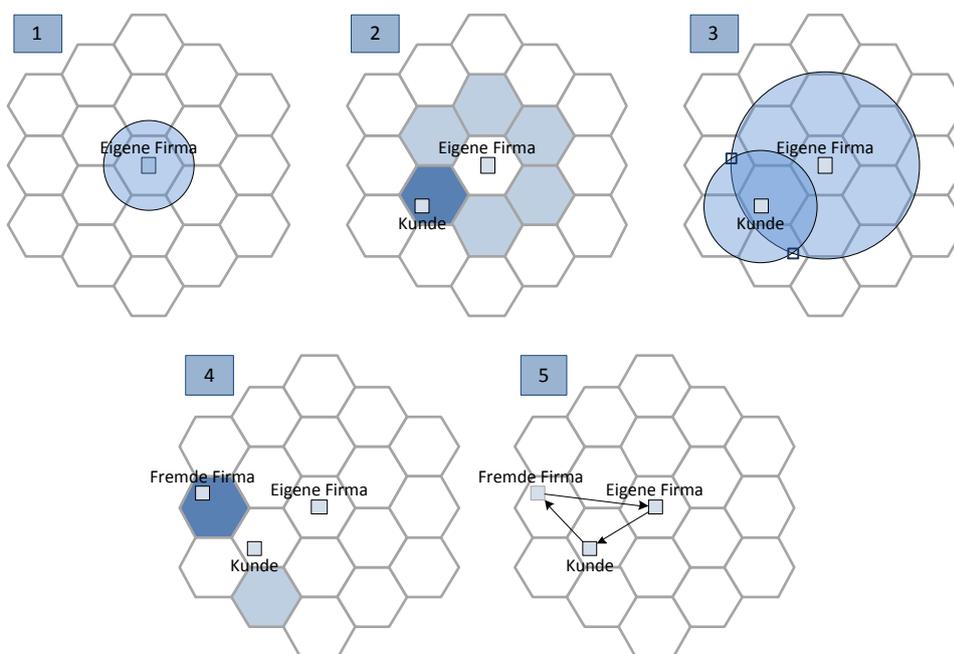


Abbildung 32 Verortungsprozess

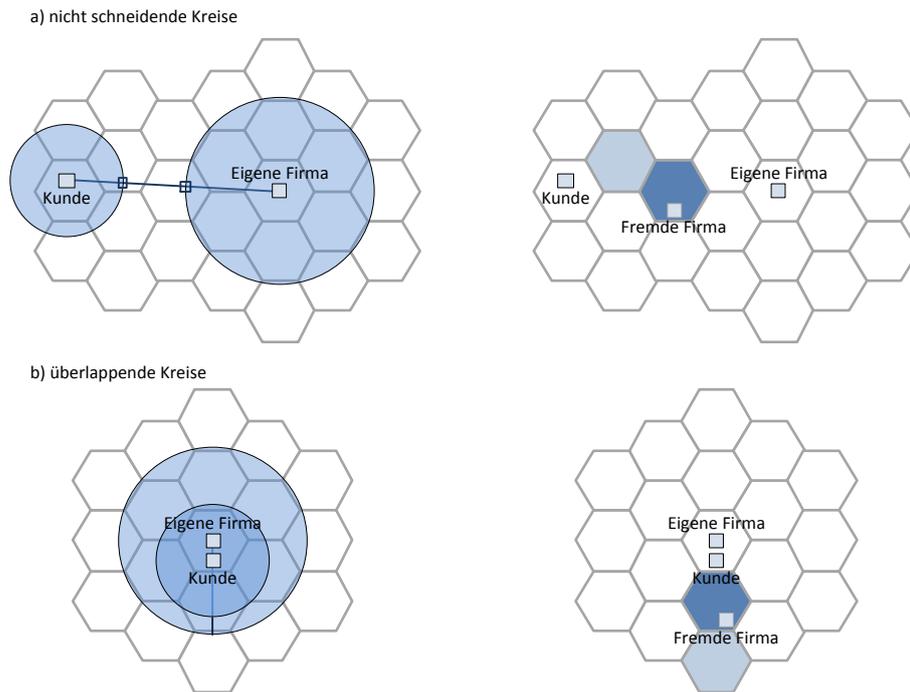


Abbildung 33 Sonderfallbehandlung bei der Verortung der letzten Fahrt

struktur ausreichen, um die Batterien der Fahrzeuge so bewirtschaften zu können, dass die Mobilitätscharakteristika der generierten Fahrtketten abgedeckt werden. Dabei gilt es auch Effekte zu berücksichtigen, die die Fahrzeuge auf den eigentlichen Transportgrund und auf das Transportvolumen haben. Die Elektrofahrzeuge können bspw. aufgrund von Kosten und Gewichtseinsparungen kleiner dimensioniert sein als das konventionelle Pendant und können somit vergleichsweise weniger Güter transportieren.¹¹ Neben der Modellierung der Kapazität der Batterie und des Verbrauchs des Fahrzeugs sind die für die eigentlichen Transportgründe relevanten Lagerräume zu berücksichtigen. Das gilt ebenfalls für die Infrastruktur, die z. B. bei Verwendung von Vorladespeichern oder in Form einer Batteriewechselstation durchaus über begrenzte Kapazitäten verfügt. Sämtliche Prozesse (z. B. der Austausch von Energie zum Laden der Batterie) werden als Austausch von Gütern abstrahiert. Das hier beschriebene Meta-Modell dient als Grundlage zur Erstellung des spezifischen Modells der Elektromobilität.

Das Klassendiagramm in Abbildung 34 stellt den Ausgangspunkt des Meta-Modells dar. Der LoadOwner ist das zentrale Element zur Beschreibung von Systemteilnehmern, die potenziell Güter lagern und austauschen können. Er verfügt über einen LoadManger, der

¹¹ Unter Gütertransport wird im Folgenden der Transport von Waren, Treibstoffen als auch Personen verstanden.

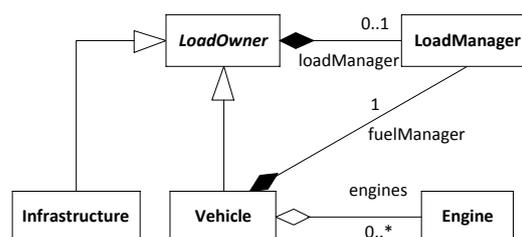


Abbildung 34 Technisches Modell: LoadOwner

für die Bewirtschaftung der eigenen Lagerräume zuständig ist. Er bietet grundlegende Funktionalitäten zum Reservieren, Hinzufügen und Entfernen von Gütern an. Das `Vehicle` und die `Infrastructure` spezialisieren diesen. Das `Vehicle` verfügt dabei über einen zusätzlichen `LoadManager`, den sog. `fuelManager`, der speziell die für die Fortbewegung notwendigen Treibstofftanks verwaltet. Die folgenden Ausführungen gehen näher auf die Modellierung des `LoadOwners`, der `Infrastructure` und des `Vehicles` ein und zeigen die Erweiterungspunkte auf, mit denen im folgenden Abschnitt die Elektrofahrzeuge modelliert werden.

LoadOwner / Infrastructure

Zentrale Klasse für die Bewirtschaftung der Lagerräume ist, wie oben beschrieben, der `LoadManager`. Abbildung 35 stellt ihn und seine assoziierten Klassen dar. Um Güter lagern und austauschen zu können, müssen die Charakteristiken der Güter zunächst definiert werden. Dieses geschieht mit der Klasse `LoadType`. Sie definiert eine Güterklasse zunächst durch ihr Volumen und Gewicht pro Einheit.

Zur Lagerung der Güter hat der `LoadManger` 0 bis n Laderäume (`LoadSpace`), die geeignet sind um Güter bestimmter Güterklassen zu lagern. Die Klasse `LoadTypeAmount` definiert dabei, welche Güterklassen ein `LoadSpace` aufnehmen kann und welche Menge von Gütern der jeweiligen Güterklassen sich aktuell in ihm befindet. Der `LoadSpace` bietet Funktionen für das Hinzufügen und Entnehmen der Güter (Methoden `add` und `remove`). Er hat zunächst keine Kapazitätsrestriktionen und ist deshalb abstrakt. Zur Abbildung von Kapazitätsrestriktionen wird die Klasse `LoadSpace` erweitert. Diese Restriktionen können sich auf die Stückzahl (`AmountLimitedLoadSpace`), das Volumen (`VolumeLimitedLoadSpace`) oder das Gewicht (`WeightLimitedLoadSpace`) beziehen. Auch Kombinationen (`LimitedLoadSpace`) oder nicht kapazitätsbeschränkte Lager (`UnlimitedLoadSpace`) sind dabei möglich. Jede dieser Spezialisierungen muss mindestens die abstrakte Methode `getMaximumToAdd` der Klasse `LoadSpace` überschreiben, um die spezifischen Kapazitätsrestriktionen beim Hinzufügen zu berücksichtigen.

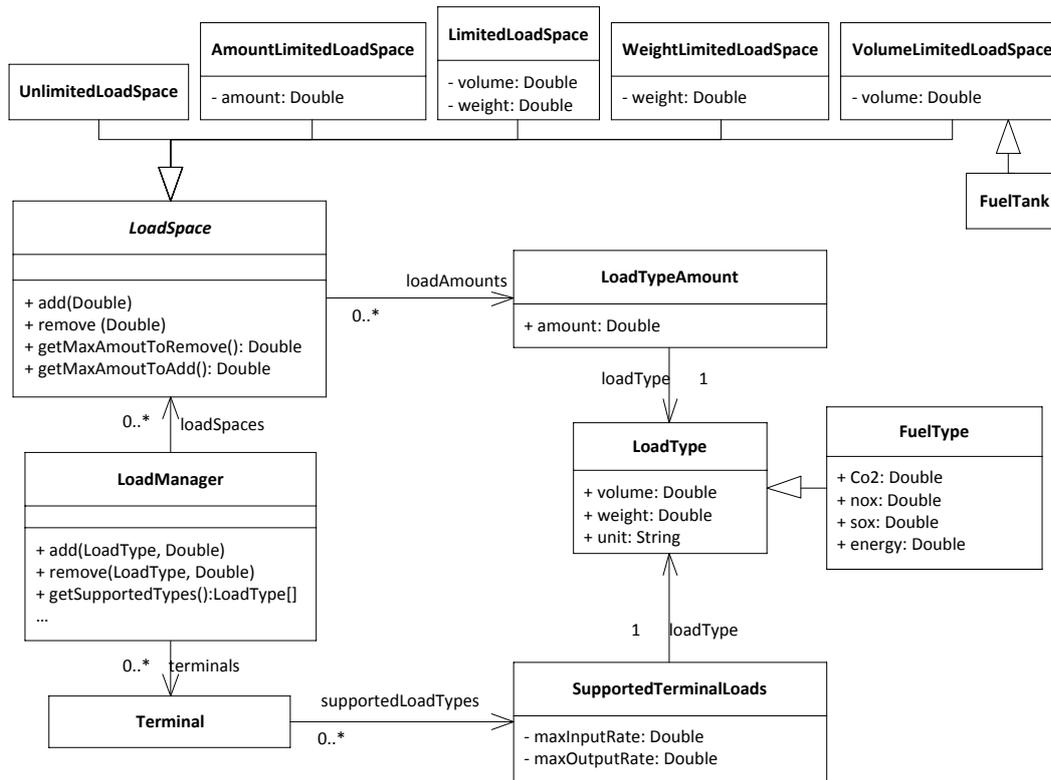


Abbildung 35 Technisches Modell: LoadManager

Der LoadManager ist für die Bewirtschaftung sämtlicher Laderäume zuständig. Er bietet auf höherer Ebene ähnliche Funktionen wie die einzelnen Laderäume an, um Güter hinzuzufügen oder zu entfernen (Methoden `add` und `remove`). Hier können Strategien bzw. Priorisierungen bei der Füllung bzw. Leerung der Laderäume implementiert werden. Für das Hinzufügen und Entnehmen von Gütern stehen Verladestellen bereit (Terminal), die einen oder mehrere Laderäume beladen können. Die Zuordnung zwischen den Terminals und dem LoadSpace ist über die Klasse `SupportedTerminalLoads` realisiert. Sie modelliert, welchen LoadSpace das Terminal mit welchem LoadType in welcher Geschwindigkeit be- und entladen kann (Attribute `maxInputRate` und `maxOutputRate`).

Da die Multi-Agenten-Simulation (Abschnitt 4.1.2), in der das Modell verwendet werden soll, ereignis-diskret ist, werden die Güter nicht kontinuierlich sondern in Summe zu bestimmten Zeitpunkten (i. d. R. nach Beendigung des Transfervorgangs) ausgetauscht. Zwischen Beginn und Ende des Austauschs können weitere Güterauschvorgänge beginnen bzw. enden und somit den Inhalt der LoadSpaces verändern. Damit jeder Prozess die zu Beginn vereinbarte Menge eines Gutes ein- oder auslagern kann ohne dass Kapazitätsrestriktionen verletzt werden, sind die entsprechenden Mengen des Gutes und das Terminal zu reservieren. Diese werden mit den zwei Klassen `LoadReservation` und

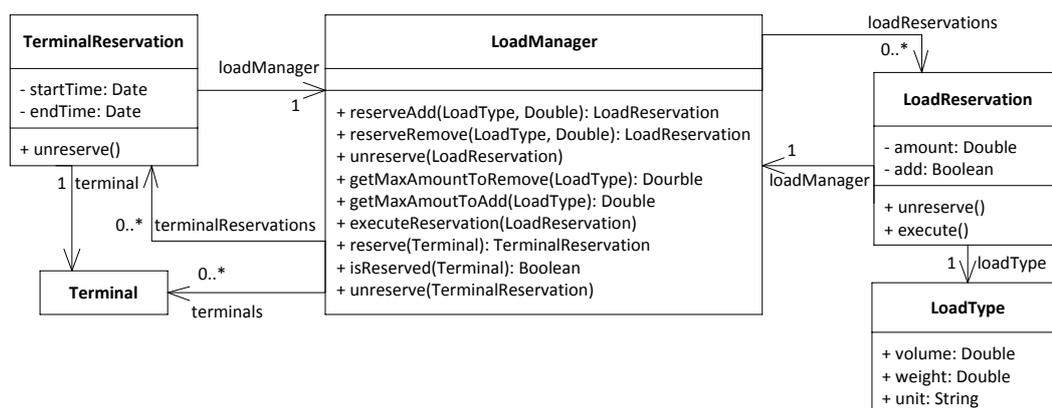


Abbildung 36 Technisches Modell: Reservierungen

TerminalReservation realisiert (s. Abbildung 36). Durch die Methoden `reserveAdd` und `reserveRemove` des `LoadManagers` werden `LoadReservations` für bestimmte Mengen eines `LoadTypes` erstellt. Sie gewähren den Verkehrsteilnehmern einen exklusiven Zugriff auf die reservierte Menge und garantieren somit die Durchführbarkeit des Güteraustausches über die gesamte Dauer. Der exklusive Zugriff wird dadurch sichergestellt, dass in den Methoden `getMaxAmountToAdd` und `getMaxAmountToRemove` des `LoadManagers` nicht nur der aktuelle Inhalt der `LoadSpaces` berücksichtigt wird, sondern auch die reservierten Mengen. Die `execute`-Methode fügt die reservierte Menge durch den `LoadManager` hinzu bzw. lässt diese entfernen. Um eine Reservierung aufzuheben, ohne dabei den Inhalt der `LoadSpaces` zu ändern, stehen entsprechende `unreserve`-Methoden im `LoadManager` und in der `LoadReservation` zur Verfügung. Analog zu den `LoadReservations` existieren `TerminalReservations`, die das entsprechende `Terminal` für den Lade-/Entladevorgang belegen. Damit kann ein `Terminal` immer nur zum jeweiligen Zeitpunkt für einen Güteraustausch verwendet werden.

Fahrzeuge

Das Fahrzeug (`Vehicle`) erweitert den `LoadOwner`. Abbildung 37 zeigt seine Komponenten. Der `fuelManager` des Fahrzeugs ist für die Bewirtschaftung der Laderäume bzw. der Tanks zuständig, die explizit für den Treibstoff zur Fortbewegung vorgesehen sind. Zur Darstellung der Treibstoffe werden zu diesem Zweck der `LoadType` spezialisiert (`FuelType`). Der `FuelType` besitzt neben den Attributen des `LoadTypes` weitere Eigenschaften für den Brennwert in Kilowattstunden sowie den Ausstoß von CO_2 , NO_x und SO_x in Gramm pro Einheit. Diese Werte können genutzt werden, um den Verbrauch und die Emissionen eines Verkehrsteilnehmers zu bestimmen. Zur Lagerung von Treibstoffen kann ein `FuelTank` benutzt werden, der von der Klasse `VolumeLimitedLoadSpace` abgeleitet ist. Zur Abbildung des Antriebstrangs des Fahrzeugs ist demnach der `fuelManager`

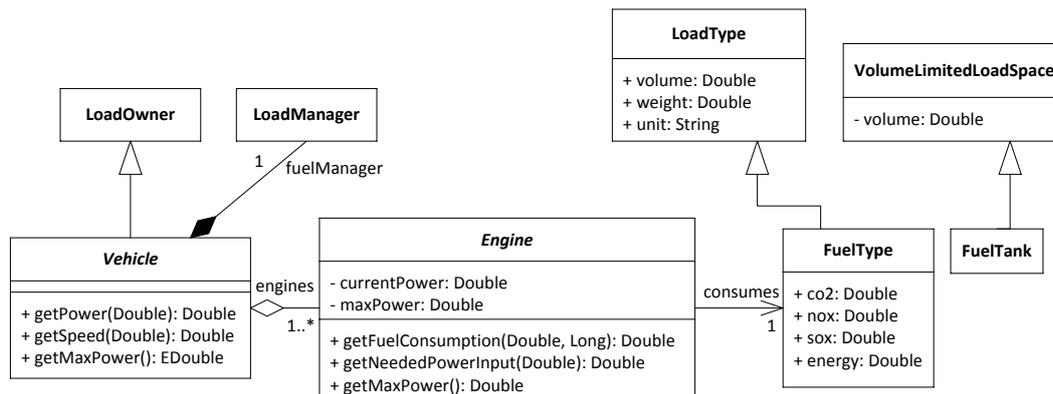


Abbildung 37 Technisches Modell: Vehicle

durch die Kombination von FuelTanks und FuelTypes bzw. mit Spezialisierungen dieser Klassen zu modellieren.

Für den Treibstoffverbrauch während der Fahrt verfügen die Fahrzeuge über einen oder mehrere Motoren (Engine). Die Engines stellen eine gewisse Leistung für die Fortbewegung bereit. Diese Leistung wird aus der Umwandlung der FuelTypes gewonnen, wobei jeder Motor nur eine Treibstoffart gebraucht. Der Verbrauch einer Engine wird über die Methode `getFuelConsumption` berechnet. Sie nutzt hierfür den Brennwert des FuelType und die benötigte Eingangsleistung der Engine in Kilowatt. Die benötigte Eingangsleistung ergibt sich aus der zur Verfügung gestellten Leistung und dem Wirkungsgrad des Motors. Die Methode `getNeededPowerInput` führt diese Berechnung durch und kann in den jeweiligen Domänen-Modellen erweitert werden um weitere Effekte von Eingangs- und Ausgangsleistung zu berücksichtigen. Diese Effekte können bspw. das Alter oder die bisherige Laufleistung des Motors betreffen. Neben dem Wirkungsgrad des Motors lassen sich darüber hinaus Effekte auf die tatsächliche maximale Leistung des Motors darstellen. Diese können in der Methode `getMaxPower` berücksichtigt werden.

Nachdem die Ausgangsleistung (in kW) bestimmt wurde, ist diese in die Geschwindigkeit des Fahrzeugs (km/h) zu überführen. Diese Konvertierung erfolgt in der Methode `getSpeed`. Als Umkehrfunktion dient die Methode `getPower`, die die benötigte Ausgangsleistung in Abhängigkeit der benötigten Geschwindigkeit berechnet. Auch diese Berechnung kann je nach betrachteten Detaillierungsgrad durch externe Faktoren wie z. B. Wind, Steigung, etc. beeinflusst werden. Somit bieten sich diese Methoden für die weitere Differenzierung in domänenspezifischen Modellen an.

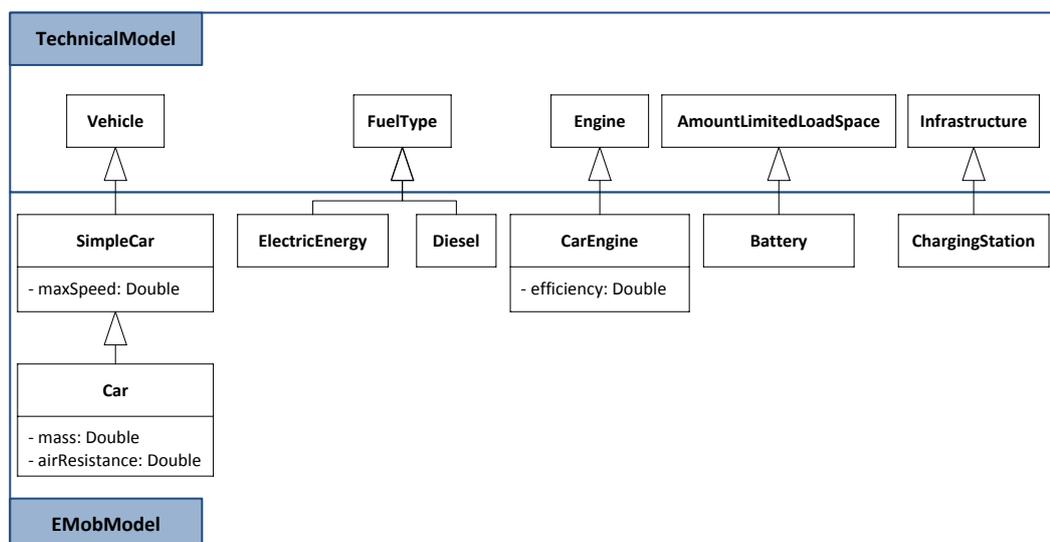


Abbildung 38 Klassendiagramm des E-Mob Modells

4.1.1.3 E-Mob Modell

Die Konzepte des im oben dargestellten technischen Modells unterstützen bereits zu einem großen Teil die Modellierung von Elektrofahrzeugen und der Ladeinfrastruktur. Wie in Abbildung 38 zu erkennen ist, werden die Klassen aus dem technischen Modell für die domänenspezifische Modellierung erweitert. Zusätzliche Funktionalitäten stellen lediglich die Klassen `SimpleCar`, `Car` und `CarEngine` bereit. Die anderen Klassen dienen der Typsicherheit innerhalb der Simulation (s. Abschnitt 4.1.2). Damit kann in der Simulation sichergestellt werden, dass z. B. ein Elektrofahrzeug nur Ladestationen (`ChargingStation`) findet und nur elektrische Energie (`ElectricEnergy`) austauschen kann.

Die Klasse `SimpleCar` spezialisiert die Klasse `Vehicle`. Sie weist eine maximale Geschwindigkeit auf, die das Fahrzeug fahren kann und erweitert die Methoden `getSpeed` und `getPower`. Diese Methoden beschreiben ein lineares Verhältnis von Leistung und Geschwindigkeit. Es gilt somit:

$$0 \leq \frac{power_{current}}{power_{max}} = \frac{speed_{current}}{speed_{max}} \leq 1 \quad (5)$$

Die Klasse `SimpleCar` stellt damit eine Basisklasse bereit, mit der die Geschwindigkeit und die Leistung innerhalb der Simulation gesetzt werden können. Dabei werden grundlegende physikalische Gegebenheiten wie z. B. der Windwiderstand, das Getriebe, Rollwiderstand, Gewicht des Fahrzeugs etc. vernachlässigt. Um genauere Beziehungen von Geschwindigkeit berücksichtigen zu können, spezialisiert die Klasse `Car` die Klasse `SimpleCar`. In den Methoden `getSpeed` und `getPower` werden die grundlegenden physi-

kalischen Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeit und benötigter Leistung nach Guzzella und Sciarretta abgebildet [Guzzella und Sciarretta (2013), S. 14]:

$$P_v = (F_L + F_R) \cdot v \quad (6)$$

mit

P_v = Benötigte Leistung des Fahrzeugs

F_L = Luftwiderstand

F_R = Rollwiderstand

v = Geschwindigkeit des Fahrzeugs

Die Klasse Car berücksichtigt demnach nur einen Teil der Widerstände die normalerweise bei der Berechnung der benötigten Leistung laut Guzzella und Sciarretta (2013) einfließen. Diese Herausnahme des Steigungs- und des Beschleunigungswiderstandes hat zwei Gründe. Zum einen können die beiden Widerstände aufgrund der fehlenden Relevanz für die Metropolregion Bremen/Oldenburg und für die Elektromobilität vernachlässigt werden. Die Metropolregion ist weitestgehend eine Flachlandregion ohne signifikante Erhöhungen, somit können Steigungswiderstände ignoriert werden. Der Beschleunigungswiderstand wird aufgrund der Rekuperationsfähigkeit der Elektrofahrzeuge nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass die Energie für die Beschleunigung des Fahrzeugs durch die Rekuperation wieder eingespeist werden kann (perfekte Rekuperation: [Guzzella und Sciarretta (2013), S. 26–27]). Zum anderen wurde auf eine Modellierung der Steigung von Strecken und der Beschleunigungs- und Bremsvorgänge der Fahrzeuge verzichtet (Mesoskopischer Ansatz). Somit entfällt der Nutzen den eine entsprechende Modellierung hier erzielen würde.

Die berücksichtigten Widerstände sind wie folgt definiert:

$$F_L = p \cdot A \cdot c_w \cdot v^2 \quad (7)$$

$$F_R = \mu \cdot m \cdot g \quad (8)$$

mit

p = Luftdichte

A = Querspanntfläche des Fahrzeugs

c_w = Strömungswiderstandskoeffizient (c_w -Wert) des Fahrzeugs

μ = Reibungskoeffizient

m = Masse des Fahrzeugs

g = Erdbeschleunigung

Zur Vereinfachung des Modells gehen die Parameter für die Luftdichte, Reibungskoeffizient und Erdbeschleunigung als Konstanten mit folgenden Werten ein:

$$p = 1,226 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$\mu = 0,015$ (PKW-Reifen auf Beton [Schmidt und Schlender (2003), S. 10])

$$g = 9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

Damit müssen die Masse des Fahrzeugs (Attribut `mass`), die Querspanntfläche des Fahrzeugs und der `cw`-Wert des Fahrzeugs für die Bestimmung der Leistung bereitgestellt werden. Letztere beiden werden durch das Attribut `airResistance` als Produkt zusammengefasst ($A \cdot c_w$).

Die Klasse `CarEngine` erweitert die Klasse `Engine`. Sie weist zusätzlich eine Effizienz des Motors auf. Diese gibt an welche Energie der Motor aus dem verwendeten Kraftstoff für die Fortbewegung gewinnt. Sie ist definiert als:

$$P_e = \frac{P_n}{e} \tag{9}$$

mit

$$0 \leq e \leq 1$$

und

P_e = Benötigte Leistung des Motors

P_n = Benötigte Ausgangsleistung des Motors

e = Wirkungsgrad des Motors

Für konventionelle Fahrzeuge reicht der `FuelTank` zur Beschreibung des Kraftstofftanks aus, da dieser von `VolumeLimitedLoadSpace` abgeleitet ist und somit die Maßeinheit der Kraftstoffe (Liter) unterstützt. Die Klasse `Battery` dient als Speicher für die elektrische Energie im Elektrofahrzeug. Im Gegensatz zum `FuelTank` spezialisiert sie den `AmountLimitedLoadSpace` um die Kapazität der `ElectricEnergy` in kWh zu berücksichtigen.

4.1.2 Simulation

Ziel der Simulation ist es, die oben dargestellten Modelle zeitlich und geografisch zusammenzubringen, die Interaktion zwischen den Fahrzeugen der Haushalte und der zur Verfügung stehenden Infrastruktur darzustellen, um im Anschluss die technischen Eigenschaften der Fahrzeuge und der Infrastruktur bewerten zu können. Das in diesem Abschnitt vorgestellte eigenentwickelte Multi-Agenten-Framework JASON und seine Erweiterungen konzentrieren sich vornehmlich auf den Kommunikations- und Austauschprozess zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur und weniger auf die exakte Darstellung des Verkehrs. Durch die Kombination von JASON mit dem in 4.1.1.1 dargestellten Mobilitätsmodell kommt diese Arbeit dem aus Abschnitt 3.5 identifizierten Handlungsbedarf nach, indem es ermöglicht wird, eine durchgängige Nutzermobilität abzubilden und gleichzeitig Kommunikationsprozesse und Entscheidungen der Nutzer während der Si-

mulation einfließen zu lassen. Mit den untersuchten Simulationsframeworks aus 2.3 ist diese Kombination nicht ohne Weiteres möglich.

Wie zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, eignen sich besonders Multi-Agenten-Simulationen dafür, die dargestellten Interaktionen abzubilden. Zur Erstellung einer Multi-Agenten-Simulation gibt es verschiedene Frameworks, die für die Umsetzung herangezogen werden können (z. B. MASON [Luke et al. (2003); Luke et al. (2005)], NetLogo [CCL (2014)], Repast [Argonne National Laboratory (2014)], JADE [Telecom Italia (2007)] etc.). Sie unterscheiden sich in ihrem Zeitverhalten und in ihrer Modellierung der zu untersuchenden Agenten. Zur Verdeutlichung wird im Folgenden kurz auf die beiden Frameworks MASON und JADE eingegangen.

MASON ist ein Simulationsframework zur Erstellung von diskreten Simulationen [Luke et al. (2003); Luke et al. (2005)]. Das Framework stellt einen diskreten *Event-Scheduler* zur Verfügung, der die zeitliche Ausführung der Prozesse organisiert. Zur räumlichen Darstellung dienen Felder (sog. Fields), auf denen die Agenten sich bewegen können, um ihre Ziele zu verfolgen. Die Agenten können sich dazu in den *Scheduler* eintragen lassen und werden zu dem entsprechenden Zeitpunkt wieder aufgerufen. Jeder Agent hat eine spezielle Methode (*step*), die in diesem Fall ausgeführt wird und Zugriff auf die Felder der Simulation hat. In MASON ist es schwierig, komplexe Agenten, deren Struktur und Verhaltensmöglichkeiten zu modellieren, da sämtliche Aktionsmöglichkeiten in dieser *step*-Methode verwaltet werden müssen [Railsback et al. (2006)]. Aus demselben Grund ist die parallele Durchführung von unterschiedlichen Verhalten nur schwer umsetzbar, da der Agent beim Aufruf wissen muss, für welche Aktion er gerade aufgerufen wurde. Besonders bei längeren parallelen Prozessen, bei denen der Agent zwischendurch mehrfach aufgerufen wird, kann die Implementierung schnell unübersichtlich, komplex oder gar unmöglich werden.

Ein alternatives und auf die Kommunikation und Interaktion von Agenten spezialisiertes Agenten-Framework stellt JADE (Java Agent Development) dar [Bellifemine und Caire (2008)]. Agenten stellen autonome Computersysteme dar, die definierte Verhalten eigenständig nutzen können, um in ihrer Umwelt zu agieren. Die Kommunikation der Agenten bildet den Kern von JADE und erfolgt FIPA-konform. Die FIPA stellt eine Kommunikationsbasis für heterogene, interagierende Agentensysteme bereit [Dale (2014)]. Die Kommunikation und die Planung von Interaktionen zwischen Agenten erfolgt hier über Nachrichten. Die Aktionen der Agenten werden durch *build-in*-Verhalten, sog. *Behaviours* gesteuert, die die Logik der Agenten beinhalten. In JADE agieren die Agenten dabei in Echtzeit.

JADE stellt somit im Gegensatz zu MASON eine geeignete Basis bereit, damit Agenten parallel unterschiedliche Aktionen durchführen können und sich asynchron über Nach-

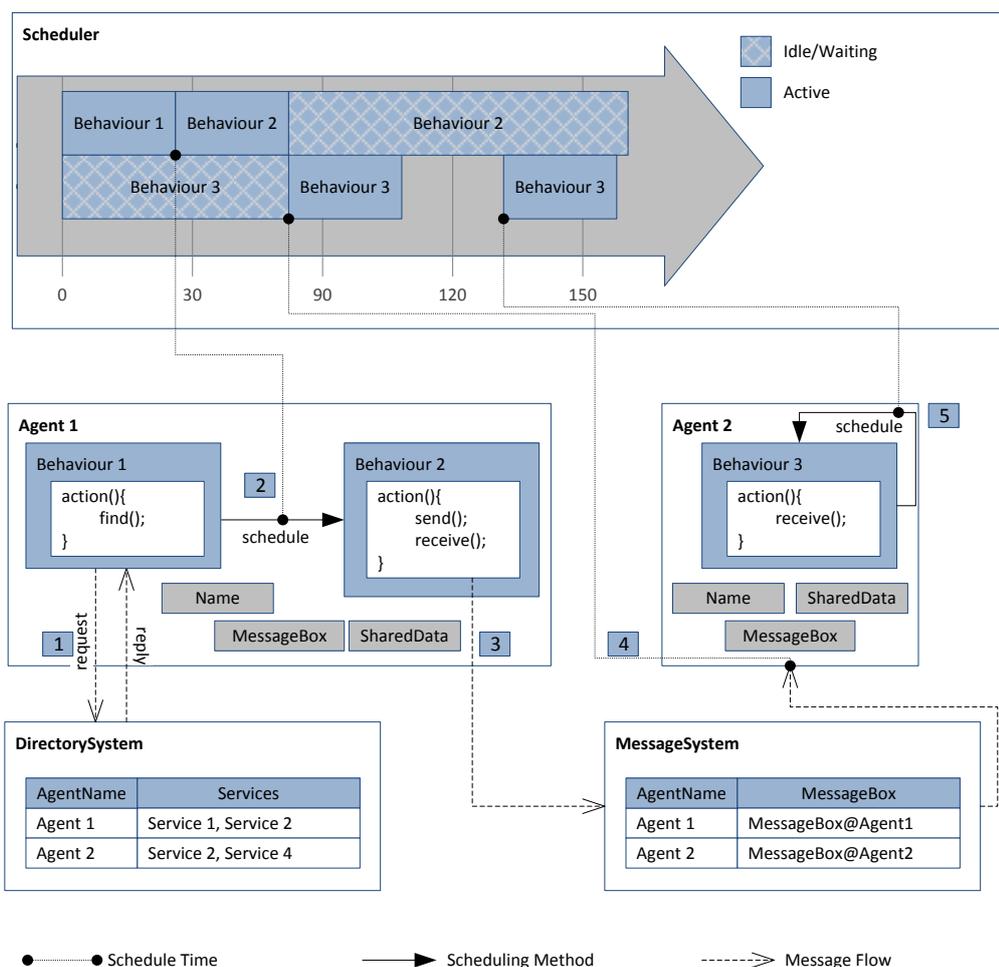


Abbildung 39 Ablaufbeispiel von JASON

richten verständigen können. MASON bringt auf der anderen Seite den Vorteil des integrierten *event-basierten Schedulers*, womit *Idle*-Zeiten der Agenten übersprungen werden und Szenarien mit langem Betrachtungshorizont schneller simuliert und bewertet werden können. Der Ansatz dieser Arbeit sieht eine Vereinigung der Vorteile der beiden Frameworks vor, so dass die Kommunikationsprozesse der Agenten nachrichtenbasiert ablaufen, die Agenten parallel mehrere Aktionen durchführen können und ein Simulationslauf in einem Bruchteil des betrachteten Zeithorizonts durchführbar ist. Diese Kombination wird durch das eigenentwickelte Multi-Agenten-Framework JASON (Jade + mASON) umgesetzt. Ähnlich wie im Planungsmodell ist die Simulation in mehrere Abstraktionsebenen unterteilt (vgl. Abbildung 22 auf Seite 63). JASON stellt dabei den Ausgangspunkt dar, indem es die grundlegenden Elemente der Multi-Agenten-Simulation bereitstellt, wie z. B. Agenten, Verhalten, ein Nachrichtensystem etc. Darauf aufbauend werden die Elemente um die abstrakten Verkehrsobjekte erweitert. Analog zum technischen Modell

dient diese grundlegende Verkehrssimulation als Basis für die domänenspezifischen Modelle (hier: E-Mob Simulation). Auf die drei dargestellten Aspekte JASON, Verkehrssimulation und E-Mob-Simulation gehen die nächsten drei Abschnitte genauer ein.

4.1.2.1 Basis-Framework JASON

Das Framework JASON stellt die notwendigen Funktionen einer diskreten und eventbasierten Multi-Agenten-Simulation bereit. Zu den zentralen Komponenten gehören

1. der Agent, der eine Entität innerhalb des Systems darstellt,
2. seine durch *Behaviours* beschriebenen Verhaltensmöglichkeiten,
3. seine Leistungen (*Services*), die er anderen bereitstellen kann,
4. ein *Scheduler*, der für die Koordination der Zeit zuständig ist und
5. ein Nachrichtensystem über das die Agenten per Nachrichten kommunizieren können.

Für einen ersten Überblick stellt Abbildung 39 den Ablauf innerhalb der Simulation exemplarisch dar. In diesem Beispiel stellt *Agent 2* einen *Service* bereit, den *Agent 1* in Anspruch nehmen möchte. *Agent 2* hat für die Annahme von Serviceanfragen das *Behaviour 3* im *Scheduler* eingeplant, das auf Nachrichten wartet (Status *Idle/Waiting*). *Agent 1* sucht über das *Behaviour 1* den gewünschten *Service* im *DirectorySystem*, das ein Verzeichnis (*Yellow Pages*) über die Agenten und ihre angebotenen *Services* verwaltet (Schritt 1). Daraufhin wird ein zweites *Behaviour* in den *Scheduler* eingeplant, das die Anfrage an *Agent 2* durchführt (*send()*) und wiederum auf eine Antwort von *Agent 2* wartet (*receive()*) (Schritt 2). Die Anfrage wird in Form einer Nachricht durch das *MessageSystem* an *Agent 2* übermittelt (Schritt 3). Dieser hat die Möglichkeit die Nachricht zu ignorieren oder darauf zu reagieren. Dazu wird das *Behaviour 3* aktiviert (Schritt 4), das dann seine Entscheidung treffen kann (Schritt 5).

Auf die einzelnen Komponenten *Agent*, *Behaviour* und *Service*, *Simulation* und *Scheduler* sowie das *MessageSystem* und deren Zusammenhänge gehen die nachfolgenden Ausführungen detaillierter ein.

Simulation und Scheduler

Die *Simulation*-Klasse ist der Kern des Frameworks (s. Abbildung 40). Agenten müssen sich bei der *Simulation* registrieren, um ihre *Behaviours* in den *Scheduler* einplanen und das Nachrichtensystem (*MessageSystem*) nutzen zu können. Nach der Registrierung werden die Agenten initialisiert, um sich z. B. zu positionieren oder die ersten *Behaviours* einzuplanen. Die *Simulation*-Klasse hat einen definierten Start- und Endzeitpunkt. Der Durchlauf durch die *Simulation*-zeit wird über den *Scheduler* realisiert. Nachdem sich alle Agenten registriert haben, beginnt die *Simulation* mit dem Aufruf der *start-*

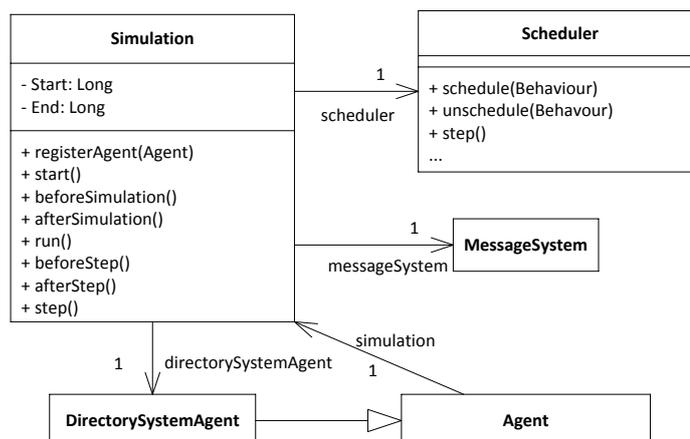


Abbildung 40 Simulations-Klasse in JASON (Klassendiagramm)

Methode. Diese führt nacheinander die Methoden `beforeSimulation`, `run` und `afterSimulation` auf. Die `run`-Methode beinhaltet die eigentliche Simulation. Durch die Methoden `beforeSimulation` und `afterSimulation` ist es möglich, die Simulation um weitere Logik zu erweitern, indem bspw. die Simulation zusätzlich kalibriert wird oder die Simulationsergebnisse nach Beendigung gespeichert werden. Für das Fortschreiten der Simulation greift die `run`-Methode auf den Scheduler zu. Dieser ist dafür zuständig, dass Behaviours zu bestimmten Simulationszeiten (sog. Steps) ausgeführt werden. Die `run`-Methode führt, analog zur `start`-Methode, die Methoden `beforeStep`, `step` und `afterStep` des Schedulers auf. Durch `beforeStep` und `afterStep` kann der Scheduler durch weitere Logik erweitert werden. Das Durchlaufen der Simulation erfolgt schrittweise, wobei immer zu dem nächsten Zeitschritt gesprungen wird, in dem ein Behaviour eingeplant ist. Leere Zeiträume werden demnach übersprungen. Ein Zeitschritt ist beendet wenn kein Behaviour mehr aktiv ist. Die Simulation läuft solange bis entweder der definierte Endzeitpunkt erreicht wird oder keine weiteren Behaviour für die zukünftige Simulationszeit eingeplant sind. Neben dem Scheduler stellt jede Simulation einen speziellen Agenten, den sog. `DirectorySystemAgent` bereit. Er verwaltet die Services, die von den Agenten angeboten werden und stellt diese Information anderen Agenten zur Verfügung (s. folgenden Abschnitt).

Agent, Behaviour und Service

Der Agent dient dazu, Akteure innerhalb einer Simulation darzustellen. Abbildung 41 stellt die `Agent`-Klasse und ihre Assoziationen dar. Wie in JADE agieren die Agenten über Behaviours, die ihre definierten Aktionen ausführen, sobald sie von dem Scheduler zum jeweiligen Simulationszeitpunkt aufgerufen werden. Die Agenten verwalten Behaviour übergreifende Daten und bieten grundlegende Funktionen an. Das

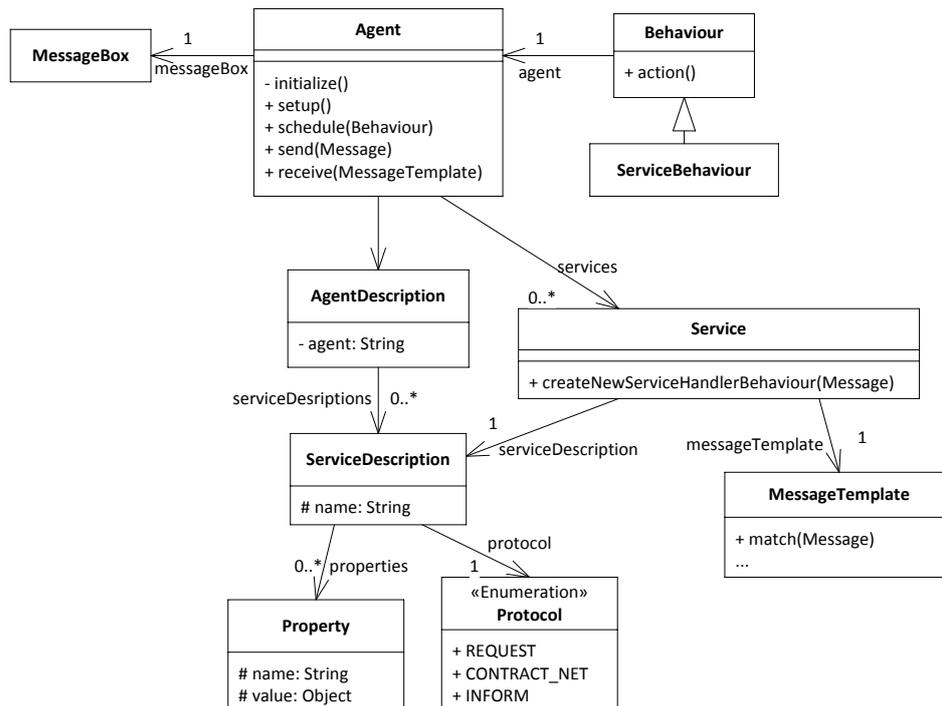


Abbildung 41 Agent-Klasse in JASON (Klassendiagramm)

betrifft z. B. das Senden und Empfangen von Nachrichten, das Hinzufügen und Entfernen eines Behaviours in bzw. aus dem Scheduler sowie das Bereitstellen von Services.

Ein Behaviour beschreibt das Verhalten eines Agenten, indem es die action-Methode implementiert. Diese wird vom Scheduler zu den bestimmten Simulationszeitpunkten aufgerufen. Behaviours können sich oder andere Behaviours über den Agenten einplanen. Da ein Behaviour immer zu einzelnen Zeitpunkten aufgerufen wird und nur punktuell eine Aktion durchführt, wird die Dauer einer Aktion über das mehrfache eigene Wiedereinplanen erreicht. Dazu muss das Behaviour seinen Status kennen, so dass durch den erneuten Aufruf der action-Methode die korrekte Handlung durchgeführt wird.

Jeder Agent kann Leistungen anbieten, die andere Agenten in Anspruch nehmen können. Dieses geschieht über die Service-Klasse. Ein Service besteht aus einer Service-Description, einem MessageTemplate und einer Methode zur Erstellung des Behaviours, das die Anfrage eines Agenten bearbeitet (Methode createServiceHandlerBehaviour). Die ServiceDescription beschreibt was ein Service anbietet und mit welchem Protokoll die Abwicklung von Serviceanfragen stattfindet. Darüber hinaus können Services bestimmte Eigenschaften haben, die zusätzlich abgeglichen werden können (Properties). Angebotene Services eines Agenten werden von dessen ServiceBehaviour verwaltet. Das ServiceBehaviour ist dafür zuständig, die initialen Nachrichten aller Serviceanfragen zu empfangen, den passenden Service zu finden und der Nachricht

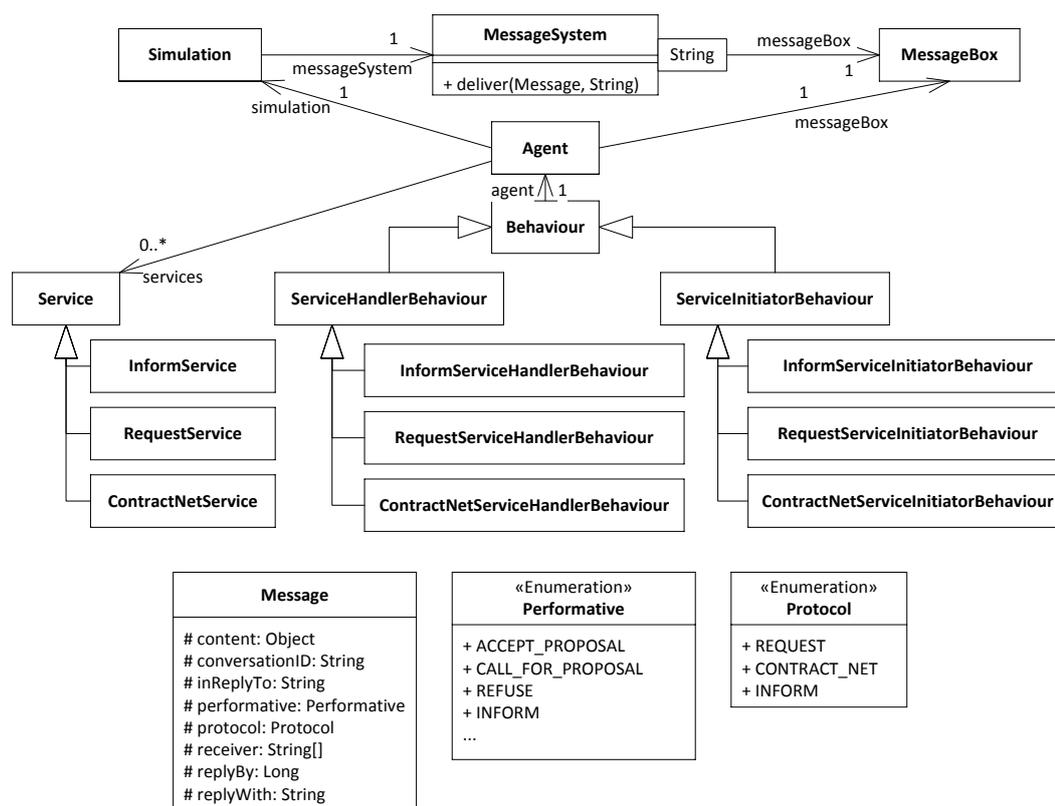


Abbildung 42 MessageSystem-Klasse in JASON (Klassendiagramm)

zuzuweisen. Die ServiceBehaviour-Klasse vergleicht die einkommenden Nachrichten mit dem MessageTemplate der angebotenen Services. Stimmt der Inhalt der initialen Nachricht mit dem MessageTemplate eines Services überein, wird durch die Methode createNewServiceHandlerBehaviour das Behaviour erstellt, das die Anfrage annimmt und bearbeitet (ServiceHandlerBehaviour). Hierunter fallen neben der Bearbeitung der initialen Nachricht auch alle weiteren Schritte der Kommunikation mit dem Initiator.

Um von anderen Agenten gefunden zu werden, hat jeder Agent eine AgentDescription, die neben eindeutigen Namen des Agenten die ServiceDescriptions der angebotenen Services beinhalten. Möchte ein Agent einen Service anbieten, registriert er seine AgentDescription beim DirectorySystemAgent. Über diesen können dann die Namen der Agenten für die weitere Kommunikation gefunden werden.

MessageSystem und Kommunikation

Die Agenten agieren innerhalb der Simulation und können durch Nachrichten (Message) kommunizieren und interagieren. Jede Message enthält einen Sender und einen oder mehrere Empfänger. Der eigentliche Inhalt der Nachricht ist ein einfaches Objekt. Das ermöglicht das Senden verschiedener Inhalte. Weiterhin weist jede Nachricht ein ID-Feld auf,

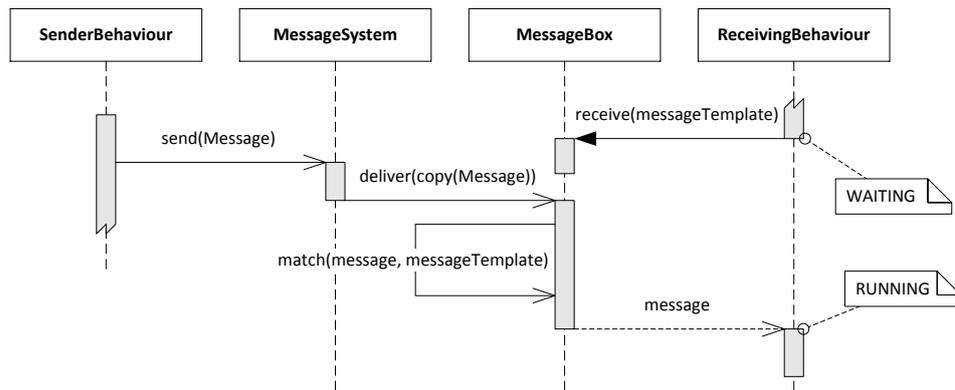


Abbildung 43 Nachrichtenfluss in JASON (Sequenzdiagramm)

das die Nachricht einer Konversation zuordnet. Außerdem ist es möglich, über entsprechende Felder Antworten auf eine Nachricht der Ursprungsnachricht zuzuordnen sowie ein Timeout für Antworten vorzugeben. Über das `Protocol`-Feld wird das für die Kommunikation verwendete Protokoll angegeben. Das `Performative`-Feld beinhaltet den aktuellen Stand des Kommunikationsverlaufs in Anlehnung an das FIPA-Performative (s. u.). Sollte die Nachricht für eine Anfrage eines Dienst verwendet werden, kann der `ServiceName` in das dafür vorgesehenen Feld eingetragen werden.

Für den Empfang von Nachrichten verfügt jeder Agent über einen Postkasten (`MessageBox`) (s. Abbildung 42). Er beinhaltet die Liste aller empfangenen Nachrichten eines Agenten und bietet eine Funktion, um aus der Liste eine Nachricht zu entnehmen, die einem `MessageTemplate` entspricht. Das `MessageTemplate` ermöglicht das Filtern von Nachrichten. Vorgefertigte `MessageTemplates` können Nachrichten hinsichtlich der Erfüllung bestimmter Kriterien überprüfen, bspw. ob ein bestimmtes Protokoll verwendet wird.

Der Nachrichtenfluss wird durch ein eigenes Nachrichtensystem gesteuert (`MessageSystem`). Jeder Agent trägt sich durch die Registrierung bei der Simulation in das `MessageSystem` mit seinem eindeutigen Namen und seiner `MessageBox` ein. Durch das `MessageSystem` können die Agenten die Nachrichten an die jeweiligen Empfänger senden. Ein Beispiel ist in Abbildung 43 dargestellt. Ein `Behaviour`, das auf eine Nachricht von einem anderen Agenten wartet, trägt sich dazu in der `MessageBox` seines Agenten mit dem abzugleichenden `MessageTemplate` ein (Methode `receive`) und wartet anschließend bis eine passende Nachricht eintrifft. Ein sendendes `Behaviour` eines Agenten kann dem wartenden `Behaviour` eines anderen Agenten Nachrichten durch das `MessageSystem` schicken (Methode `send`). Das `MessageSystem` stellt jedem der in der `Message` eingetragenen Empfänger eine Kopie der Nachricht zu. Das Kopieren der Nachricht erfolgt, um Konflikte zu vermeiden, da ggf. mehrere Agenten diese Nachricht bearbeiten und ggf.

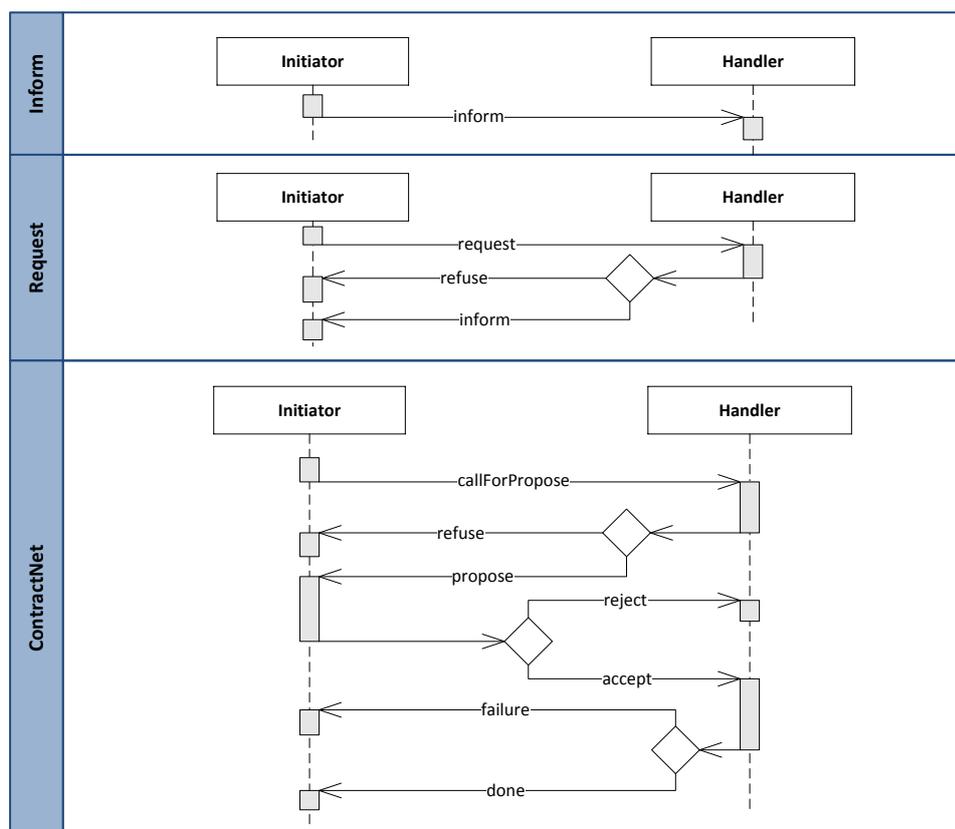


Abbildung 44 Kommunikationsprotokolle in JASON [Dale (2002); Odell (2002)]

ändern. Die `MessageBox` der empfangenden Agenten gleicht die einkommende Nachricht mit den `MessageTemplates` der wartenden `Behaviours` ab (Methode `match`). Sollte die Nachricht zu dem `MessageTemplate` eines wartenden `Behaviours` passen, wird diese aus der Warteschlange entfernt und dem entsprechenden `Behaviour` übersendet. Dieses führt daraufhin seine weiteren Aktionen durch.

JASON bietet zur Kommunikation eines serviceanfragenden Agenten (Initiator) mit einem service anbietenden Agenten (Handler) drei Protokolle, die den Kommunikationsfluss zwischen den beiden Agenten vorgeben (s. Abbildung 44). Diese drei Protokolle sind:

1. Inform-Protokoll: Ein Initiator kann dieses Protokoll verwenden, um einen oder mehrere Anbieter über ein Ereignis zu informieren.
2. Request-Protokoll: Das Request-Protokoll ist angelehnt an das entsprechende FI-PA-Protokoll [Dale (2002)]. Es erlaubt einem Initiator, eine Anfrage an einen oder mehrere Anbieter zu stellen. Dieser kann die Anfrage bearbeiten, zurückweisen oder eine Fehlermeldung zurückgeben.

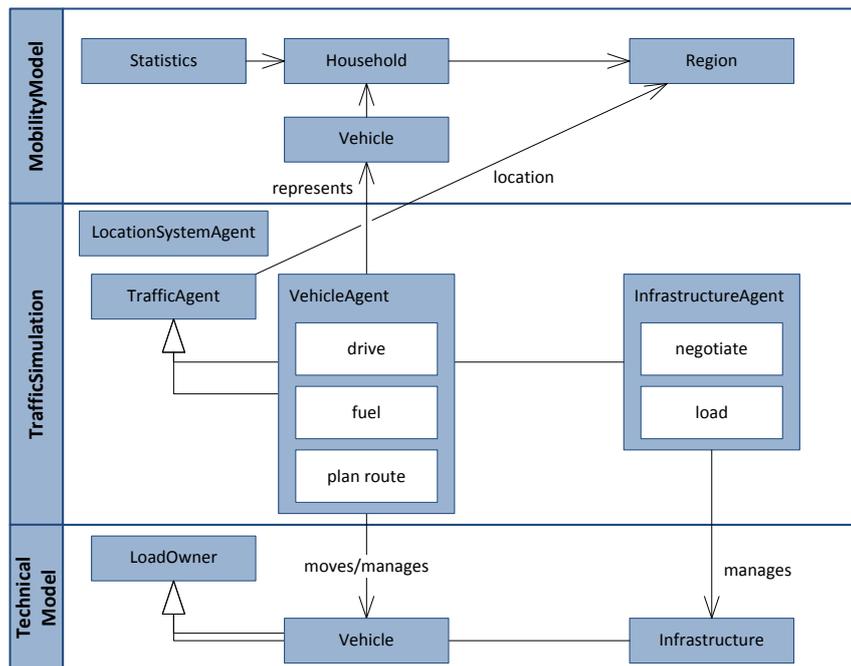


Abbildung 45 Aufbau der Verkehrssimulation (TrafficSimulation)

3. **Contract-Net-Protokoll:** Das Contract-Net-Protokoll ist ebenfalls an das entsprechende FIPA-Protokoll angelehnt [Odell (2002)]. Das Protokoll bestimmt den Ablauf einer Verhandlung. Ein Initiator bittet einen oder mehrere Anbieter, ihm ein Angebot auf eine Anfrage zu machen. Der Anbieter kann ein Angebot zurücksenden oder die Teilnahme an der Verhandlung ablehnen. Sobald der Initiator die Antworten aller Anbieter erhalten hat, kann er ein oder mehrere Angebote annehmen oder zurückweisen. Die Anbieter, deren Angebote angenommen wurden, bearbeiten die Anfrage und melden das Ergebnis zurück (Erfolg bzw. Fehlermeldung).

Für jedes dieser Protokolle stellt JASON die jeweiligen Service-Klassen und die jeweiligen Behaviours pro Rolle (Initiator und Handler) bereit.

4.1.2.2 Verkehrssimulation

Die Klassen der Verkehrssimulation erweitern die grundlegenden Klassen von JASON und ermöglichen die Simulation von domänenspezifischen Verkehrssystemen. Die Erweiterungen betreffen insbesondere die Klassen `Agent`, `Behaviour` und `Service`. Zusätzlich wird auf dieser Ebene das oben beschriebene Mobilitätsmodell und technische Modell integriert. Abbildung 45 stellt den Zusammenhang grafisch dar. Zur Berücksichtigung der räumlichen Strukturen spezialisiert der `LocationSystemAgent` den `DirectoryAgent` aus JASON. Neben den angebotenen Services der Agenten verwaltet dieser zusätzlich die

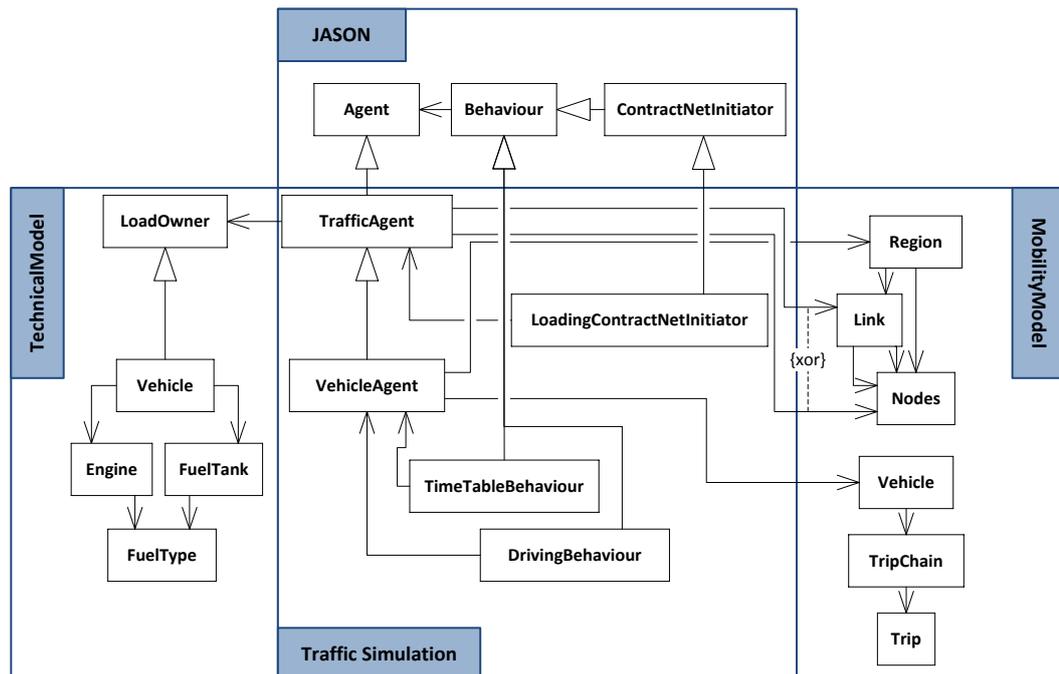


Abbildung 46 VehicleAgent-Klasse der Verkehrssimulation (TrafficSimulation)

Positionen der Agenten auf dem Verkehrsnetz und kann diese auf Anfrage bereitstellen. Der `TrafficAgent` stellt die Superklasse von Verkehrsteilnehmern dar, die von den Klassen `VehicleAgent` und `InfrastructureAgent` spezialisiert wird. Ein `VehicleAgent` stellt ein Objekt dar, das sich über das Netzwerk bewegen kann. Es kann z. B. Routen planen, Fahrten durchzuführen und Aktionen an den Zielorten initiieren (z. B. Tanken). Der `InfrastructureAgent` ist eine stationäre Einheit innerhalb des Verkehrsnetzes und bietet einen Service z. B. zum Tausch von Gütern an. Dazu gehören grundlegende Funktionen, um den Tausch durchzuführen (z. B. Verhandlung, Transfer). Um zu bestimmen, welche Möglichkeiten die Agenten bei ihren Aktionen haben, wird der `VehicleAgent` und der `InfrastructureAgent` mit den Klassen `Vehicle` bzw. `Infrastructure` aus dem technischen Modell verknüpft. Zum Beispiel kann so bestimmt werden mit welcher Geschwindigkeit sich das Fahrzeug auf dem Verkehrsnetz bewegen oder wie schnell der Gütertransfer von einem `InfrastructureAgent` erfolgen kann. Darüber hinaus ist jeder `VehicleAgent` mit dem Fahrplan eines Fahrzeugs aus dem Mobilitätsmodell verknüpft, der seine täglichen Aufgaben bestimmt. Die folgenden Abschnitte gehen näher auf die grundlegenden Eigenschaften des `TrafficAgents` sowie seine Erweiterungen `VehicleAgent` und `InfrastructureAgent` ein.

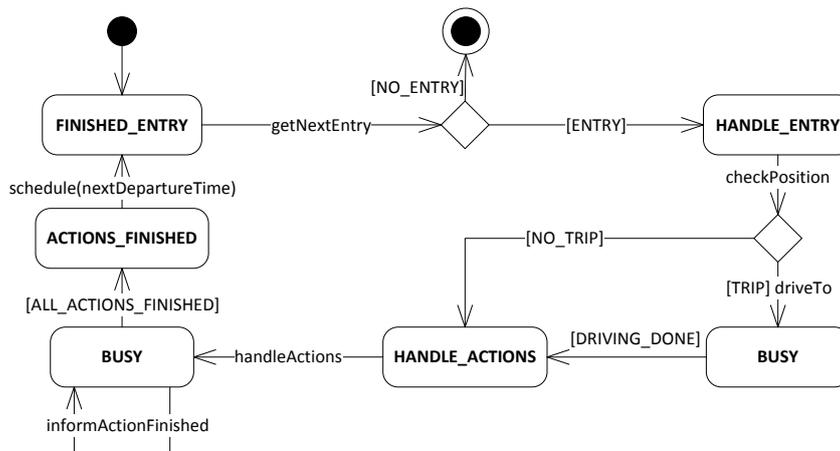


Abbildung 47 Zustandsdiagramm des TimeTableBehaviours

VehicleAgent

Der `VehicleAgent` stellt einen Agenten dar, der in der Verkehrssimulation ein Fahrzeug steuert. Abbildung 46 zeigt das entsprechende Klassendiagramm. Er weist eine Position innerhalb des Verkehrsnetzes auf, die sich entweder auf einer Kante oder auf einem Knoten befinden kann. Darüber hinaus kennt ein `VehicleAgent` die Region und das entsprechende Verkehrsnetz, um seine Routen planen zu können. Er weist drei grundlegende Behaviours auf, um in bzw. mit seiner Umwelt agieren zu können: `TimeTableBehaviour`, `DrivingBehaviour` und `LoadingContractNetInitiator`. Das `TimeTableBehaviour` ist dabei die zentrale Klasse für die Ausführung des zugeordneten Fahrplans aus dem Mobilitätsmodell. Es wird genutzt, um Aktionen eines Fahrzeugagenten in chronologischer Reihenfolge durchzuführen. Für die Verwaltung hat das `TimeTableBehaviour` mehrere Status. Die Übergänge dieser Status ist in Abbildung 47 dargestellt. Zu Beginn der Simulation startet das `TimeTableBehaviour` im Status `FINISHED_ENTRY`. Dort holt es sich den nächsten abzuarbeitenden Eintrag aus dem Fahrplan des Fahrzeugs. Sollte es einen geben, wird überprüft, ob sich das Fahrzeug bereits an der gewünschten Position befindet (`HANDLE_ENTRY`). Sollte das nicht der Fall sein, wird die Methode `driveTo` aufgerufen, die das Fahrzeug zu der gewünschten Position bewegt. Dazu erstellt das `TimeTableBehaviour` ein neues `DrivingBehaviour`, plant es in den Scheduler ein und setzt seinen Status auf `BUSY`. Nach Beendigung der Fahrt (s. `DrivingBehaviour` unten) beginnt das `TimeTableBehaviour` mit der Abarbeitung der Aufträge, die an dem Zielort durchgeführt werden sollen (`HANDLE_ACTIONS`). Diese sind i. d. R. ebenfalls als Behaviours definiert und melden dem `TimeTableBehaviour` zurück, wenn die Aktion abgeschlossen ist. Sofern der früheste Abfahrtstermin nach Beendigung der Aktionen des Eintrags

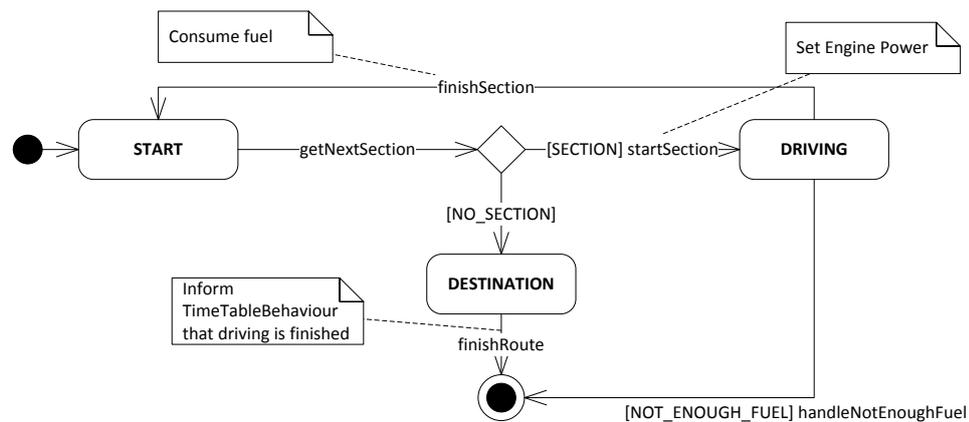


Abbildung 48 Zustandsdiagramm des DrivingBehaviours

(ACTIONS_FINISHED) bereits überschritten wurde, wird der nächste Fahrplaneintrag abgearbeitet. Sollten alle Aktionen des Fahrplaneintrags vor dem frühesten Abfahrtsstermin fertiggestellt worden sein, wird eine entsprechende Wartezeit eingeplant. Jeder Übergang von einem Status in den nächsten kann dabei durch Spezialisierungen mit eigener Logik erweitert werden, um so auch komplexe Planungsmethoden umsetzen zu können, wie z. B. die Umgestaltung der Fahrpläne in Abstimmung mit anderen Agenten.

Die Klasse `DrivingBehaviour` dient zur Bewegung des Fahrzeugs auf einer vorgegebenen Route (Liste mit `Links`). Zur Organisation des Ablaufs hat das `DrivingBehaviour` die in Abbildung 48 dargestellten Zustände. Zu Beginn (`START`) holt es sich den nächsten `Link` und berechnet auf der Grundlage der Streckendaten über die technischen Eigenschaften des Fahrzeugs die benötigte Leistung für die erforderliche Geschwindigkeit und den notwendigen Treibstoff. Dieser wird im Fahrzeug reserviert (s. Abschnitt 4.1.1.2: `LoadOwner`). Sollte nicht genügend Treibstoff zur Verfügung stehen, wird die Methode `handleNotEnoughFuel` ausgeführt, die ggf. Maßnahmen zur Vermeidung des Ausfalls implementieren kann. Sollte genügend Treibstoff bereitstehen, wird der aktuelle Standort des Agenten auf die aktuelle Strecke gesetzt und dem `LocationSystemAgent` mitgeteilt (`DRIVING`). Das `DrivingBehaviour` wird zur geschätzten Ankunftszeit in den Scheduler eingeplant. Nach der Ankunft wird der reservierte Kraftstoff im Fahrzeug verbraucht, die Position (auf den Zielknoten der Strecke) aktualisiert und der nächste Streckenabschnitt gestartet (`START`). Nach Beendigung der gesamten Route wird der Status auf `DESTINATION` gesetzt und das `TimeTableBehaviour` über die Beendigung informiert (s. Abbildung 47: `DRIVING_DONE`). Auch hier sind sämtliche Methoden durch spezialisierte Klassen des `DrivingBehaviours` erweiterbar, um zusätzliche Funktionen zu implementieren.

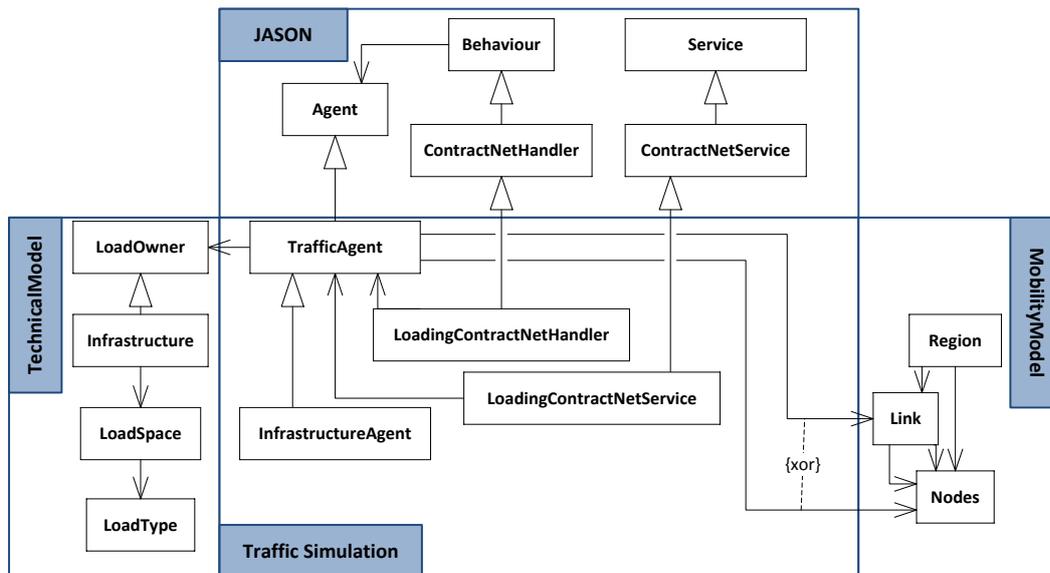


Abbildung 49 InfrastructureAgent-Klasse der Verkehrssimulation (TrafficSimulation)

Die Klasse `LoadingContractNetInitiatorBehaviour` dient dazu, an den jeweiligen Zielorten einen Lade- oder Entladevorgang zu initiieren. Es stellt die Funktionen der Initiator-Seite des `ContractNet` aus Abbildung 44 bereit. Sie sind zusammen mit den Ausführungen zum `InfrastructureAgent` unten dargestellt.

InfrastructureAgent

Der `InfrastructureAgent` ist eine Spezialisierung des `TrafficAgent` (s. Abbildung 49) und bietet die Möglichkeit Güter anderen Agenten bereitzustellen bzw. Güter von anderen Agenten entgegenzunehmen. Dazu verwendet er den `LoadingContractNetService`, der eine Spezialisierung des `ContractNetService` von JASON darstellt. Das `ContractNet`-Protokoll gibt den Ablauf für einen Gütertausch vor. Diesen stellt Abbildung 50 dar.

Das `LoadingContractNetInitiatorBehaviour` bietet dem `TrafficAgent` entsprechende Logik für die Aktionen auf der Service-anfragenden Seite an. Der `TrafficAgent` verwendet dieses `Behaviour`, um einen Austausch von Gütern zwischen ihm und einem weiteren `TrafficAgent` zu initiieren. Dazu reserviert er zunächst eine Verladestelle (`Terminal`) für die Transaktion und eine Menge der auszutauschenden Güter (`LoadType`). Die Reservierung selbst erfolgt über den `LoadManager` des jeweiligen `LoadOwners` (s. Abschnitt 4.1.1.2). Nachdem die Reservierung erfolgreich durchgeführt wurde, erzeugt der Service-anfragende `TrafficAgent` über die `createInitiationMessage`-Methode eine `CALL_FOR_PROPOSE`-Nachricht, mit der die entsprechende Güterklasse, die Menge und die maximale Durchsatzrate des Gütertauschs mitgeteilt werden. Diese

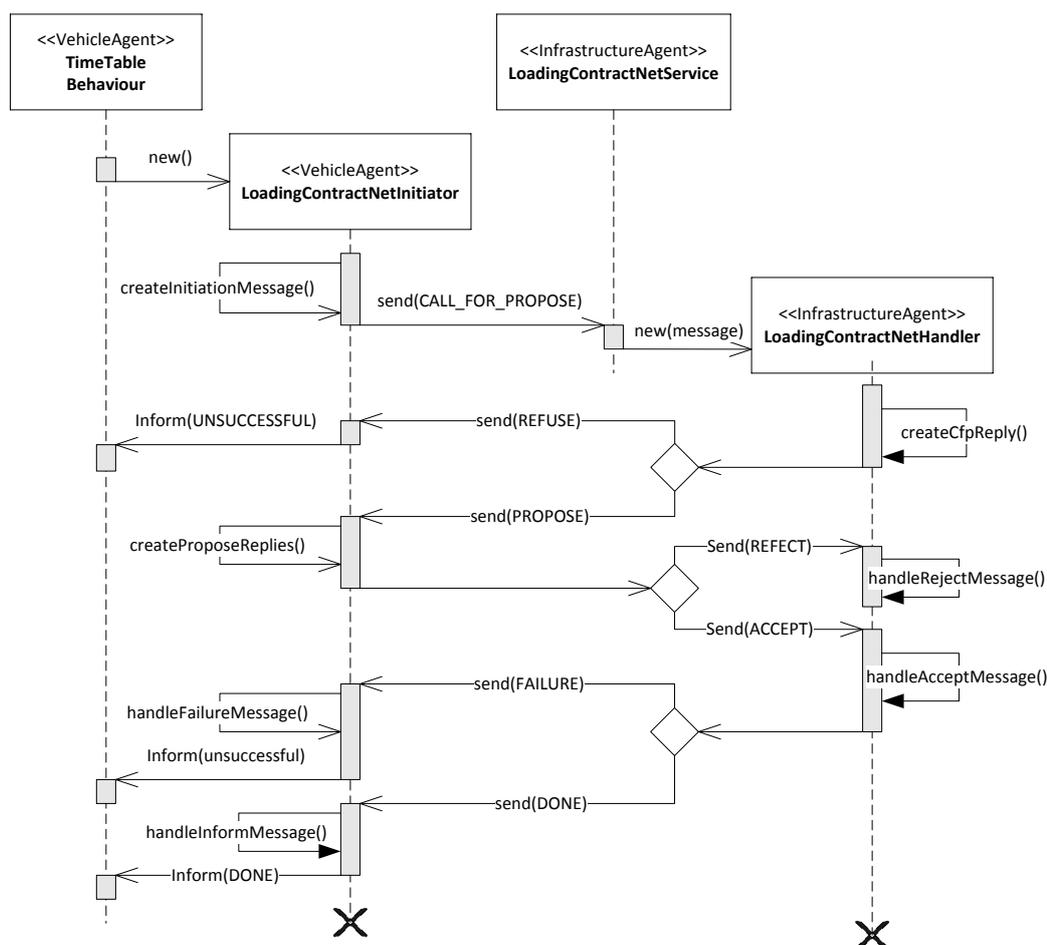


Abbildung 50 Loading Contract Net Service

Nachricht sendet er an beliebig viele Service-anbietende TrafficAgents. Sobald der anfragende Agent die Antworten aller Anbieter erhalten hat, kann er ein Angebot über `createProposeReplies` annehmen und andere Angebote zurückweisen.

Die benötigte Logik zur Bearbeitung der Anfrage stellt das `LoadingContractNetHandler`-Behaviour bereit. Der Service-anbietende `LoadOwnerAgent` verwendet dieses Behaviour, um auf die Service-Anfrage reagieren zu können. Wenn eine Service-Anfrage ankommt, überprüft der Agent, ob er diese Anfrage erwidern kann. Mit `getTerminalReservation` überprüft er, ob ein Terminal frei ist und reserviert dieses bzw. bricht die Verhandlung mit einer entsprechenden Nachricht ab. Ist ein Terminal frei, aber die Durchsatzrate entspricht nicht der Anfrage, kann eine von der Anfrage abweichendes Angebot abgegeben werden. Zudem wird durch die `getLoadReservation`-Methode überprüft, ob der angeforderte `LoadType` in ausreichender Menge verfügbar ist. Auch hier kann ein Angebot mit einer geringeren Menge abgegeben werden. Über `createCfpReply` erzeugt der Agent eine Nachricht zur Beantwortung der Serviceanfrage. Dabei kann er

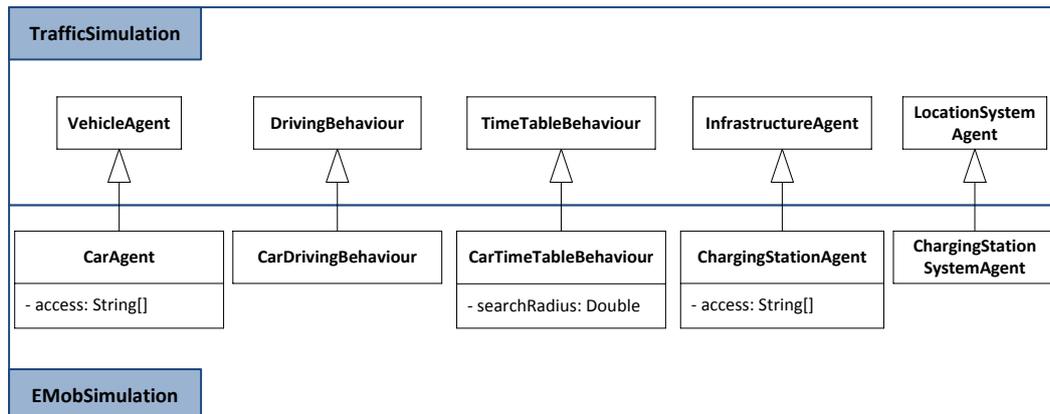


Abbildung 51 Erweiterung der Verkehrssimulation durch die E-Mob Simulation (1)

eine Ablehnung (REFUSE) senden, falls er diesen Service nicht bieten kann, bzw. möchte, oder eine Zustimmung (PROPOSE), sofern er den Gütertausch bereitstellen kann bzw. möchte. Sobald der service-anfragende LoadOwnerAgent das Angebot annimmt, beginnt der Anbieter mit dem Gütertausch. Dazu werden, nach der für den Austausch benötigten Zeitspanne, die angebotenen Güter aus dem LoadManager entfernt und der anfragende Agent über den erfolgreichen Austausch informiert. Dieser führt seine Reservierung entsprechend auf seinem LoadManager aus.

4.1.2.3 E-Mob Simulation

Die im vorherigen Abschnitt erläuterte Verkehrssimulation stellt die Grundlage für die Simulation der Elektrofahrzeuge bereit. Sie wird um die relevanten Elemente erweitert, um die Elektrofahrzeuge, Ladestationen und Ladevorgänge abzubilden. Besonders die grundlegenden Behaviours der Verkehrssimulation werden erweitert, um die domänen-spezifische Verhaltenslogik der Elemente zu beschreiben. Diese Erweiterungen sind grob in den Abbildungen 51 und 52 dargestellt und werden in den folgenden Ausführungen näher beschrieben.

CarAgent

Der CarAgent ist eine Spezialisierung des VehicleAgent und repräsentiert ein konkretes Straßenfahrzeug. Ob dieses Straßenfahrzeug ein konventionelles oder elektrisches Fahrzeug darstellt, ist durch das E-Mob Modell definiert. Das grundlegende Verhalten für das Planen der Fahrten und das Fahren sind in den Behaviours CarDrivingBehaviour bzw. CarTimeTableBehaviour beschrieben. Auch hier erfolgt keine Differenzierung des Verhaltens zwischen den Fahrzeugtypen (konventionell/elektrisch). Das CarDrivingBehaviour folgt dem definierten Verhalten des zugrundeliegenden DrivingBehaviours

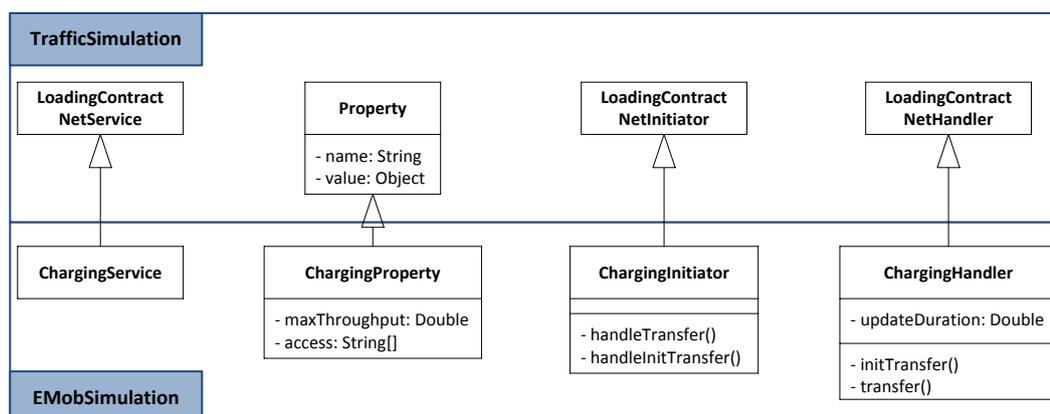


Abbildung 52 Erweiterung der Verkehrssimulation durch die E-Mob Simulation (2)

und erweitert dieses lediglich um zusätzliche Funktionalität zum Loggen der Positionen, der zurückgelegten Distanzen und der Verbräuche. Das `CarTimeTableBehaviour` erweitert das `TimeTableBehaviour`, um die Planung von Ladevorgängen mit einzubeziehen. Um anzugeben, wie flexibel der entsprechende Agent bei der Suche nach Ladestationen ist, hat das `CarTimeTableBehaviour` das Attribut `searchRadius`, innerhalb dessen eine Ladestation in bestimmten Situationen gesucht wird. Die erweiterte Handlungsabfolge ist in Abbildung 53 dargestellt. Vor der Fahrt (`HANDLE_ENTRY`) wird zunächst geprüft, ob genügend Energie zur Verfügung steht, um das nächste Ziel zu erreichen. Sollte das nicht der Fall sein, wird innerhalb des vorgegebenen Radius (`searchRadius`) eine Ladestation gesucht. Diese erfolgt über den `ChargingStationSystemAgent`, der die konkreten Ladestationen verwaltet und bei der Anfrage die Zugriffsrestriktionen berücksichtigt (s. u.). Der `ChargingStationSystemAgent` sucht die Ladestationen heraus und schickt diese an das `CarTimeTableBehaviour`. Dieses priorisiert die Ladestationen (standardmäßig nach Ladeleistung) und erstellt einen neuen Fahrplaneintrag mit dem neuen Ziel. Sollte keine Ladestation in der Umgebung sein, fällt das Fahrzeug aus, indem der Ausfall geloggt und das Fahrzeug aus der Simulation entfernt wird (`BREAKDOWN`). Hat das Fahrzeug genügend Energie, fährt es zu dem Zielort des Fahrplaneintrages. Dort angekommen (`HANDLE_ACTIONS`) wird standardmäßig nach einer Ladestation am jeweiligen Zielort (Suchradius = 0) gesucht und, wenn gefunden, ein Ladevorgang eingeleitet. Der Ablauf des Ladevorgangs ist detailliert in dem nächsten Abschnitt beschrieben.

ChargingStationAgent

Die Klasse `ChargingStationAgent` repräsentiert eine konkrete Ladestation innerhalb des Netzwerks und bietet einen `ChargingService` zum Laden der Fahrzeuge an. Der `ChargingStationAgent` bzw. sein Service ist so ausgestaltet, dass es nur für Elektrofahrzeuge möglich ist, den Dienst in Anspruch zu nehmen. Um von einer Ladestation geladen

werden zu können, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein: zum einen müssen die technischen Parameter des Fahrzeugs zu denen der Ladestation passen und zum anderen muss es dem Fahrzeug möglich sein, die Ladestation zu erreichen. Ersteres wird über die Parameter aus dem E-Mob Modell bestimmt, letzteres über die Attribut `access` des `CarAgent` und des `ChargingAgent`. Die durch das Attribut `access` vorgegebenen Zeichenketten bestimmen dabei, auf welche Ladestationen ein `CarAgent` Zugriff hat. Dazu muss mindestens jeweils eine Zeichenkette von `CarAgent` und `ChargingStation` übereinstimmen. Die Verwendung von Zeichenketten ermöglicht hierbei eine einfache und flexible Definition von Zugangsrestriktionen. Somit kann der Zugang eines einzelnen `CarAgents` (z. B. privater Zugang), der Zugang einer Gruppe von `CarAgents` (z. B. Arbeitsplatz) der allgemeine Zugang (z. B. öffentlich) oder eine Kombination aus den dreien spezifiziert werden. Die Gewährung des Zugangs erfolgt durch den `ChargingSystemAgent`. Bei einer Anfrage eines `CarAgent` gleicht dieser den angefragte `FuelType` (hier: `Electricity`), die maximale Ladeleistung und die `access`-Zeichenketten mit den `ServiceDescriptions` (der Ladestationen) und den enthaltenen `ChargingProperties` ab. Diese beschreiben, mit welcher Leistung (`maxThroughput`) die anbietende Ladestation die elektrische Energie für welche `CarAgents` (`access`) bereitstellt. Neben der oben genannten Zugriffsüberprüfung über die Attribute `access`, findet die technische Überprüfung statt. Hierbei wird der angefragte und angebotene `FuelType` und die angefragte und angebotene Ladeleistung verglichen. Der Zugang wird gewährt, wenn die beiden `FuelTypes` übereinstimmen und der `CarAgent` die gleiche oder eine höhere Ladeleistung annehmen als die Ladestation abgeben kann. Somit wird verhindert, dass ein Fahrzeug z. B. an einer Schnellladestation lädt, obwohl es technisch nicht dafür geeignet ist. Auf eine Modellierung von Steckerstandards wird verzichtet, könnte aber über eine weitere Ergänzung des technischen bzw. E-Mob Modells realisiert werden.

Neben der Suche nach Ladestationen wurde auch der Austauschprozess zwischen Fahrzeug und Ladestation erweitert. Der von der Verkehrssimulation bereitgestellte `LoadingContractNetService` sieht den letztendlichen Austausch der Güter erst nach Beendigung des Transfervorgangs vor. Dieser Transferzeitraum kann bis zu mehrere Stunden dauern. Für die Implementierung von weiterführenden Mechanismen, die im Zusammenhang mit der Elektromobilität stehen, wie z. B. das gesteuerte Laden von Elektrofahrzeugen durch das Smart Grid und für nachgelagerte energierelevante Analysen (z. B. Netzstabilitätsbewertung), sind diese Zeiträume zu groß. Aus diesem Grund spezialisiert der `ChargingInitiator` den `LoadingContractNetInitiator` und der `ChargingHandler` den `LoadingContractNetHandler`, um den Transfervorgang in Teilschritten abzuwickeln (s. Abbildung 54). Der `ChargingHandler` gibt mit seinem Attribut `chargingDuration` dabei die Frequenz der Einzeltransfers vor. Vor jedem Transferzeitraum wird durch den

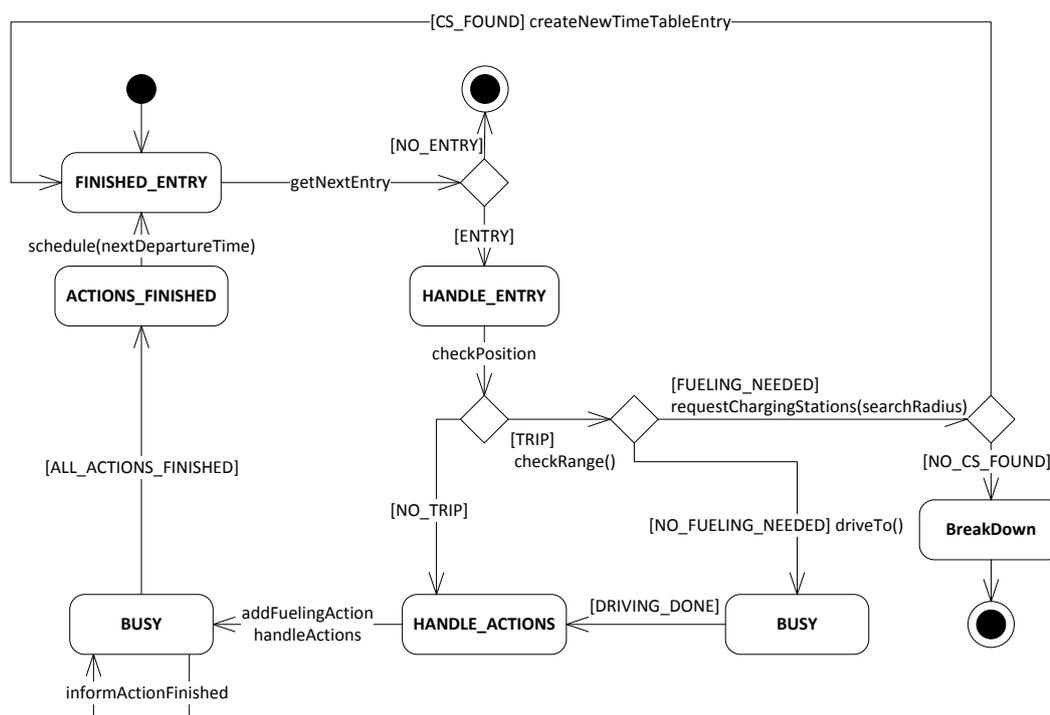


Abbildung 53 Zustandsdiagramm CarTimeTableBehaviour

ChargingHandler der Transfer unter Vorschlag der Ladeleistung und des Zeitraums initiiert. Der ChargingInitiator kann über die Methode handleInitTransfer reagieren und ggf. einen Gegenvorschlag machen. Nach Beendigung der Transferzeit, wird die tatsächlich realisierte Leistung und der Zeitraum an den ChargingInitiator übergeben, der darauf den Ladestand der Batterie des Fahrzeugs aktualisieren kann. Die Information über die tatsächlich ausgenutzte Leistung wird an den ChargingHandler zurückgegeben. Die Initialisierung und Durchführung der Transfers wird solange wiederholt bis die Abfahrtszeit des Fahrzeugs erreicht ist oder bis die Batterie des Fahrzeugs voll geladen ist. Durch diesen Ablauf können zwei Aspekte berücksichtigt werden. Das Smart Grid kann auf diese Weise die Leistung vorgeben, die an der jeweiligen Ladestation bereitsteht und der Ladeverlauf der Batterie findet explizit Berücksichtigung beim Transfer. Da die meisten Lithium-Batterien einen logarithmischen Ladeverlauf aufweisen [Jossen (2014); Galus et al. (2012a)], wird bei hohen Ladezuständen nur noch ein Bruchteil der Ladeleistung in Anspruch genommen. Dieser Zusammenhang kann über die zweite Rückkopplung (TRANSFER) abgebildet werden. Der dargestellte Ablauf geht davon aus, dass eine der beiden involvierten Klassen dominant ist und letztendlich die Entscheidung über die Art und Weise des Transfers vorgibt. Soll eine gleichberechtigte Verhandlung dargestellt werden, müsste sich die INIT_TRANSFER Phase sooft wiederholen bis eine Einigung der beiden Agenten erreicht ist.

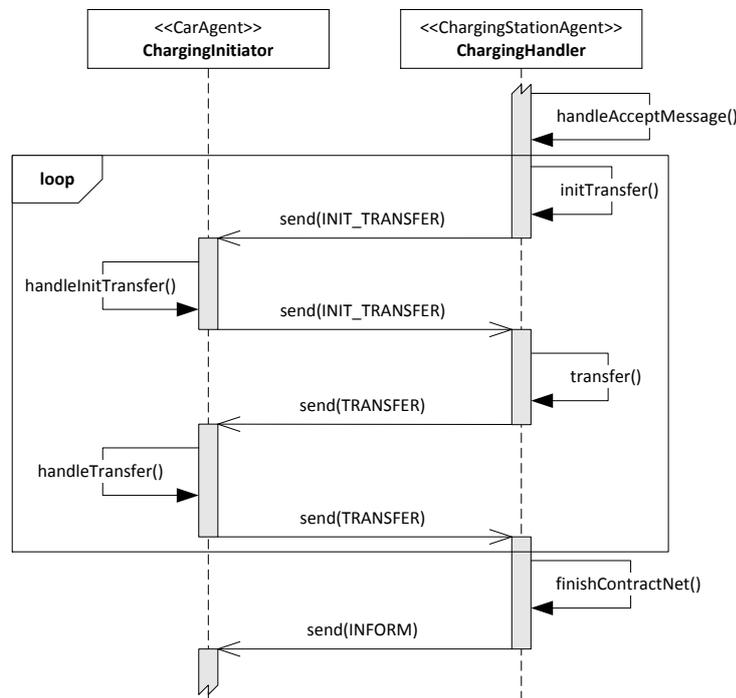


Abbildung 54 Sequenzdiagramm ChargingService (Ausschnitt)

4.2 Implementierung

Die folgenden Abschnitte befassen sich mit der Implementierung der Konzepte aus Abschnitt 4.1. Die einzelnen Komponenten wurden mithilfe der Programmiersprache Java, der Eclipse IDE und dem Eclipse Modeling Framework entwickelt. Der Prototyp ist in mehrere Plug-in Projekte unterteilt. Das ermöglicht die flexible Verwendung sämtlicher oder nur einzelner Komponenten für eine spätere Produktentwicklung oder für weiterführende Konzepte. Somit ist z. B. das Mobilitätsmodell auch für andere Studien verwendbar, die sich nicht auf Elektromobilität fokussieren oder JASON auch für andere Domänen erweiterbar bei denen das Planungsmodell nicht benötigt wird. Die Projektstruktur orientiert sich an der oben dargestellten Architektur und differenziert sowohl die beiden Ebenen Modell und Simulation als auch die drei Abstraktionsschichten (vgl. Abbildung 22 auf Seite 63). Die folgenden Abschnitte konzentrieren sich vornehmlich auf die Beschreibung von speziellen Implementierungsdetails der Modell- und der Simulationsebene, die für das weitere Verständnis notwendig sind. Zudem werden die verwendeten externen Bibliotheken und deren Einsatzzwecke erläutert.

4.2.1 Modellebene

Die Modelle aus Abschnitt 4.1.1 wurden mithilfe des Eclipse Modeling Frameworks (EMF) erstellt. Mit EMF ist es möglich, aus strukturierten Datenmodellen Java Code zu generieren. Dazu beinhaltet das EMF ein eigenes Metamodell (sog. Ecore-Metamodell) um diese Datenmodelle zu erstellen. Es konzentriert sich dabei auf die Aspekte der Unified Modeling Language (UML), die sich auf das Klassendiagramm beziehen. EMF stellt zudem Funktionen bereit, die für die weitere Verwendung der Modelle erleichtern. Zum Beispiel beinhaltet es ein leistungsstarkes Framework, mit denen die Modelle persistiert werden können (z. B. als XML-Datei oder als Datenbankobjekte) oder ein Editor-Generator, mit dem eine einfache Benutzerschnittstelle zur Erstellung und Bearbeitung von Modellinstanzen erstellt werden können. Jeder dieser Komponenten ist individuell anpassbar und erweiterbar [Steinberg und Budinsky (2011)].

Die in 4.1.1 beschriebenen Funktionalitäten wurden in den Methoden der generierten Java-Klassen implementiert. Dabei gingen folgende Aspekte bei der Modellerstellung und der Implementierung ein:

Generics Das mit EMF erstellte Planungsmodell verwendet besonders in den untersten Schichten weitestgehend *Generics* bei der Abbildung der Klassen. Es bietet den Vorteil auf untersten Ebenen grundsätzliche Methoden implementieren zu können und Typsicherheit bei der Verwendung der Modellkomponenten zu garantieren. Damit ist sichergestellt, dass Fehler bei der Verwendung der Modelle bereits vor der Ausführung ausgeschlossen werden. Dieser Zusammenhang wird exemplarisch anhand der in Abschnitt 4.1.1.2 erläuterten Modellelementen `LoadOwner` und `Vehicle` dargestellt (vgl. dazu Abbildung 34 auf Seite 79). Der `LoadOwner` hat einen `LoadManager`, der allgemein Laderäume (`LoadSpaces`) verwaltet. Das `Vehicle` (Spezialisierung des `LoadOwners`) hat einen zusätzlichen `LoadManger` (`fuelManager`), um seine speziellen Laderäume, die Treibstofftanks zu bewirtschaften. In dem Modell muss nun sichergestellt sein, dass der `fuelManager` seine Treibstofftanks auch nur mit Treibstoff (`FuelType`) befüllen kann. Durch die Verwendung von *Generics* ist es nun möglich diese Typensicherheit zu garantieren ohne zusätzlich eine eigene `FuelManager`-Klasse erstellen zu müssen. Damit können die Funktionen des `LoadManagers` (`LoadManager<LT extends LoadType>`) generell für ein generisches Objekt implementiert werden (hinzufügen und entnehmen von Gütern aus dem Laderaum). Das `fuelManager`-Attribut des `Vehicle` ist dann ein angepasster `LoadManager` (`LoadManager<FT extends FuelType>`). Damit kann der `fuelManager` seinen Treibstofftanks nur Treibstoffe hinzufügen oder entnehmen. Durch die Verwendung von *Generics* können Mehrfachimplementierung vermieden werden.

Externe Bibliotheken Das Mobilitätsmodell bindet zwei externe Bibliotheken ein, die bereits benötigte Funktionen bereitstellen. Das betrifft die *JTS Topology Suite* [Vividsolu-

tions (2003)] und die *Apache Commons Mathematics Library* [The Apache Software Foundation (2013)]. Erstere wurde eingebunden, um die Geometrien des Regionsmodells, sprich der Zone-, Link- und Node-Klassen, abzubilden. Die JTS Topology Suite stellt dafür eine *Geometry*-Klasse und diverse Spezialisierungen (*Point*, *Line*, *Polygon* etc.) zur Verfügung, mit denen geometrische Abfragen durchgeführt werden können. Somit kann z. B. bestimmt werden, ob sich zwei Geometrien schneiden oder überlagern. Diese Abfragen wurden speziell für den in 4.1.1.1 dargestellte Verortungsprozess verwendet. Aus der *Apache Commons Mathematics* wurde nur die Klasse *MersenneTwister* verwendet, der den Zufallszahlengenerator von Matsumoto und Nishimura (1998) implementiert. Diese wurde verwendet, um zufällig die Werte aus den Häufigkeitsverteilungen des *MobilityCluster* zu ziehen, um die entsprechenden Fahrten und Aktivitäten zu generieren.

4.2.2 Simulationsebene

Die Simulationskomponenten wurden mit Java unter Verwendung der Eclipse IDE implementiert. Die Implementierung der Simulationsebene besteht aus drei Plug-in Projekten: *JASON*, *TrafficSimulation* und *EMobSimulation*. Die enthaltenen Klassen und Funktionen entsprechen den Ausführungen aus den entsprechenden Unterabschnitten des Abschnitts 4.1.2. Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich auf das noch nicht behandelte Konzept von *JASON*, wie mit der Gleichzeitigkeit von *Behaviours* umgegangen wird. Der Scheduler in *JASON* hat, wie oben beschrieben, die Aufgabe, *Behaviours* zu den entsprechenden Zeitpunkten auszuführen. Dabei können mehrere *Behaviours* gleichzeitig zu einem Zeitschritt ausgeführt werden. Diese Gleichzeitigkeit ist durch *Threads* implementiert. Der Ablauf der *step*-Methode des Schedulers ist in Abbildung 55 dargestellt. Beim Erreichen des nächsten Zeitpunktes (Zeile 2), schachtelt der Scheduler jedes zu startende *Behaviour* in ein sog. *BehaviourRunnable*, welches den *ProcessingStatus* des *Behaviours* verwaltet (Zeile 3). Dem *BehaviourRunnable* wird ein *Thread* aus einem *Threadpool* zugewiesen. Dieses ruft dann die *action*-Methode des *Behaviours* auf. Vor der Ausführung des *Behaviours* wird der *ProcessingStatus* auf *RUNNING* gesetzt. Fertige *Behaviours* erhalten den Status *DONE*. Sollte ein *Behaviour* auf den Empfang einer Nachricht warten, wird der Status auf *WAITING* gesetzt. Bei einer Statusänderung wird der Scheduler benachrichtigt. Dieser prüft dann den Status aller derzeit ausgeführten *Behaviours*, um festzustellen, ob der Simulationsschritt beendet ist und die Simulationszeit weiterlaufen kann (Zeile 6 u. 7). Solange noch mindestens ein *Behaviour* den Status *RUNNING* hat, kann die Simulationszeit nicht weitergeführt werden. Ein *Behaviour* kann dementsprechend immer nur eine Aktion pro Zeitschritt durchführen. Einzige Ausnahme ist das Warten auf Nachrichten. Der Status kann in diesem Fall nicht auf *DONE* gesetzt werden, da das *Behaviour* noch nicht fertig ist noch

```

1 public void step() {
2     time = schedule.peek().getTime();
3     startCurrentBehaviours();
4     ProcessingStatus status = ProcessingStatus.RUNNING;
5     while (status == ProcessingStatus.RUNNING) {
6         schedule.wait();
7         status = updateStatus();
8         if (status != ProcessingStatus.RUNNING) {
9             if (startCurrentBehaviours()) {
10                status = ProcessingStatus.RUNNING;
11            }
12        }
13    }
14 }

```

Abbildung 55 step-Methode des Schedulers

kann er auf RUNNING bleiben, da die Simulationszeit so nicht fortschreiten kann. Der WAITING-Status erfüllt die Anforderung, dass die Simulationszeit fortschreiten kann, obwohl das Behaviour seine Aktion noch nicht beendet hat. Damit ist es möglich auf Nachrichten zu warten, die erst zu einem späteren Simulationszeitpunkt versendet werden, ohne die Simulationszeit zu blockieren.

Das Setzen des Status WAITING wird in der receive-Methode des Agenten gesetzt (vgl. Abbildung 43 auf Seite 92). Die MessageBox des Agenten hält dazu eine Liste mit wartenden BehaviourRunnables und setzt den Status zunächst auf WAITING. Wenn eine Nachricht eintrifft, die dem hinterlegten MessageTemplate entspricht oder der timeout erfolgt ist, wird der Status des entsprechenden BehaviourRunnables wieder auf RUNNING gesetzt und die step-Methode des Schedulers führt das Behaviour weiter aus.

4.2.3 E-Mob Simulation

Um die einzelnen Modelle des Planungsmodells zu Szenarien zusammenzuführen und die Simulation anschließend ansteuern zu können, wurden zwei Hauptklassen implementiert, die im Folgenden erläutert werden. Es wird davon ausgegangen, dass das Mobilitätsmodell, das Regionsmodell und das E-Mob-Modell bereits instanziiert und persistiert wurden.¹²

¹² In dieser Arbeit wurden dazu Hilfsklassen geschrieben, die aus den diversen Quellen und Formaten, die Modelle erstellt und persistiert haben. Zukünftig wäre diese Erstellung auch über einen eigens dafür entwickelten Editor denkbar.

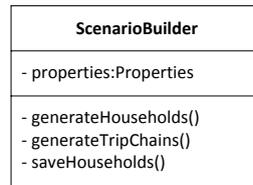


Abbildung 56 Klasse ScenarioBuilder

4.2.3.1 ScenarioBuilder

Die ScenarioBuilder-Klasse ist die Hauptklasse, mit der die Haushalte aufbereitet werden, die für das zu bewertende Szenario relevant sind. Abbildung 56 stellt die Klasse dar. Abhängig von seinen Properties erstellt der ScenarioBuilder eine Menge von Haushalten. Dazu benötigt es das für das Szenario relevante Mobilitäts- und Regionsmodell. Welche beiden Modelle in das Szenario eingehen, wird über die Properties-Datei vorgegeben. Hier kann der Nutzer den Dateipfad zu den zu verwendeten persistierten Modellen vorgeben. Tabelle 7 stellt die grundlegenden Parameter dar, mit dem der Nutzer die Szenarien konfigurieren kann. Grundsätzlich sind die Haushalte, die in der Methode generateHouseholds generiert werden, durch das Regionsmodell und die entsprechenden householdQuantity-Objekte vorgegeben. Diese kann der Nutzer einschränken, indem nur Haushalte mit bestimmter Mobilitätscluster- oder Zonen-Zugehörigkeit berücksichtigt werden können (*MobilityCluster.filter* bzw. *Zone.Filter*). Bei der Haushaltsgenerierung wird für jeden Haushalt ein zufälliger Standort in der jeweiligen Zone bestimmt, eine Anzahl an Fahrzeugen entsprechend des Statistic-Objekts im MobilityCluster erzeugt und jedem Fahrzeug ein sekundärer Standort zugeordnet. Die Entfernung zum Haushaltsstandort ergibt sich aus dem secondaryLocationDistance-Attribut des Statistic-Objekts. Daraufhin erstellt die Methode generateTripChains die Fahrtketten der generierten Haushalte. Dazu kann der Nutzer bestimmen, wie viele Tage vorgegeben werden sollen und welches Datum der erste Tag der Fahrtkette repräsentieren soll. Die erstellten Haushalte, Fahrzeuge und Fahrpläne werden daraufhin persistiert und können von der Simulation verwendet werden (s. u.).

Tabelle 7: Scenario-Properties

Property	Beschreibung
Generator.startDate	Datum der ersten abzufahrenden Fahrtkette.
Generator.numberOfDays	Anzahl an zu generierenden Tagen (Fahrtketten)
Region.filter	Eingrenzung der betrachteten Zonen
Mcluster.filter	Eingrenzung der zu betrachteten Mobilitätscluster
Region.file	Pfad zur Datei des persistierten Region.
Mcluster.file	Pfad zur Datei der persistierten Mobilitätscluster.

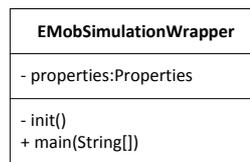


Abbildung 57 Klasse EMobSimulationWrapper

4.2.3.2 EMobSimulationWrapper

Der `EMobSimulationWrapper` (s. Abbildung 57) führt sämtliche Modelle zusammen und führt die Simulation aus. Er stellt damit den Ausgangspunkt für die Bewertung der nutzerspezifischen Adoptionsmöglichkeit von Elektrofahrzeugen dar.

Für eine Simulation wird nacheinander die `init`- und `start`-Methode aufgerufen. Wie die Simulation konfiguriert wird, kann der Nutzer wie oben über eine `Properties`-Datei steuern (s. Tabelle 8). Da stochastische Prozesse bei der Simulation einfließen, kann die Simulation mehrfach wiederholt werden (*Simulation.numberOfRuns*). Für die Kalibrierung der Simulation benötigt der `EMobSimulationWrapper` die Pfade zu den persistierten Modellen der Nutzermobilität, der Region, der Fahrzeuge, der Ladestationstypen und die generierten Haushalte. In der `init`-Methode werden die Elemente entsprechend der über-

Tabelle 8: EMobSimulationWrapper-Properties

Property	Beschreibung
Charging.home	Wahrscheinlichkeit des Zugangs zu einer Ladestation eines bestimmten Typs am Haushaltsstandort.
Charging.publicNodes	Anzahl an Ladestationen pro Typ und Knoten.
Charging.publicZones	Anzahl an Ladestationen pro Typ und Zone.
Charging.secondary	Wahrscheinlichkeit des Zugangs zu einer Ladestation eines bestimmten Typs am sekundären Standort (Fahrzeug).
Household.file	Pfad zur Datei der persistierten Haushalte.
Household.newTripChains	Angabe, ob vor jedem Simulationslauf, die Fahrtketten der Haushalte neu generiert werden sollen
Mcluster.file	Pfad zur Datei des persistierten Mobilitätscluster.
Region.file	Pfad zur Datei der persistierten Region.
Region.trafficIndex	Angabe der Verkehrsbelastung. Der Index skaliert die maximale Geschwindigkeit auf den Kanten.
Simulation.numberOfDay	Anzahl an Tagen, die Simuliert werden sollen.
Simulation.numberOfRuns	Anzahl an Simulationsdurchgängen.
Vehicle.capacityRate	Skalierungsfaktor der Fahrzeugkapazität pro Fahrzeugtyp
Vehicle.consumptionRate	Skalierungsfaktor der Fahrzeugverbräuche pro Fahrzeugtyp
Vehicle.simulationRate	Verteilung der Fahrzeugtypen auf die zu simulierenden Fahrzeuge.
Technical.file	Pfad zur Datei der persistierten technischen Eigenschaften der Fahrzeuge und der Ladestationen.

gebenen Properties kombiniert. Jedem Fahrzeug wird ein Fahrzeugtyp aus dem E-Mob Modell zugeordnet und durch einen CarAgent repräsentiert. Die Wahrscheinlichkeit für die Zuweisung des Fahrzeugtyps kann über den Parameter *Vehicle.simulationRate* bestimmt werden. Darüber hinaus können die technischen Parameter skaliert werden, um bestimmte Systemzustände zu repräsentieren. Somit kann z. B. der Verbrauch (*Vehicle.consumptionRate*) oder die Kapazität (*Vehicle.capacityRate*) der Fahrzeuge erhöht bzw. verringert werden. Die Ladeinfrastruktur ist über mehrere Parameter in die Simulation einbringbar. Jeder Ladestation wird durch einen ChargingStationAgent gesteuert. Die Wahrscheinlichkeiten für das Vorhandensein einer Ladestation am Haushaltsstandort und am sekundären Standort (des Fahrzeugs) kann vorgegeben werden (*Charging.home*; *Charging.secondary*). Zudem kann pro Zone oder Knoten eine Menge an Ladestationen ins System gebracht werden (*Charging.publicZones*; *Charging.publicNodes*). Nach der Initialisierung, startet der EMobSimulationWrapper die Simulation. Der Nutzer kann zusätzlich bestimmen, ob den Haushalten vor jedem Simulationslauf neue Fahrten zugeordnet werden sollen (*Household.generateTripChains*).

4.3 Zusammenfassung und Diskussion

Dieses Kapitel hatte das Ziel, geeignete Verfahren aus dem Bereich der Verkehrsforschung und der Multi-Agenten-Simulationen zu vereinen, um die in 1.3 definierten Anforderungen zu erfüllen. Die Analysen aus Kapitel 2 und 3 ergaben, dass insbesondere die Kombination aus A 3 – Aktivitätsgestaltung und A 11 – Kommunikation nicht durch die zur Verfügung stehenden Simulation-Frameworks aus dem Verkehrsbereich abgedeckt werden. Auch die Kombination aus privater und gewerblicher Mobilität findet bisher nur wenig Anwendung (A 1 – Nutzer und Nutzergruppen). Diese Lücke hat das Konzept erfolgreich geschlossen, indem eine Modellebene entwickelt wurde, die die Nutzermobilität, die Region und die technischen Eigenschaften von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur abbildet. Die Auswahl der Art der Modellierung konzentrierte sich insbesondere darauf, dass die Modelle möglichst einfach durch öffentlich zur Verfügung stehenden Datenquellen kalibriert werden können (A 12 – Datenintegration). Das betraf insbesondere die Aktivitätsgenerierung. Sie wurde insbesondere so konzipiert, dass sowohl privates als auch gewerbliches Mobilitätsverhalten integriert werden kann. Diese Modelle wurden mit einer Multi-Agenten-Simulation verknüpft, die sich insbesondere auf die Kommunikationsfähigkeit sowie das unabhängige Verhalten der Agenten konzentriert hat. Die Verbindung von Verhaltensweisen (*Behaviours*), die die Agenten verwenden können, um in ihrer Umwelt zu agieren, *Services*, die andere Agenten bereitstellen können und die ausschließliche Interaktion über Nachrichten stellen die Basis bereit insbesondere die Anforderung A 11 – Kommunikation zu adressieren. Beide Ebenen (Modell und Simulation) wurden zunächst abstrakt modelliert und sukzessive über Polymorphie zu einem elektromobili-

tätsspezifischen Bewertungswerkzeug ausgebaut (A 13 – Erweiterbarkeit). Zusammenfassend wurden alle Anforderungen aus 1.3 durch die Modelle und Systeme adressiert. Die Verknüpfung dieser Modelle führt allerdings zu einer Komplexität, die es, insbesondere hinsichtlich der Anwendbarkeit, zu bewerten gilt. Damit beschäftigt sich das nächste Kapitel.

5 Evaluation

Das vorangegangene Kapitel hat Konzepte und Ansätze zusammengeführt, um die in dieser Arbeit aufgestellten Anforderungen zu adressieren. Die Zusammenführung mündete in einem Prototyp, der in diesem Kapitel evaluiert wird. Die Evaluation verfolgt nachstehende Ziele:

1. Bestimmung der Anforderungs- und Zielerfüllung,
2. Demonstration der Anwendbarkeit,
3. Validierung des Aktivitätsgenerierungsprozesses und
4. Untersuchung der gewählten Modellierungsgranularität.

Zwei Fallbeispiele innerhalb der Modellregion Elektromobilität Bremen/Oldenburg dienen als Bewertungsgrundlage. Die Modellregionen Elektromobilität wurden 2009 von dem damaligen Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (heute: Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI)) zur Erprobung der neuen Technologie initiiert [BMVI (2014)].

Der Rest des Kapitels gliedert sich in vier Abschnitte. Zunächst werden die gemeinsamen Bestandteile beider Szenarien aufgebaut und kalibriert (Abschnitt 5.1). Diese Bestandteile betreffen vor allem die Darstellung der Zonen und des Verkehrsnetzes (Regionsmodell), die Abbildung der Haushalte und Unternehmen in der Modellregion und deren Mobilitätsverhalten (Mobilitätsmodell) sowie die technische Abbildung der Elektrofahrzeuge und der Ladeinfrastruktur (E-Mob Modell). Darüber hinaus wird der Aktivitätsgenerierungsprozess (Mobilitätsmodell) einer Validierung unterzogen. Da das Mobilitätsmodell das Fahrverhalten der Nutzergruppen in Form von Häufigkeitsverteilungen darstellt und die Aktivitäten, Ziele und Standzeiten der Nutzer synthetisiert werden, wird anhand von statistischen Tests die Güte der generierten Tagespläne bewertet und aufgezeigt, in welchen Bereichen das Modell sich signifikant von der statistischen Quelle entfernt.

Abschnitt 5.2 zeigt die Anwendbarkeit des Modells anhand eines Fallbeispiels, das sich mit dem beruflichen Pendlerverkehr in der Region beschäftigt. Es wurde innerhalb des Forschungsprojektes *Personal Mobility Center* (PMC) durchgeführt und untersucht unterschiedliche Nutzergruppen hinsichtlich ihrer Fähigkeit, Elektrofahrzeuge für den täglichen Gebrauch verwenden zu können. Neben der Darstellung der Anwendbarkeit, wird anhand dieses Beispiels die notwendige Modellierungsgranularität untersucht, die in dem vorherigen Abschnitt (5.1) durch die verwendeten öffentlich zugänglichen Quellen vorgegeben wurde. Mithilfe von Sensitivitätsanalysen wird festgestellt, welche Schwachstellen durch die Verwendung dieser Daten entstanden sind und in welchen Bereichen eine detailliertere Modellierung notwendig ist.

Abschnitt 5.3 bewertet den gewerblichen Flotteneinsatz von Elektrofahrzeugen im ländlichen Raum. Dieses Szenario wurde im Forschungsprojekt *Neue Mobilität im ländlichen Raum* (NeMoLand) durchgeführt. Neben der Bewertung der Fähigkeit der gewerblichen Nutzergruppen Elektrofahrzeuge zu adoptieren, bestand das Ziel des Projektes darin, die Integrationsfähigkeit von erneuerbaren Energien durch die Fahrzeuge zu analysieren. Zu den Analysen gehörte die Untersuchung des Einflusses der Ladeströme auf die Stabilität des Ortsnetztransformators. Zudem wurde die Wirkung eines gesteuerten Lademechanismus auf diese Stabilität und auf die Flottenmobilität analysiert. Dazu wurde das in dieser Arbeit dargestellte Bewertungswerkzeug *Mambaa* mit dem Smart Grid Co-Simulationsframework *Mosaik* gekoppelt [Schütte (2013); Hoerstebrock et al. (2012b)], wodurch das Zusammenspiel zwischen PV-Einspeisung, Last der Haushalte und Last der Elektrofahrzeuge analysiert werden konnte.

Abschnitt 5.4 fasst die Erkenntnisse aus den beiden Fallbeispielen zusammen. Insbesondere wird der Erfüllungsgrad der Ziele (1.2) und Anforderungen (1.3) von *Mambaa* bewertet. Zudem werden Aspekte bei der praktischen Anwendung des Prototyps diskutiert. Welche Anforderung mit welchem Szenario bewertet wird, zeigt die Tabelle 9.

Tabelle 9: Bewertete Anforderungen der Szenarien

Szenario	Bereich	Anforderung
Gemeinsame Modellbildung (Abschnitt 5.1)	Nutzermobilität	A 1 – Nutzer und Nutzergruppen
		A 2 – Haushaltsstandorte
		A 3 – Aktivitätsgestaltung
		A 4 – Operative Kennzahlen
	Region	A 5 – Strukturdaten A 6 – Verkehrsnetz
Fallbeispiel Privatnutzung (Abschnitt 5.2)	Fahrzeug	A 7 – Verbrauch A 8 – Kapazität
	Ladeinfrastruktur	A 9 – Technische Lösung
	Sonstige	A 12 – Datenintegration
	Nutzermobilität	A 1 – Nutzer und Nutzergruppen A 4 – Operative Kennzahlen
	Fahrzeug	A 7 – Verbrauch
Fallbeispiel gewerbliche Flottenanwendung (Abschnitt 5.3)	Ladeinfrastruktur	A 9 – Technische Lösung A 10 – Zugang
	Nutzermobilität	A 1 – Nutzer und Nutzergruppen A 4 – Operative Kennzahlen
	Fahrzeug	A 7 – Verbrauch
	Ladeinfrastruktur	A 9 – Technische Lösung
	Sonstige	A 11 – Kommunikation A 13 – Erweiterbarkeit

5.1 Gemeinsame Modellkomponenten

Dieser Abschnitt beschreibt, wie die Komponenten des Planungsmodells (Region, Mobilitätsmodell und E-Mob Modell) parametrisiert werden. Diese Komponenten dienen als Basis für die beiden Fallbeispiele der folgenden Abschnitte 5.2 und 5.3.

5.1.1 Regionsmodell

Das Regionsmodell hat drei Aufgaben. Zum einen stellt es die Strukturparameter bereit, die für das Gravitationsmodell zur Verortung der Fahrten während der Aktivitätsgenerierung notwendig sind. Zum zweiten enthält es Mengengerüste, in welchen Zonen sich wie viele Haushalte bzw. Personen und Unternehmen befinden, die ähnliche (demografische) Werte aufweisen (MobilityCluster). Zum dritten beschreibt es das Straßennetz, um die Fahrten und Verbräuche der Fahrzeuge in der Simulation abbilden zu können. Die drei Modellbestandteile werden durch folgende öffentlich zugängliche Daten parametrisiert (s. Abbildung 58):

Zensus 2011 Die Daten, die im Zuge der Volkszählung 2011 erhoben wurden, dienen dazu die Standorte der Personen der Haushalte in der Modellregion zu bestimmen. Die Zensusdaten halten Informationen über die Anzahl an Personen pro Gemeinde getrennt nach Familienstand, Erwerbsstatus, Geschlecht, Alter etc. bereit [Zensus 2011 (2014)].

Mobilität in Deutschland 2008 Die Erhebung zum Verkehrsverhalten von privaten Haushalten erfolgte 2008/2009 und umfasst Daten von insgesamt 50.000 Haushalten, 100.000 Personen und 300.000 Wegen [infas und DLR (2010)]. Der Datensatz erfasst neben den strukturellen Attributen der Haushalte (z. B. Anzahl Haushaltsmitglieder, Anzahl Fahrzeuge und Einkommen) und Personen (z. B. Alter, Geschlecht und Erwerbsstatus) insbesondere die täglichen Wege der befragten Personen inkl. der Fahrtgründe, das benutzte Transportmittel und die Abfahrts- und Ankunftszeiten.

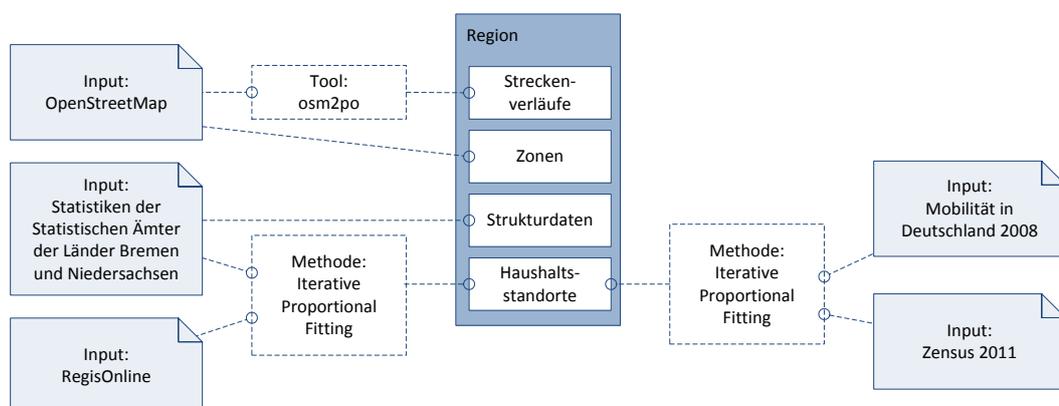


Abbildung 58 Kalibrierung des Regionsmodells

Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 Die Bundesweite Befragung von Kfz-Haltern erhebt Nutzungsmuster von Fahrzeugen und fand von November 2009 bis Oktober 2010 statt [WVI GmbH (2014)]. Wie der MiD2008-Datensatz enthält dieser Datensatz Informationen über das tägliche Fahrverhalten der Fahrzeugnutzer. Dabei wird explizit auch der Wirtschaftsverkehr mit einbezogen.

Statistiken der Statistischen Ämter der Länder Bremen und Niedersachsen Durch Auswertungen der Statistikdatenbanken [LSKN (2014); Statistisches Landesamt Bremen (2014)] wurden die Strukturvariablen der Zonen der Modellregion ermittelt. Diese betreffen die Anzahl an Betrieben (getrennt nach Wirtschaftssektoren), die Flächennutzung und die Einwohnerdichte. Diese Daten standen teilweise auf Gemeinde-, teilweise auf Landkreisebene zur Verfügung. Besonders bei der Anzahl der Betriebe lagen vornehmlich aggregierte Datensätze vor.

RegisOnline Die regio GmbH stellt ein Verzeichnis an Unternehmen im Nordwesten bereit [regio gmbh (2014)]. Diese Daten beinhalten Adressen der Unternehmen, Mitarbeiteranzahl und Branchenzugehörigkeit der Unternehmen.

OpenStreetMap Das 2004 gegründete Projekt stellt eine freie Weltkarte zur Verfügung mit Informationen über das Verkehrsnetz inkl. der Geschwindigkeitsrestriktionen und der Straßenbeschaffenheit [OpenStreetMap Foundation (2014)].

Ziel war es, eine möglichst kleine räumliche Einheit zur Beschreibung der Zonen zu finden, um ein möglichst detailliertes Abbild der Modellregion zu erhalten. Die Gemeinde stellt die kleinstmögliche räumliche Einheit in den herangezogenen Statistiken dar und dient als Grundlage bei der Erstellung der Zonen. Die folgenden Abschnitte zeigen auf, welche Daten in die Modellteile des Regionsmodells übernommen und welche Verfahren angewandt wurden, um die Integration zu ermöglichen.

Haushaltsmengengerüst (HousholdQuantity)

Jede Zone enthält Informationen über die Anzahl an Haushalten und Unternehmen einer bestimmten für die Untersuchung relevanten Untersuchungsgruppe. Für die Simulation wird entsprechend des in Abschnitt 4.1.1.1 dargestellten Generierungsprozesses für jeden Haushalt bzw. jedes Unternehmen ein konkreter Standort innerhalb der Zone ermittelt und für jedes zugehörigen Fahrzeug ein Fahrplan für den Untersuchungszeitraum erstellt. Grundlage für letzteres ist die Beschreibung des Mobilitätsverhaltens (*MobilityCluster*). Für den privaten Bereich werden diese aus den MiD2008-Daten gewonnen; für den gewerblichen Verkehr aus den KiD2010-Daten. Um eine Verknüpfung zwischen den Standorten von Haushalten/Unternehmen und deren Mobilitätsverhalten zu erreichen, sind gemeinsame Merkmale der Nutzergruppen in den Datenquellen zur Beschreibung der sowohl der Standorte als auch der Mobilitätsmuster zu identifizieren. Dabei geben die

öffentlichen Statistiken diese vor, da sie aufgrund von Datenschutzvorgaben nicht die Vielfalt an Merkmalen bereitstellen wie die Mobilitätsstudien. Tabelle 10 veranschaulicht die Datenquellen und die gemeinsamen Merkmale. Wie aus den Merkmalen im privaten Bereich ersichtlich wird, stellt der Zensus 2011 zum Zeitpunkt der Untersuchung nur Personen- und keine Haushaltsdaten bereit. Dadurch sind auch die abgeleiteten Mengengerüste personenbezogen und eine haushaltsinterne Darstellung der Abhängigkeiten ist somit nicht möglich.

Das Ziel ist es, die Anzahl der Personen und Unternehmen pro Gemeinde der Modellregion für die jeweiligen Kombinationen an Merkmalsausprägungen (s. Tabelle 11) zu ermitteln. Problematisch stellt sich dabei die Integration der Daten aus dem Zensus 2011 als auch aus den Landesstatistiken heraus. Der Zensus 2011 liefert die Daten zwar auf Gemeindeebene, allerdings nur für jedes Merkmal (Alter, Geschlecht, Erwerbsstatus) einzeln. Für größere Gemeinden ist es zwar möglich zwei Merkmale zu kreuzen, eine Kombination von drei oder mehr Merkmalen ist allerdings nicht möglich. Zudem sind für kleinere Gemeinden bestimmte Merkmale nicht vorhanden. Die Landesstatistiken liefern die Daten ebenfalls nur einzeln, d. h. es ist möglich auf Gemeindeebene die Anzahl an Unternehmen entweder getrennt nach Wirtschaftszweig oder getrennt nach Mitarbeiteranzahl zu bestimmen. Eine Kombination ist aufgrund von Datenschutzvorgaben nicht möglich. Aus diesem Grund wird das in Abschnitt 3.2 dargestellte Verfahren *Iterative Proportional Fitting* (IPF) angewandt, um die Daten miteinander zu kreuzen und nicht auf höhere Aggregationsebenen ausweichen zu müssen (z. B. Landkreisebene). Das Ver-

Tabelle 10: Datenquellen der Haushaltsmengengerüste

Bereich	Standortdaten	Mobilitätsdaten	Gemeinsamen Merkmale
Haushalte	Zensus 2011	Mobilität in Deutschland 2008	– Alter – Geschlecht – Erwerbsstatus
Unternehmen	Regionale Strukturdaten der Unternehmen 2011 (D II 1.2 Landesamt für Statistik Niedersachsen)	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010	– Wirtschaftszweig-angehörigkeit – Unternehmensgröße (in Anzahl an Mitarbeitern)

Tabelle 11: Merkmalsausprägungen der genutzten Datenquellen

Bereich	Merkmal	Merkmalsausprägungen
Haushalte	Alter	Unter 18 18 – 29 30 – 49 50 – 64 Über 65
	Geschlecht	Männlich Weiblich
	Erwerbsstatus	Erwerbslos Erwerbstätig
Unternehmen	Wirtschaftszweig	A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S U V
	Unternehmensgröße (Mitarbeiter)	0 – 9 10 – 49 50 – 249 Über 250

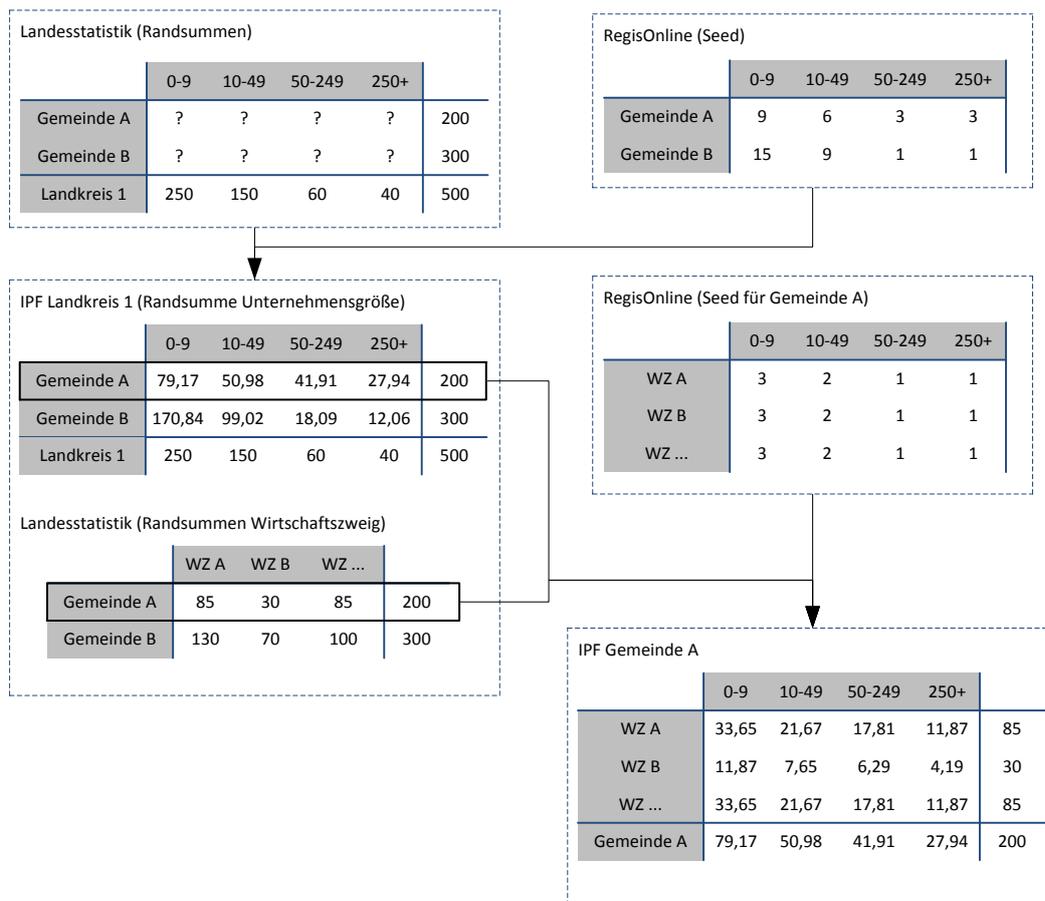


Abbildung 59 Zweistufiges *Iterative Fitting Procedure* für die Bestimmung der Unternehmensanzahl

fahren wird genutzt, um folgende Daten zu disaggregieren:

- Personen: Das Ziel ist die Schätzung der 3-dimensionalen Kreuztabelle mit den Merkmalen Alter, Geschlecht und Erwerbsstatus mit den jeweiligen Merkmalsausprägungen. Der *Seed*, den das Verfahren zur initialen Belegung Kreuztabelle benötigt, wird aus dem MiD2008-Datensatz übernommen und für jede Gemeinde verwendet. Er bestimmt das Verhältnis der Merkmalsausprägungskombinationen für die jeweilige Gemeinde. Damit geht die Annahme einher, dass das Verhältnis der Daten aus der deutschlandweiten Umfrage für jede Gemeinde der Modellregion zutrifft. Diese Annahme schränkt die Aussagekraft der ermittelten Mengengerüste zwar ein; sie kann jedoch aufgrund fehlender Daten nicht aufgehoben werden. Das Verfahren wird angewandt, wie in Abschnitt 3.2 dargestellt.
- Unternehmen: Für die Unternehmen ist ein zweistufiges Verfahren notwendig (s. Abbildung 59). Die öffentlichen Statistiken geben die Zusammensetzung der Unternehmen nach Wirtschaftszweigen bereits auf Gemeindeebene vor. Die Unterscheidung der Unternehmensgrößen liegt allerdings nur auf Landkreisebene bereit.

Der erste Schritt hat dieses Merkmal auf Gemeindeebene disaggregiert. Die Statistiken liefern dazu die Randsummen (Anzahl Unternehmen pro Gemeinde eines Landkreises, Anzahl an Unternehmen getrennt nach Unternehmensgrößen des jeweiligen Landkreises). Danach werden die Unternehmen der jeweiligen Gemeinden aus der *RegisOnline* Datenbank entnommen, kategorisiert und dem Verfahren als *Seed* zur Verfügung gestellt. Nach dem ersten Durchlauf liegen die Randsummen auf Gemeindeebene für beide Merkmale Wirtschaftszweig und Unternehmensgröße vor. Diese gehen in den zweiten Durchlauf ein, der für jede Gemeinde die jeweiligen Merkmalsausprägungskombinationen ermittelt.

Die Kreuztabellen dienen dazu, die *HouseholdQuantity*-Objekte der jeweiligen Zone zu erstellen.

Strukturvariablen (StructureValue)

Jede Zone wird durch Strukturvariablen charakterisiert. Diese gliedern sich in die Kategorien Flächen, Unternehmen und Einwohner. Um das nachgelagerte Gravitationsmodell möglichst flexibel bedienen zu können, ist jede Kategorie zudem weiter unterteilt. Die Strukturvariablen sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Sämtliche Daten können aus den amtlichen Statistiken entnommen und in das die *StructureValue*-Objekte der Zonen übernommen werden.

Straßennetz

Das Straßennetz wurde aus OpenStreetMap importiert. Da die Daten aus OpenStreetMap nicht routingfähig sind, wurden die Daten zunächst mithilfe des Java Programm *osm2po* [*osm2po* (2010)] in einen routingfähigen Graph überführt. Bei der Überführung bestimmt das Programm die maximale Geschwindigkeit, die Kosten der Kanten für die Routingalgorithmen (hier: Quotient aus Distanz und Geschwindigkeit) und die Geometrieobjekte der Knoten und Kanten. Der Graph wurde anschließend eingelesen und in die Knoten (Node) und Kanten (Link) des Regionsmodells überführt.

5.1.2 Mobilitätsmodell

Das Mobilitätsmodell beschreibt die Mobilitätsmuster der im Regionsmodell beschriebe-

Tabelle 12: Strukturparameter der Zonen

Flächen	Einwohner	Unternehmen
– Gesamt	– Anzahl Absolut	– Gesamt (Anzahl)
– Landwirtschaft	– Dichte	– Landwirtschaft (Anzahl)
– Gewerbe		– Baugewerbe (Anzahl)
– Wohnen		– Handel (Anzahl)
		– Dienstleistungen (Anzahl)
		– Industrie (Anzahl)

nen Haushalte bzw. Personen. Das in Abschnitt 4.1.1.1 dargestellte Mobilitätsmodell wird unter Verwendung der Mobilitätsstudie Mobilität in Deutschland 2008 (MiD2008) kalibriert und bildet damit sowohl den privat als auch gewerblich verursachten Verkehr ab. Die folgenden zwei Abschnitte gehen näher auf die Überführung der beiden Quellen ein. Anschließend erfolgt eine Validierung des Aktivitätsgenerierungsprozesses anhand der MiD2008-Daten, um die Korrektheit der erzeugten Fahrten aufzuzeigen.

5.1.2.1 Import der MiD2008-Daten

Die in Abschnitt 5.1.1 genannten gemeinsamen Merkmalskombinationen bilden die Grundlage zur Bildung von Gruppen mit gleichem Mobilitätsverhalten. Jede Kombination der Ausprägungen der Merkmale Alter, Geschlecht und Erwerbsstatus ($5 \cdot 2 \cdot 2 = 20$ Klassen) wird durch eine *MobilityCluster*-Instanz repräsentiert. Die dahinterliegenden Objekte zur Beschreibung der Mobilitätsmuster (*Statistic*, *WeekdayStatistic* und die diversen *Histogram*-Objekte) werden durch die MiD2008-Daten parametrisiert. Dazu gehen die in Tabelle 13 aufgezeigten Parameter aus der Studie ein.

Als Grundlage für die Kalibrierung werden nur die Datensätze der Personen herangezogen, die einen normalen Tag absolviert (s01) und die ihre Wege mit dem PKW zurückgelegt haben (w05_5). Abbildung 60 stellt beispielhaft dar, wie ein Datensatz aus der MiD2008-Studie in das Mobilitätsmodell eingefügt wird. Jede Person- und jeder Weg wird analysiert und die für die Häufigkeitsverteilungen relevanten Parameter extrahiert. Auf Personenebene betrifft das die Nutzergruppenzugehörigkeit (hp_alter, hp_sex,

Tabelle 13: Genutzte Attribute des MiD2008 Datensatzes

Attribut	Quelle	Beschreibung
hp_alter	Person	Alter der Person
hp_besch	Person	Tätigkeit der Person
hp_sex	Person	Geschlecht der Person
mobil	Person	Mobilität am Stichtag (mobil / nicht mobil)
stichtag	Person	Wochentag des Befragungstages
en_dat	Wege	Endtag des Weges (Stichtag / Folgetag)
en_time	Wege	Endzeitpunkt des Weges
s01	Wege	Angabe, ob es sich um einen normalen Tagesablauf gehandelt hat.
st_dat	Wege	Starttag des Weges (Stichtag / Folgetag)
st_time	Wege	Startzeitpunkt des Weges
w04	Wege	Wegezweck
w05_5	Wege	Abfrage, ob PKW für den Weg genutzt wurde
w13	Wege	Angabe, ob sich das Ziel innerhalb oder außerhalb der eigenen Ortschaft befindet oder ob es sich bei der Fahrt um einen Rundweg handelt.
wegkm_k	Wege	Distanz der Fahrt in km
wegmin_k	Wege	Dauer der Fahrt in min

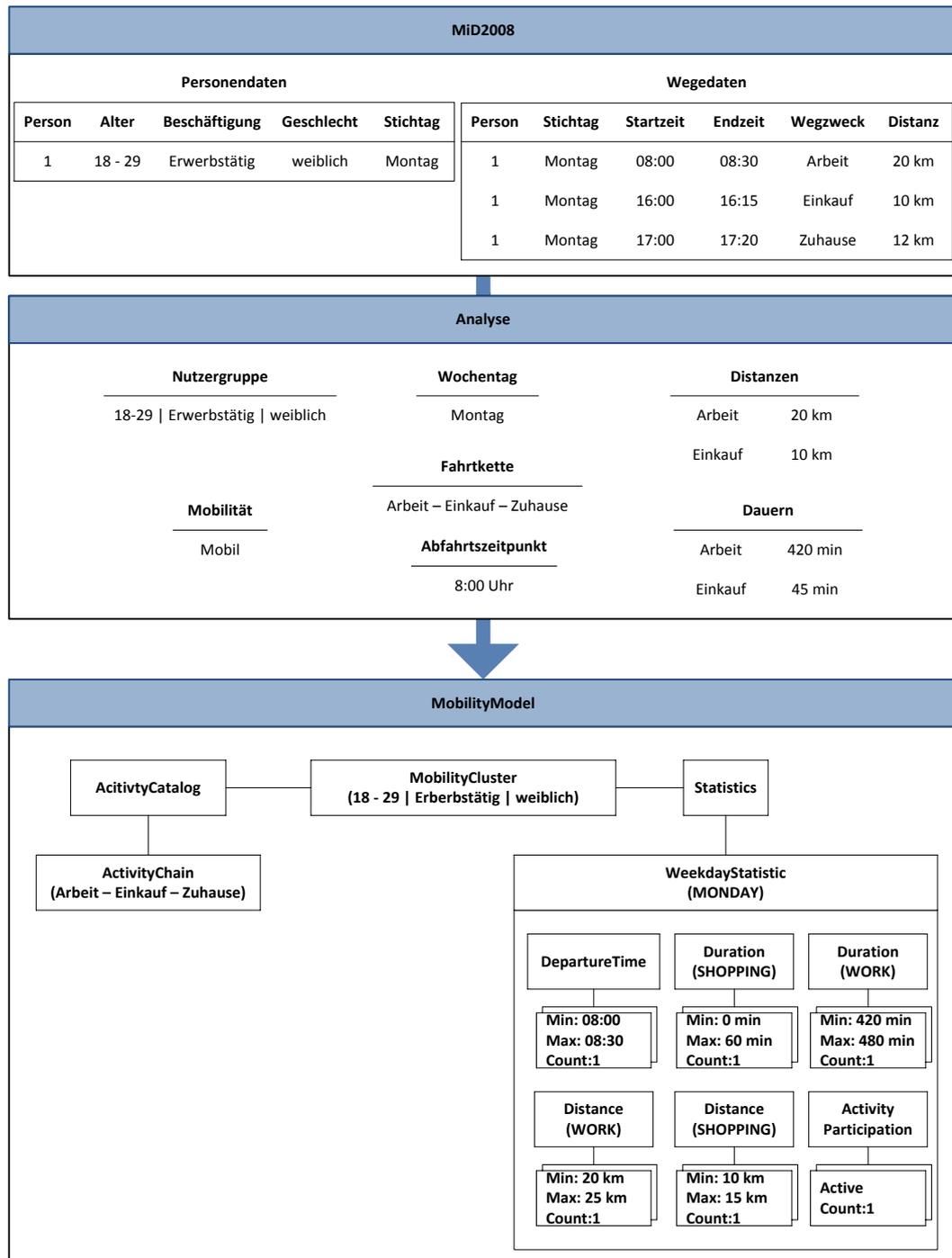


Abbildung 60 Import der MiD2008-Daten

hp_besch) und ob die Person an dem Tag aktiv war (mobil). Die Wege werden hinsichtlich ihrer Distanz (wegkm_k) und ihrer Dauer in Abhängigkeit der Wegezwecke (w04) analysiert. Für die Dauer wird dazu der Anfangszeitpunkt (st_time) einer Fahrt mit dem Endzeitpunkt (en_time) der vorangegangenen Fahrt verglichen. Die Analyseergebnisse

werden in das Nutzergruppen entsprechende `MobilityCluster`-Objekt und in das Wochentag (stichtag) entsprechende `WeekdayStatistic`-Objekt eingefügt. Der Aktivitätsgrad, die Distanzen, die Dauern und der Abfahrtszeitpunkt münden in die entsprechenden Häufigkeitsverteilungen des `WeekdayStatistic`-Objekts. Die beobachtete Fahrkette wird in den Aktivitätskatalog eingetragen. Am Ende des Imports entstehen 20 `MobilityCluster`-Objekte mit Beobachtungen für jeden Wochentag. Die Fahrketten in dem `ActivityCatalog`-Objekt entsprechen denen der MiD2008-Studie.

5.1.2.2 Import der KiD2010-Daten

Analog zu den Ausführungen aus Abschnitt 5.1.2.1 wird das Mobilitätsmodell durch die Analyse der KiD2010-Daten parametrisiert. Jeder Fahrzeugdatensatz der Studie beschreibt den Tagesablauf eines Fahrzeuges eines Unternehmens. Diese Datensätze werden wie beim privaten Szenario hinsichtlich der Standdauern, der Anzahl an Aktivitäten, der gefahrenen Distanzen etc. analysiert und in die entsprechenden Häufigkeitsverteilungen des Modells überführt. In das Modell gehen die Aktivitätsgründe *Eigene Firma*, *Fremde Firma*, *Kunde*, *Baustelle* und *Privat* (falls das Fahrzeug auch privat verwendet wird) ein. Das `Household`-Objekt stellt in diesem Modell eine Firma dar. Die sekundären Standorte der `Vehicle`-Objekte repräsentieren das private Zuhause des Fahrers. Beim Import der Daten werden nur gewerbliche Halter und nur Fahrzeuge unter 3,5 t berücksichtigt. Um eine entsprechende Datenmenge zur Kalibrierung des Modells zu erhalten, wurden gewisse Wirtschaftszweige zusammengefasst, die laut der KiD-Studie ähnliche Werte bei den Distanzen und der Anzahl an Fahrten aufweisen. Tabelle 14 stellt die Zusammenführung dar. Die Unternehmen wurden zusätzlich zur Wirtschaftszweigsangehörigkeit in vier Größenkategorien (in Anzahl an Mitarbeitern) unterteilt: 0-9, 10-49, 50-249 und ≥ 250 . Damit ergeben sich $10 \cdot 4 = 40$ `MobilityCluster`-Objekte. Die Häufigkeitsverteilungen der `MobilityCluster`-Objekte sind dabei so hinterlegt, dass die Verteilun-

Tabelle 14: Gewerbliche Nutzergruppen und Anzahl an Datensätzen in der KiD2010-Studie

Nutzergruppe	Wirtschaftszweige	Anzahl aktiver Fahrzeuge
1	Öffentliche Verwaltung	1550
2	Sonstige Dienstleistungen, Erziehung, Gastgewerbe, Gesundheit	2926
3	Dienstleistungen: Finanzen, freiberuflich, wissenschaftlich, IuK	1749
4	Baugewerbe, Energie, Bergbau	6305
5	Handel und Verarbeitendes Gewerbe	7713
6	Kunst und Erholung	73
7	Exterritoriale Organisationen	366
8	Verkehr	2112
9	Landwirtschaft	606
10	Privat	1558

gen zur Bestimmung der Fuhrparkgröße nur abhängig von der Unternehmensgröße und das Mobilitätsverhalten der Unternehmen nur abhängig von der Wirtschaftszweigsanghörigkeit ist. Somit ist garantiert, dass insbesondere für die Mobilitätsbeschreibung eine ausreichend hohe Anzahl an Datensätzen für die Kalibrierung vorhanden ist.

5.1.2.3 Validierung

Nach der Kalibrierung des Mobilitätsmodells wird der anschließende Aktivitätsgenerierungsprozess aus Abschnitt 4.1.1.1 anhand der Mid2008-Daten validiert. Die Überprüfung der Abweichung der generierten Fahrten von den erwarteten verfolgt nachstehende Ziele:

1. Nachweis der Korrektheit des Generierungsprozesses,
2. Identifikation von Schwachstellen bei der Gruppenbildung und
3. Darstellung der notwendigen Datenquantität zur effizienten Kalibrierung.

Zum Abgleich wird eine Kreuzvalidierung mit zwei Klassen durchgeführt. Der MiD2008-Datensatz wird dazu in 2 gleich große Mengen T_1 und T_2 aufgeteilt. Das Modell wird zunächst mit T_1 kalibriert und mit T_2 (im Folgenden Prüfgröße P_1) verglichen. Anschließend werden die Teilmengen getauscht, d. h. T_2 dient zur Kalibrierung und T_1 zur Validierung (im Folgenden Prüfgröße P_2). Da das Modell für ein Pendlerszenario genutzt wird, fokussieren sich die Tests auf die erwerbstätigen Nutzergruppen und schließen Altersgruppen unter 18 Jahren und über 65 Jahren aus. Insgesamt stehen in der MiD2008-Studie für die verbleibenden Nutzergruppen 10.864 Fahrketten mit insgesamt 34.815 Wegen zur Verfügung, die einen normalen Tag beschreiben und mit dem PKW durchgeführt wurden (s. Tabelle 15). Auf eine Kreuzvalidierung mit mehr als zwei Klassen wird verzichtet, da die Menge an Daten für eine effiziente Kalibrierung zu gering ist.

Fünf Untersuchungskriterien wurden herangezogen, um die Güte der Fahrtengenerierung zu bewerten:

- Fahrtdistanz vom jeweiligen Zuhause zum jeweiligen Arbeitsplatz,
- Fahrtdistanz der anderen Fahrtgründe,

Tabelle 15: Anzahl an Datensätzen (Aktive erwerbstätige Personen / Alter 18 – 64 / Normaler Tag / PKW-Fahrten)

Nutzergruppe	Anzahl Personendatensätze	Anzahl Wegedatensätze
18-29 männlich	854	2.403
30-49 männlich	3.702	11.398
50-64 männlich	852	2.854
18-29 weiblich	797	2.242
30-49 weiblich	3.384	11.983
50-64 weiblich	1.275	3.935
Summe	10.864	34.815

- Standarddauer pro Fahrtgrund,
- Tagesabfahrtszeitpunkte,
- die Verteilung der generierten Fahrtketten (Tagespläne) und
- durch den Verortungsprozess (Abschnitt 4.1.1.1) bedingte Fehler (Differenz ermittelter und tatsächlich realisierter Fahrtdistanz).

Die Kriterien werden mit Pearson χ^2 -Anpassungstests dahingehend überprüft, ob die Verteilungen der generierten Werte mit den Verteilungen der beobachteten Werte übereinstimmen. Dieser Vergleich ist diskret, d. h. die erwarteten und beobachteten Werte werden in Klassen zusammengefasst und jede beobachtete Häufigkeiten mit den erwarteten Häufigkeiten klassenweise verglichen. Der Test überprüft die beiden Hypothesen H_0 (die Verteilungen sind gleich) und H_1 (die Verteilungen sind ungleich). Grundlage hierfür bildet die folgende Teststatistik:

$$X_n^2 = \sum_{j=1}^J \frac{(B_j - E_j)^2}{E_j} \quad (10)$$

mit

n = Anzahl der Beobachtungen

J = Anzahl der Klassen

B_j = Beobachtete absolute Häufigkeiten der j -ten Klasse

B_j = Beobachtete absolute Häufigkeit der j -ten Klasse

E_j = Erwartete absolute Häufigkeit der j -ten Klasse

Unter der Voraussetzung, dass die Hypothese H_0 zutrifft, konvergiert diese Teststatistik gegen die Chi-Quadrat-Verteilung mit $k-1$ Freiheitsgraden ($n \rightarrow \infty$) [Thas (2010), S. 9]:

$$X_n^2 \rightarrow \chi_{J-1}^2 \quad \text{wenn } n \rightarrow \infty \quad (11)$$

Unter der Vorgabe eines Signifikanzniveaus α wird der Prüfwert mit dem $(1-\alpha)$ -Quantil der χ^2 -Verteilung mit $J-1$ Freiheitsgraden als Schwellwert verglichen. Falls $X_n^2 > \chi_{(1-\alpha; J-1)}^2$ gilt, ist die Hypothese H_0 abzulehnen. Der Test ist ein einfaches Mittel, um zu überprüfen, ob eine beobachtete Verteilung einer theoretischen entspricht, allerdings müssen dafür ausreichende Beobachtungen in jeder Klasse vorhanden sein. Als Faustregel hat sich die Mindestgröße von 5 pro definierter Klasse durchgesetzt [Thas (2010), S. 9]. Die Klassenbildung hat demnach entscheidenden Einfluss auf die Anwendbarkeit des Tests und auf dessen Ergebnis. Für jeden Test werden die Klassen so gewählt, dass diese Vorgabe möglichst eingehalten werden. Einige Tests weisen allerdings nur eine geringe Anzahl an Beobachtungen auf, so dass diese Bedingungen verletzt werden. Die betroffenen Klassen werden für diese Tests entfernt und die Freiheitsgrade der χ^2 -Verteilung entsprechend verringert. Die folgenden Ausführungen zeigen die Testergebnisse der jeweiligen Untersuchungskriterien auf.

Tabelle 16: Testergebnis Distanz Zuhause – Arbeit (nur erwerbstätige Personen von 18 – 64 Jahren)

Nutzergruppe			P_1	P_2	P_0	$\chi^2_{(0,95;J-1)}$
1	18-29	männlich	8,241	4,213	6,227	11,040
2	30-49	männlich	11,141	7,137	9,139	12,592
3,6	50-64	männlich weiblich	4,102	2,540	3,321	9,488
4	18-29	weiblich	3,586	9,940	6,763	11,040
5	30-49	weiblich	8,446	21,645	15,046	12,592

Fahrdistanz zum Arbeitsplatz

Die beobachteten und erwarteten Distanzen zum Arbeitsplatz (in km) werden in sieben Klassen unterteilt: (0,5], (5,10], (10,15], (15,25], (25,40], (40,60] und (60,∞). Tabelle 16 stellt die Testergebnisse dar. Die Altersgruppe 50-64 wird dabei nicht geschlechterspezifisch getrennt, um eine ausreichende Anzahl der Beobachtungen in den Klassen zu erhalten. Für einzelne Tests wird die Anzahl der Klassen reduziert, in denen keine erwarteten Werte vorhanden waren (vornehmlich die Klasse (60,∞)). Wie zu erkennen ist, weichen die Mehrzahl der Verteilungen der generierten Fahrten nicht signifikant von den erwarteten Verteilungen ab. Nur bei der Gruppe 5 wird H_0 abgelehnt (fett gedruckte Werte in Tabelle 16). Für diese Gruppe erstellt der Aktivitätsgenerierungsprozess eine erhöhte Anzahl an Arbeitsplatzdistanzen im Bereich (40,60]. Grund hierfür ist die Abweichung der erwarteten Häufigkeiten der beiden Teilmengen T_1 und T_2 in dieser Klasse (T_1 : 48; T_2 : 27). Das Modell verstärkt diese Abweichung. Die Ablehnung der H_0 -Hypothese ist demnach durch die Bildung der Teilmengen begründet. Es ist davon auszugehen, dass auch für diese Gruppe die korrekten Distanzen generiert werden, wenn das Modell mit dem kompletten Datensatz kalibriert wird. Diese Annahme wird zudem durch die Annahme von H_0 der Prüfgröße P_1 gestützt.

Sonstige Fahrdistanzen

Wie aus Tabelle 17 deutlich wird, weisen die Distanzen der weiteren Fahrtgründe Einkauf, Freizeit und Sonstige eine höhere Heterogenität als die Distanzen der Arbeitswege auf. Die Distanzen (in km) werden hier in vier Klassen unterteilt, um die notwendigen Beobachtungen je Klasse zu erreichen: (0,5], (5,10], (10,20], (20,∞). Es ist zu erkennen, dass das Modell Probleme bei der Darstellung der Gruppe 2 und bei den Distanzen der Freizeitaktivitäten hat. Laut der Tests ist die Abweichung nicht allein auf den Zufall zurückzuführen. Zur Klärung der Herkunft bedarf es daher weiterer Tests. Zunächst ist davon auszugehen, dass die Distanzen für diese Aktivitäten stark vom Wochentag abhängen sind. Daher wird überprüft, ob der reine Vergleich der Werkzeuge zu besseren Ergebnissen

Tabelle 17: Testergebnis Distanz Sonstige (nur erwerbstätige Personen von 18 – 64 Jahren)

	Nutzergruppe	Fahrtgrund	P₁	P₂	P₀	$\chi^2_{(0,95;I-1)}$	P₀ (ohne WE)
1	18-29 männlich	Einkauf	6,826	1,931	4,378	7,815	
2	30-49 männlich	Einkauf	16,252	5,447	10,850	7,815	11,571
3	50-64 männlich	Einkauf	1,101	4,446	2,773	7,815	
4	18-29 weiblich	Einkauf	14,781	14,707	14,744	7,815	10,497
5	30-49 weiblich	Einkauf	1,462	12,095	6,779	7,815	
6	50-64 weiblich	Einkauf	5,917	4,383	5,150	7,815	
1	18-29 männlich	Freizeit	2,823	1,226	2,024	7,815	
2	30-49 männlich	Freizeit	9,537	13,369	11,453	7,815	6,762
3	50-64 männlich	Freizeit	9,842	1,936	5,889	7,815	
4	18-29 weiblich	Freizeit	13,035	9,208	11,121	7,815	30,480
5	30-49 weiblich	Freizeit	15,817	22,259	19,038	7,815	6,581
6	50-64 weiblich	Freizeit	9,652	12,565	11,108	7,815	4,109
1	18-29 männlich	Sonstige	0,692	0,801	0,746	7,815	
2	30-49 männlich	Sonstige	7,946	7,983	7,964	7,815	5,102
3	50-64 männlich	Sonstige	2,141	1,006	1,574	7,815	
4	18-29 weiblich	Sonstige	2,075	4,857	3,466	7,815	
5	30-49 weiblich	Sonstige	23,516	52,237	37,876	7,815	14,971
6	50-64 weiblich	Sonstige	9,597	41,398	25,498	7,815	7,053

führt. Die Testergebnisse sind in der letzten Spalte dargestellt. Bis auf zwei Ausnahmen sind die Differenzen alle geringer als bei der Betrachtung der kompletten Woche und unterschreiten zum Teil den Schwellwert. Für die Gruppen-Fahrtgrund-Kombinationen, die den Schwellwert weiterhin überschreiten, werden die beiden Teilmengen zur Kalibrierung untersucht, indem sie direkt miteinander verglichen werden. Dieser Vergleich dient als Anhaltspunkt, ob die Abweichungen allein durch das Modell bedingt sind oder ob der Unterschied auch auf die Heterogenität der beiden gebildeten Teilmengen T_1 und T_2 zurückzuführen ist. Für fehlgeschlagene Tests (fett gedruckte Werte in der letzten Spalte aus Tabelle 17) liegen diese bei 9,178 (2-Einkauf), 9,693 (4-Einkauf), 26,942 (4-Freizeit) und 6,961 (5-Sonstige). Bis auf die Kombination 5-Sonstige führen auch die direkten Vergleiche der beiden Teilmengen zu der Ablehnung von H_0 . Das lässt die Vermutung zu, dass die Teilmengen nicht ausreichen, um die Dynamik der dargestellten Gruppen-Fahrtgrund-Kombinationen abzubilden.

Standdauer Arbeit

Folgende Klassen werden bei dem Vergleich der Standdauern (in min) am Arbeitsplatz gebildet: (0,120], (120,240], (240,420], (420, 480], (480,540], (540,600], (600,∞). Wie bei den Distanzen zum Arbeitsplatz sind die Gruppe 3 und 6 zusammengefasst, allerdings führt diese Zusammenfassung dennoch nicht zu einer ausreichenden Menge an Beobachtungen (kursiv gedruckte Werte in Tabelle 18). Die Bewertung der beiden Gruppen ist

Tabelle 18: Testergebnis Standarddauer Arbeit (nur erwerbstätige Personen von 18 – 64 Jahren / Mo – Fr)

Nutzergruppe			P ₁	P ₂	P ₀	$\chi^2_{(0,95;J-1)}$	P ₃
1	18-29	männlich	9,165	6,578	7,871	12,592	
2	30-49	männlich	25,953	21,798	23,875	12,592	10,142
3,6	50-64	männlich weiblich	2,749	2,728	2,738	5,991	
4	18-29	weiblich	2,545	1,373	1,959	12,592	
5	30-49	weiblich	9,745	10,854	10,299	12,592	

Tabelle 19: Vergleich der wochentagsspezifischen Arbeitsstandardauern der Gruppe 2

Wochentag	P ₁	P ₂	P ₀	$\chi^2_{(0,95;J-1)}$	P ₃
Montag	8,256	5,722	6,989	12,592	3,556
Dienstag	25,804	35,869	30,837	12,592	20,849
Mittwoch	7,405	4,136	5,771	12,592	4,806
Donnerstag	29,653	17,168	23,411	12,592	20,354
Freitag	6,706	5,810	6,258	12,592	4,638

daher nur eingeschränkt gültig. Bis auf die Gruppe 2 zeigen die Tests, dass die Abweichungen der erwarteten und beobachteten Standardauern am Arbeitsplatz nur zufällig sind. Der direkte Vergleich von T₁ und T₂ ergibt, dass die Abweichung scheinbar nicht durch die Heterogenität der beiden Teilmengen zu erklären ist (der Test der beiden Teilmengen (Tabelle 18: P₃) hat H₀ angenommen). Aus diesem Grund wird die Gruppe 2 näher untersucht, indem die Zusammenführung der Wochentage aufgehoben wird. Der Vergleich auf Tagesebene ergibt, dass sich T₁ und T₂ an den beiden Wochentagen Dienstag und Donnerstag unterscheiden. Diese wird in das Modell übertragen und dort teilweise verstärkt (s. Tabelle 19). Diese Verstärkung führt zu der Ablehnung von H₀ bei der Zusammenfassung der Wochentage. An den Tests ist zu erkennen, dass das Modell die Daten (und deren Heterogenität) getreu widerspiegelt. Um die Abweichungen zu reduzieren, wäre eine Zusammenfassung der Wochentage Montag – Freitag im Mobilitätsmodell möglich.

Standardauern Sonstige

Die weiteren Standardauern werden in die Klassen (0,30], (30,60], (60,120], (120,150] und (150,∞) eingeteilt. Die Testergebnisse sind in Tabelle 20 dargestellt. Auch hier zeichnen sich dieselben Effekte ab, die bei den anderen Tests beobachtet wurden. Die Gruppen-Fahrtgrund-Kombinationen 2-Einkauf, 6-Einkauf, 4-Freizeit, 2-Sonstige, 3-Sonstige und 6-Sonstige weisen signifikante Unterschiede bei den beobachteten und erwarteten Standardauer-Häufigkeiten für die jeweiligen Fahrtgründe auf. Diese sind, wie bei den anderen Tests, weitestgehend durch die Heterogenität der Teilmengen begründet. Die Abweichungen bei 3-Sonstige und 6-Sonstige sind wie oben durch die wochentagsspezifischen Abweichungen verursacht. Tabelle 21 zeigt das exemplarisch an der Gruppe 6. Es wird

Tabelle 20: Testergebnis Dauern Sonstige (nur erwerbstätige Personen von 18 – 64 Jahren)

Nutzergruppe	Fahrtgrund	P ₁	P ₂	P ₀	$\chi^2_{(0,95;J-1)}$	P ₃
1 18-29 männlich	Einkauf	4,370	5,279	4,824	5,991	2,601
2 30-49 männlich	Einkauf	16,681	14,208	15,444	9,488	12,560
3 50-64 männlich	Einkauf	10,128	6,038	8,083	9,488	8,394
4 18-29 weiblich	Einkauf	3,253	2,602	2,928	9,488	2,288
5 30-49 weiblich	Einkauf	8,584	6,774	7,679	9,488	6,354
6 50-64 weiblich	Einkauf	18,535	17,782	18,159	9,488	18,683
1 18-29 männlich	Freizeit	4,668	5,177	4,923	9,488	4,937
2 30-49 männlich	Freizeit	3,052	3,236	3,144	9,488	2,527
3 50-64 männlich	Freizeit	5,746	3,255	4,500	9,488	3,280
4 18-29 weiblich	Freizeit	40,515	30,125	35,320	9,488	29,909
5 30-49 weiblich	Freizeit	7,284	3,425	5,355	9,488	5,035
6 50-64 weiblich	Freizeit	5,957	5,073	5,515	9,488	6,136
1 18-29 männlich	Sonstige	5,187	4,429	4,808	9,488	5,185
2 30-49 männlich	Sonstige	17,723	15,646	16,684	9,488	10,717
3 50-64 männlich	Sonstige	9,278	11,246	10,262	9,488	7,803
4 18-29 weiblich	Sonstige	3,686	6,939	5,312	9,488	2,896
5 30-49 weiblich	Sonstige	3,983	9,076	6,530	9,488	6,835
6 50-64 weiblich	Sonstige	7,359	28,429	17,894	9,488	6,660

Tabelle 21: Vergleich der wochentagsspezifischen Dauern des Fahrtgrunds Sonstige der Gruppe 6

Wochentag	P ₁	P ₂	P ₀	$\chi^2_{(0,95;J-1)}$	P ₃
Montag	1,950	1,634	1,792	7,815	1,365
Dienstag	3,320	7,580	5,450	9,488	4,062
Mittwoch	6,913	5,547	6,230	7,815	5,018
Donnerstag	4,203	1,753	2,978	7,815	3,919
Freitag	7,786	29,520	18,653	3,841	8,315

deutlich, dass die Wochentage bis auf den Freitag repräsentativ durch das Mobilitätsmodell beschrieben sind. Die Abweichung ist demnach durch die Abweichungen der Teilmengen T₁ und T₂ zu erklären und durch die Tatsache, dass für die Tage Samstag und Sonntag nur wenig Datensätze zur Kalibrierung zur Verfügung standen (Samstag: 30; Sonntag: 21).

Realisierte Fahrtketten

Für jede Nutzergruppe werden individuell die zehn am häufigsten realisierten Fahrtketten in der MiD2008-Studie ermittelt und anschließend mit den generierten Fahrtketten verglichen. Tabelle 22 zeigt die Testergebnisse. Insgesamt werden die erwarteten Fahrtketten auch generiert. Die Abweichung bei Gruppe 2 ist wie bei den vorherigen Tests durch die Unterschiede von T₁ und T₂ zu erklären.

Tabelle 22: Testergebnis Fahrtketten (nur erwerbstätige Personen von 18 – 64 Jahren)

Nutzergruppe			P ₁	P ₂	P ₀	$\chi^2_{(0,95;J-1)}$	P ₃
1	18-29	männlich	2,560	15,684	9,122	15,507	
2	30-49	männlich	10,988	38,918	24,953	16,919	18,710
3	50-64	männlich	10,510	2,216	6,363	15,507	
4	18-29	weiblich	11,811	8,516	10,163	15,507	
5	30-49	weiblich	16,754	7,837	12,295	15,507	
6	50-64	weiblich	10,086	11,422	10,754	14,787	

Abfahrtszeiten

Die Testergebnisse der Abfahrtszeiten ist in Tabelle 23 dargestellt (Klassen: (0:00, 9:00], (9:00, 12:00], (12:00, 15:00], (15:00, 18:00], (18:00, 21:00] und (21:00, 24:00]). Auch hier zeigt sich, dass das Mobilitätsmodell die für die Kalibrierung verwendeten Daten realitätsnah abbildet. Die Abweichungen können ebenfalls durch die Abweichung der Teilmengen erklärt werden, obwohl hier eine deutliche Verstärkung der Abweichung zu verzeichnen ist. Besonders deutlich ist das an der Gruppe 2 zu erkennen. Das Modell scheint hier nicht die Dynamik von unterschiedlichen Arbeitszeitmodellen (Schichtarbeit, Gleitzeit etc.) abbilden zu können. Eine Veränderung der Gruppenzusammenstellung, die diese Effekte berücksichtigen würde, ist aufgrund der zur Verfügung gestellten Daten sowohl der MiD2008-Studie als auch des Zensus2011 nicht möglich.

Realisierte Distanz

Wie in Abschnitt 4.1.1.1 erläutert, werden die Zielorte anhand von Luftlinienentfernungen ermittelt ohne Berücksichtigung des tatsächlichen Verkehrsnetzes. Ohne Anpassung würde das zu überhöhten realisierten Fahrtweiten führen. Daher werden die Suchradien um den Faktor 0,775 skaliert. Die folgende Untersuchung bewertet den Fehler der durch diese Art der Zielortermittlung entsteht. Die mittlere Abweichung der realisierten Fahrtstrecken und der gezogenen Fahrtstrecken beträgt 1,321 km. Das heißt die generierten Fahrten sind im Mittel zu lang. Die absolute mittlere Abweichung beträgt 1,83 km. Wie der Boxplot in Abbildung 61 zeigt, ist diese mittlere Abweichung der Fahrtstrecke durch

Tabelle 23: Testergebnis Abfahrtszeiten (nur erwerbstätige Personen von 18 – 64 Jahren)

Nutzergruppe			P ₁	P ₂	P ₀	$\chi^2_{(0,95;J-1)}$	P ₃
1	18-29	männlich	25,609	11,588	18,598	10,279	25,609
2	30-49	männlich	21,085	34,751	27,918	11,070	14,958
3	50-64	männlich	2,009	3,404	2,707	10,279	
4	18-29	weiblich	9,034	11,963	10,499	11,070	
5	30-49	weiblich	19,859	22,445	21,152	11,070	12,766
6	50-64	weiblich	9,031	5,927	7,479	11,070	

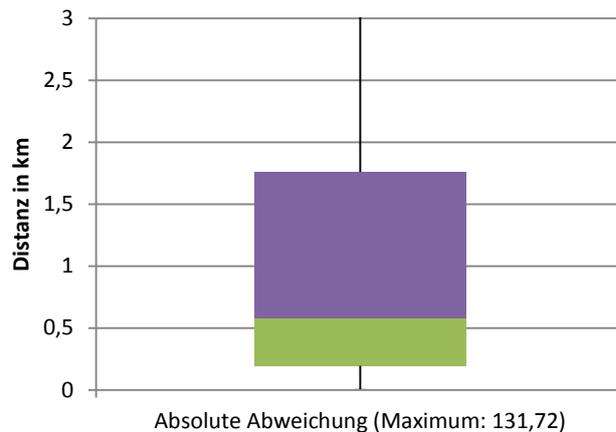


Abbildung 61 Boxplot der absoluten Distanzunterschiede

die Ausreißer bedingt. Der Median, das untere und das obere Quantil zeigen, dass sich die absoluten Abweichungen hauptsächlich im Bereich von 0,196 und 1,761 befinden. Die großen Abweichungen (im Maximum 132,72) entstehen durch weite Fahrten, die über die Grenzen der modellierten Region hinausgehen. Dadurch wird der am nächsten zum Suchradius befindliche Punkt als neues Ziel ermittelt. Diese Fehler sind bei der anschließenden Bewertung zu berücksichtigen.

5.1.3 E-Mob Modell

Das E-Mob Modell stellt die Parameter der Elektrofahrzeuge und der Ladeinfrastruktur für die beiden Evaluationsszenarien bereit. Die instanziierten Modelle zeigen, dass

- unterschiedliche Verbrauchsverläufe und Kapazitäten der Fahrzeuge sowie
- unterschiedliche technische Lösungen der Ladestationen (AC und DC) und deren Anschlussleistungen modelliert werden können.

5.1.3.1 Elektrofahrzeuge

Für die Untersuchungen werden mehrere Referenzelektrofahrzeuge modelliert. Dieses geschieht zunächst unter Verwendung der Herstellerangaben und der Datenauswertung der Flottenversuche, die in der Modellregion Bremen/Oldenburg durchgeführt wurden [Duchrow et al. (2012)]. Diese Daten wurden von dem Projektpartner *Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH* (DFKI) bereitgestellt. Bei der Modellierung wird nur auf die in Abschnitt 4.1.1.2 und 4.1.1.3 dargestellten Modellelemente zugegriffen. Eine weitere Verfeinerung findet nicht statt. Die Leistungsdaten sind in Tabelle 24 aufgezeigt. Zur Modellierung der Fahrzeuge wird die in Abschnitt 4.1.1.3 dargestellte Car-Klasse verwendet. Bis auf das Attribut `airResistance`, können die unten genannten Daten die Car-Objekte beschreiben.

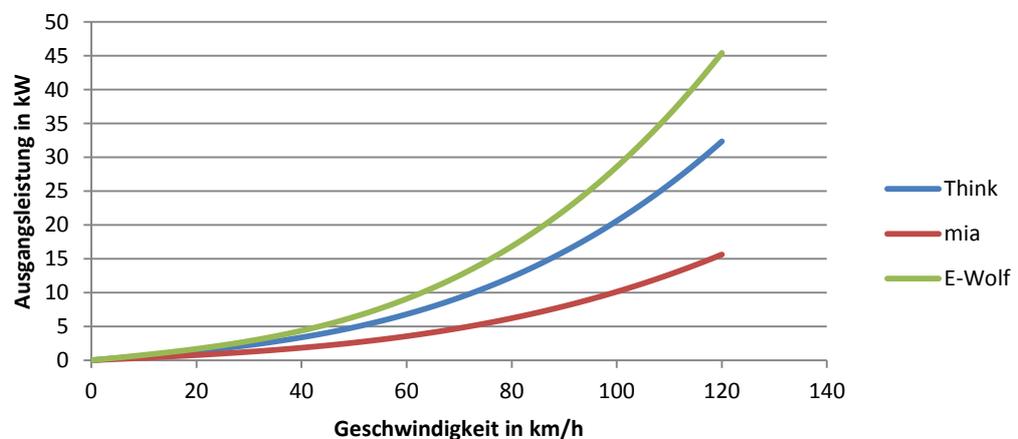
Tabelle 24: Fahrzeugmodellierung

Fahrzeug	Kapazität in kWh	Ø Verbrauch pro 100 km in kWh	Max. Leistung Motor in kW	Max. Geschwindigkeit in km/h	Masse in kg	Luftwiderstand (airResistance)
Think City	20,0	15,0	34	100	1.500	1,1
mia	12,0	8,0	18	110	870	0,5
e-Wolf Delta-2	24,2	18,7	90	110	1.850	1,6

Um die jeweiligen `airResistance`-Attribute zu bestimmen, durchlaufen die Fahrzeuge simulativ den *Neuen Europäischen Fahrzyklus* (NEFZ) [Schmid (2012), S. 98–99]. Die `airResistance`-Werte werden iterativ solange angepasst bis der Verbrauch, der durch den Fahrzyklus berechnet wurde, den durchschnittlichen Verbräuchen aus Tabelle 24 entsprechen. Damit geht die Annahme einher, dass die Nutzer der Flottenversuche Fahrten entsprechend des NEFZ realisiert haben. Die ermittelten `airResistance`-Werte sind in der letzten Spalte in Tabelle 24 dargestellt. Abbildung 62 zeigt die ermittelten Zusammenhänge von Geschwindigkeit und Ausgangsleistung der Fahrzeuge.

5.1.3.2 Ladeinfrastruktur

Auch bei der Ladeinfrastruktur reichen die bereitgestellten Modelle aus, um die in den Szenarien untersuchten leitungsgebundenen Ladestationen abzubilden. In den Szenarien gehen Ladestationen mit Lademodi Mode 1 – Mode 4 des IEC 62196 Standards [VDE (2012)] ein (s. Tabelle 25). Die Zugangsmöglichkeiten und die tatsächliche Verfügbarkeit der Ladestationen sind szenariospezifisch und werden in den entsprechenden Abschnitten behandelt.

**Abbildung 62** Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Ausgangsleistung

5.1.3.3 Integration der Bewertungskennzahlen

Die in Abschnitt 4.1.2.2 und 4.1.2.3 dargestellten Behaviour-Klassen des Simulationsframeworks werden erweitert, um Ausfälle, Fahrten, Ladevorgänge etc. zu loggen und so die Adoptionsfähigkeit der Nutzer und die Notwendigkeit der Ladeinfrastruktur bewerten zu können. Tabelle 26 stellt die integrierten Kennzahlen und die Behaviour-Klassen, in denen sie ermittelt und geloggt werden, dar. Sie decken direkt oder indirekt die in Hoerstebroek und Hahn (2012) identifizierten operativen Kennzahlen ab. Diese wurden mithilfe einer Stakeholderanalyse ermittelt.

Zusammenfassend steht mit den oben genannten Parametrisierungen ein Modell für die Metropolregion Bremen/Oldenburg bereit, mit dem Szenarien bei der Einführung der Elektromobilität bewertet werden können. Der probabilistische Prozess der Fahrtketten-generierung konnte validiert werden, allerdings bedarf es eines großen Datensatzes um alle Aspekte der Nutzermobilität getreu wiederzugeben. Mit der Anwendbarkeit der Modelle und Möglichkeiten der Szenarienbewertung befassen sich die nächsten Abschnitte 5.2 und 5.3.

5.2 Fallbeispiel Privatnutzung

Das Szenario deckt den privaten Bereich für die Installation von Ladestationen ab. Das Fallbeispiel wurde im Zuge des Projektes *Personal Mobility Center* (PMC) innerhalb der Modellregion Elektromobilität Bremen/Oldenburg durchgeführt [Oppenheimer und Hoerstebroek (2011); PMC (2014)]. Es evaluiert die potenziellen Lademöglichkeiten von Nutzern, die innerhalb der Region beruflich pendeln. Als Einstieg betrachtet das Szenario

Tabelle 25: Ladestationsmodellierung

Ladestation (Modus)	Spannung	Stromstärke	Anzahl Phasen	Leistung
Mode 1	230 V (AC)	16 A	1	3,68 kW
Mode 2	400 V (AC)	16 A	3	11,085 kW
Mode 3	400 V (AC)	32 A	3	22,170 kW
Mode 4	400 V (DC)	125 A	-	50 kW

Tabelle 26: Bewertungskennzahlen

Bereich	Behaviour	Metriken
Ausfall	DrivingBehaviour	Fahrzeug-Id Zeitpunkt Position Benötigte Energie
Fahrt	DrivingBehaviour	Fahrzeug-Id Startzeitpunkt Endzeitpunkt Startknoten Zielknoten Distanz SOC Fahrtziel Verbrauch
Ladevorgang	ChargingHandler	Startzeitpunkt Endzeitpunkt Ladestations-Id Ladestation-Terminal-Id Fahrzeug-Id Fahrzeug-Terminal-Id Position Energie Ladeleistung
Standzeiten	TimeTableBehaviour	Fahrzeug-Id Startzeitpunkt Enzeitpunkt Position SOC
Verspätungen	TimeTableBehaviour	Fahrzeug-Id Zeitpunkt Verspätung (in min)

den besonders gewerblich und industriell geprägten Bremer Ortsteil Sebaldsbrück. Da sich in Sebaldsbrück unter anderem ein Fertigungswerk von Mercedes Benz (12.678 Mitarbeiter [Daimler (2013)]), Atlas Elektronik (1300 Mitarbeiter [Atlas (2013)]) und Könecke (1200 Mitarbeiter [Könecke (2014)]) befinden, stellt dieser Ortsteil eine signifikante Zielzelle für den Arbeitsverkehr in der Region dar. Damit deckt dieses Fallbeispiel eine große Gruppe von Personen ab, der es aus operativer Sicht besonders leicht fällt, die neue Technologie zu adoptieren (sog. Early Adopters). Diese einfache Adoptionsfähigkeit ergibt sich durch die langen Standzeiten am Arbeitsplatz und der hohen Wahrscheinlichkeit, dass diese Nutzergruppen Zuhause eine Lademöglichkeit besitzen.

Ziel der Untersuchung ist es, die Anzahl der benötigten Ladestationen für den Ortsteil Sebaldsbrück zur Abdeckung des Strombedarfs der Elektrofahrzeuge der dort beschäftigten Arbeitnehmer zu ermitteln. Dabei wird die notwendige Anzahl an Ladestationen unter Berücksichtigung verschiedener Austauschraten der konventionellen Fahrzeuge durch Elektrofahrzeuge bestimmt. Maßgebliche Kriterien zur Bestimmung dieser Anzahl stellen die im letzten Abschnitt genannten operativen Kennzahlen der Fahrzeuge (z. B. Ausfallquoten und Verspätungen durch Ladevorgänge) sowie der Infrastruktur (z. B. Auslastung) dar. Die Untersuchung adressiert folgende Fragestellungen:

1. Welche Anzahl an Ladestationen werden benötigt bei Berücksichtigung verschiedener Austauschquoten der konventionellen Fahrzeuge durch Elektrofahrzeuge?
2. Welchen Einfluss auf die Anzahl der Ladestationen hat die Anschlussleistung?
3. Reicht die Reichweite aktueller Elektrofahrzeuge aus, um die Mobilitätsbedürfnisse der Nutzer zu befriedigen?
4. Welchen Einfluss hat eine Verringerung/Erhöhung des Verbrauchs bzw. der Kapazität der Fahrzeuge?
5. Welchen Einfluss hat die Betrachtung der Verkehrsdichte?

Die Beantwortung der ersten drei Fragestellungen liefert konkrete Handlungsempfehlungen für die Unternehmen in Sebaldsbrück und deren Mitarbeiter bezüglich der Adoptionsmöglichkeit von Elektrofahrzeugen und der notwendigen Ladeinfrastruktur. Die letzten beiden Fragestellungen zielen darauf ab, die Modellierungsgranularität zu bestimmen, die notwendig ist, um die Fahrten und die verursachten Verbräuche realitätsnah abzubilden. Die Elemente des zu untersuchenden Systems werden so einfach wie möglich gehalten (A 12 – Datenintegration), damit der Anwender mit möglichst geringem Aufwand (vor allem bei der Datenbeschaffung und Modellierung) unterschiedliche Ladeinfrastrukturszenarien analysieren kann. Um den Effekt dieser Vereinfachungen zu bewerten, werden zwei Sensitivitätsanalysen durchgeführt, die sich mit den Fragestellungen 4 und 5 beschäftigen.

Die erste Sensitivitätsanalyse adressiert die vereinfachte Darstellung des Zusammenhangs der Geschwindigkeit des Fahrzeugs, dessen Leistungsbedarf und dem daraus resultierenden Verbrauch. Diese wurden aus Herstellerangaben, den Flottenversuchen und unter Verwendung des *Neuen Europäischen Fahrzyklus* (NEFZ) ermittelt. Für die Sensitivitätsanalyse werden daher die Verbräuche der Fahrzeuge in mehreren Schritten erhöht bzw. verringert, um zu überprüfen, welche Abweichung des Verbrauchs zu einer signifikanten Veränderung der Bewertungskennzahlen führt. Mit dem Ergebnis kann zum einen der Fehler ermittelt werden, der bei nachgelagerten Bewertungen der Szenarien berücksichtigt werden kann und zum anderen Empfehlungen für Ansatzpunkte einer Verfeinerung der Modellierung identifiziert werden.

Die zweite Sensitivitätsanalyse beschäftigt sich mit dem Modellierungsgrad des Verkehrssystems. In die Simulation finden nur die Fahrzeuge Berücksichtigung, die für die Untersuchung relevant sind. Der weitere Verkehr wird ausgeblendet, da der Fokus nicht auf der Bewertung der Verkehrsinfrastruktur liegt. Die simulierten Fahrzeuge erfahren dadurch keinen Stau oder sonstige Behinderungen bei der Erreichung der Fahrtziele. Es kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund der höheren Effizienz der Elektrofahrzeuge und ihrer Rekuperationseigenschaften eine detailliertere Modellierung des Verkehrssystems nur die zeitlichen Dimensionen (z. B. Ankünfte und Verspätungen) und weniger die Verbräuche und die Ausfallquoten beeinflusst. Die zweite Sensitivitätsanalyse untersucht die Zulässigkeit dieser Annahme. Hierbei wird die Belastung des Verkehrssystems in mehreren Schritten erhöht und überprüft, welchen Einfluss diese Belastung auf die Bewertungskriterien hat. Um nicht zusätzliche Fahrzeuge in das System bringen und die Streckenmodellierung um Kapazitäten erweitern zu müssen, wird die maximale Geschwindigkeit der Strecken zur Repräsentation der Belastung in mehreren Schritten reduziert. Die nächsten Abschnitte beschäftigen sich mit der Beschreibung, der Durchführung und der Auswertung der Szenarien sowie mit der Beantwortung der oben genannten Fragestellungen.

5.2.1 Szenariobeschreibung

Die in den vorangegangenen Abschnitten erläuterten Modelle bilden die Basis für die Durchführung der Untersuchung. Die in Abschnitt 4.1.2 dargestellte Multi-Agenten-Simulation dient dazu, die Eingangsdaten zu verarbeiten und die Fahrten und Ladevorgänge der Fahrzeuge abzubilden. Sie wird dazu mehrfach mit unterschiedlichen Szenarien durchgeführt. Diese unterscheiden sich in der Anzahl der verwendeten Elektrofahrzeuge und die bereitgestellte Ladeinfrastruktur am Arbeitsplatz (Anzahl und Leistung). Innerhalb der Simulation erfolgt keine Adaption des Nutzerverhaltens, d. h. jeder Nutzer versucht seine vom Mobilitätsmodell generierten Fahrtketten abzufahren auch wenn die Fahrten zwangsläufig zu einem Ausfall des Fahrzeugs aufgrund von unzureichender

Energie führen sollte. Der Planungshorizont beträgt eine Fahrt, d. h. der Nutzer sucht vor der Abfahrt in einem Radius von max. zwei Kilometer um seinen Standort nach einer Ladestation, falls die Energie des Fahrzeugs nicht für die aktuelle Fahrt ausreichen sollte. Wie er von dem Zielort zu dem nächsten Ziel kommt und ob die Energie dafür ausreicht, prüft der Agent erst vor der nächsten Abfahrt. Sollte die Reichweite des Fahrzeugs insgesamt nicht für die nächste Fahrt ausreichen oder keine Ladeinfrastruktur bereitstehen, fällt das Fahrzeug aus und wird aus der Simulation entfernt. Unter diesen Vorgaben sind die ermittelten Werte bezüglich der Ausfallquote demnach als pessimistisch anzusehen und sind durch Adaption des Verhaltens bzw. durch eine längerfristige Planung entscheidend positiv veränderbar.

In dem Szenario werden die Fahrzeuge betrachtet, die aus den unterschiedlichen Gemeinden der Modellregion zum Ortsteil Sebaldsbrück (Bremen) pendeln. Die Anzahl der Fahrzeuge pro Tag wurde dabei von dem Bremer Senator für Umwelt, Bau und Verkehr (SUBV) in dem Projekt PMC zur Verfügung gestellt. Die Fahrten wurden durch ein klassisches Verkehrsmodell geschätzt (s. Abschnitt 3.1). Da es sich um ein auf Bremen fokussiertes Verkehrsmodell handelt, werden die betrachteten Zonen größer, je weiter ihre Entfernung nach Bremen beträgt. Zur Vereinfachung wurde jeder Zone des Bremer Verkehrsmodells einer Gemeinde zugeordnet. Die Anzahl der Fahrzeuge die nach Bremen aus den unterschiedlichen Gemeinden pendeln ist in Tabelle 27 dargestellt.

Tabelle 27: Anzahl an Fahrzeugen, die nach Bremen pendeln (getrennt nach Nutzergruppen)

Quell-Gemeinde	18-29	30-49	50-64	18-29	30-49	50-64
	männlich	männlich	männlich	weiblich	weiblich	weiblich
Diepholz, Stadt (Kreis: Diepholz)	158	527	383	111	14	158
Cuxhaven, Stadt (Kreis: Cuxhaven)	5	18	14	5	1	5
Osterholz-Scharmbeck, Stadt (Kreis: Osterholz)	169	593	442	112	15	169
Verden (Aller), Stadt (Kreis: Verden)	202	687	504	169	21	202
Delmenhorst, Stadt (Kreisfreie Stadt)	9	30	22	10	2	9
Oldenburg (Oldenburg), Stadt (Kreisfreie Stadt)	30	74	46	25	3	30
Wilhelmshaven, Stadt (Kreisfreie Stadt)	1	2	1	1	1	1
Westerstede, Stadt (Kreis: Ammerland)	2	4	3	1	1	2
Cloppenburg, Stadt (Kreis: Cloppenburg)	6	14	9	4	1	6
Jever, Stadt (Kreis: Friesland)	1	2	1	1	1	1
Ganderkesee (Kreis: Oldenburg)	24	80	57	15	2	24
Vechta, Stadt (Kreis: Vechta)	6	13	8	3	1	6
Brake (Unterweser), Stadt (Kreis: Wesermarsch)	2	7	5	2	1	2
Bremen, Stadt (Kreisfreie Stadt)	888	2448	1564	902	91	888
Bremerhaven, Stadt (Kreisfreie Stadt)	1	2	2	1	1	1

Tabelle 28: Parameter der Simulation und der Sensitivitätsanalyse

Parameter (Simulation)	Ausprägungen
Austauschquote der Fahrzeuge	1 % 2 % 3 % 4 % 5 %
Anzahl Ladestationen (in Abhängigkeit der simulierten Fahrzeuge)	0 % 10 % 40 % 70 % 100 %
Leistung der Ladestationen	3,7 kW 22,2 kW
Verwendetes Fahrzeug	Think City
Parameteränderung (Sensitivitätsanalyse)	Ausprägungen
Verbrauch der Fahrzeuge	-25 % -10 % +10 % +25 %
Straßenbelastung (Reduktion der maximalen Geschwindigkeit)	-20 % -35 % - 50 %

Die dargestellten Mengen an Fahrzeugen spiegeln die gesamte Anzahl an konventionellen Fahrzeugen wider, die in 2011 täglich nach Sebaldsbrück pendeln. In den zu bewertenden Szenarien werden sukzessive 1 % bis 5 % der Fahrzeuge virtuell durch Elektrofahrzeuge ausgetauscht und deren Mobilitätsverhalten einer Woche simuliert. Für jede Austauschquote werden unterschiedliche Kombinationen aus Anzahl und Leistungen der in Sebaldsbrück positionierten Ladestationen untersucht (s. Tabelle 28: Simulation). Dabei wird vereinfacht angenommen, dass die Ladestationen in Sebaldsbrück jedem Fahrzeug zugänglich sind, da eine Differenzierung der Arbeitsplätze aufgrund der Datenlage nicht möglich ist. Es wird davon ausgegangen, dass jedem Nutzer ein Ladepunkt Zuhause mit 3,7 kW zur Verfügung steht. Die heimischen Ladestationen sind dabei nur von den jeweiligen Fahrzeugen benutzbar. Als Fahrzeug wird der in Abschnitt 5.1.2 modellierte Think City verwendet. Insgesamt werden 50 Simulationen durchgeführt und bewertet (Kartesisches Produkt der Parameterausprägungen in Tabelle 28: Simulation).

Das Szenario mit einer Austauschquote von 5 %, einer maximalen Abdeckung der Ladefrastruktur am Arbeitsplatz (100 %) und einer Ladeleistung von 3,7 kW dient für die nachgelagerte Sensitivitätsanalyse zur Beantwortung der Fragestellungen hinsichtlich der notwendigen Modellierungsgranularität (s. Beginn des Abschnitts 5.2). Hierbei werden die Verbräuche der Fahrzeuge und der Straßenbelastungen variiert (s. Tabelle 28: Sensitivitätsanalyse), um die Stabilität der Ergebnisse zu untersuchen. Ziel ist es, Erkenntnisse darüber zu erhalten, ob die verwendete Modellierung zur Beschreibung des Systems ausreicht und welche Modellparameter ggf. verfeinert werden müssen.

5.2.2 Bewertung

Die Bewertung der Szenarien erfolgt unter der Verwendung der beiden Kennzahlen Ausfallquote der Fahrzeuge und Auslastung der Ladestationen. Ziel ist die Ermittlung der Kombination aus Anzahl und Leistung der Ladestationen, die die höchste Auslastung und

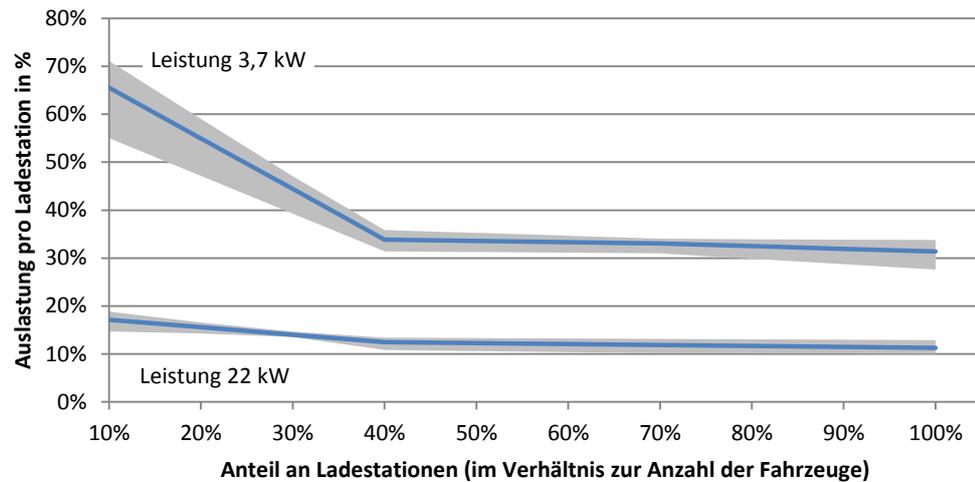


Abbildung 63 Auslastung der Ladestationen am Standort Sebaldsbrück (der graue Bereich stellt den Korridor zwischen den minimalen und maximalen Werten dar; die blaue Linie repräsentiert die mittlere Auslastung)

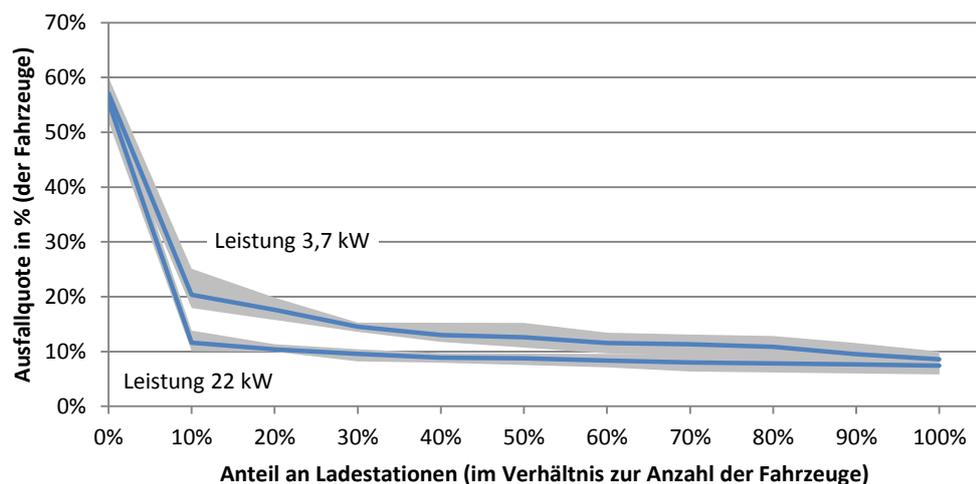


Abbildung 64 Ausfallquoten am Standort Sebaldsbrück (der graue Bereich stellt den Korridor zwischen den minimalen und maximalen Werten dar; die blaue Linie repräsentiert die mittleren Auslastungen)

die geringste Ausfallquote verursacht. Die Ergebnisse der Simulation kann den Abbildungen 63 und 64 entnommen werden. Es ist zu erkennen, dass die Verläufe ähnlich sind. Die Auslastung pro Tag und Ladestation¹³ (s. Abbildung 63) ist bei einer geringen Ausbringung von Ladestationen zunächst am höchsten, sinkt linear bis 40 % an Ladestationen pro Fahrzeug ab und bleibt dann konstant. Die absoluten Höhen der Kurven sind durch die Ladeleistungen bestimmt. Während mit geringen Ladeleistungen eine Auslastung von

¹³ Die Auslastung bezieht sich auf eine mögliche Nutzungsdauer von 16 Stunden pro Tag.

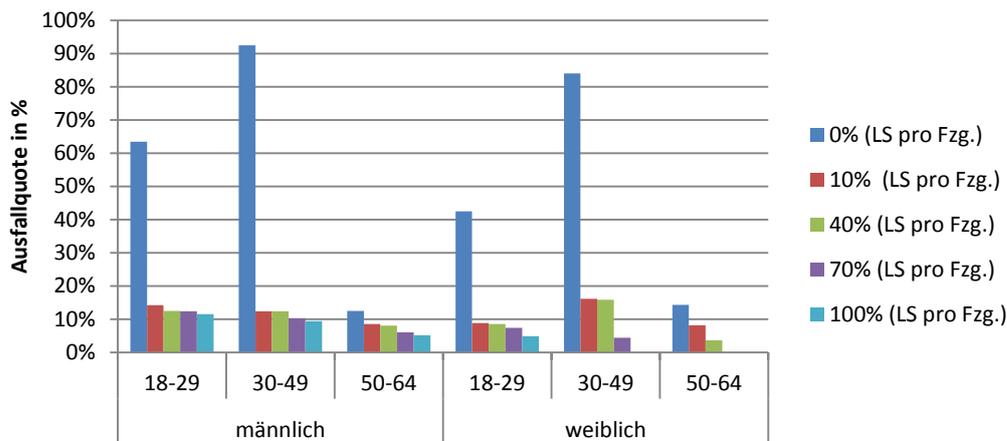


Abbildung 65 Ausfallquoten je Nutzergruppe bei Ladestationen mit 22,2 kW Leistung (die Säulen repräsentieren die Ausfallquote in Abhängigkeit der Anzahl an Ladestationen pro Fahrzeug in %)

bis zu 71 % erreicht werden kann, liegt die Auslastung bei hoher Ladeleistung im besten Fall bei ca. 18 %. Die Ausfallquoten zeigen das umgekehrte Bild (Abbildung 64). Bereits mit einer geringen Anzahl an Ladestationen (10 % der Fahrzeuge) kann die Ausfallquote signifikant gesenkt werden. Bei einer weiteren Ausweitung der Ladestationen sinkt die Ausfallquote nur langsam (bei 3,7 kW Leistung) bzw. bleibt fast auf konstantem Level (bei 22,2 kW). Bei durchschnittlichen Investitionskosten von 550 EUR (3,7 kW Anschlüssen) bzw. 950 EUR (22,2 kW Anschlüssen) [Kley (2011), S. 32] läge die Investitionssumme bei einer Bereitstellung von 10 % der Ladestationen bei 19.800 EUR (3,7 kW) bzw. 34.200 EUR (22,2 kW). Wird ein Budget von 34.200 EUR angenommen, würde die alleinige Investition in 3,7 kW Ladestationen lediglich zu einer Abdeckung von 17 % der Fahrzeuge und damit zu keiner Verbesserung der Ausfallquote im Gegensatz zu den 22,2 kW Ladestationen führen. Eine Ausbringung von wenigen Ladestationen mit höheren Leistungen ist somit vorzuziehen auch wenn die Auslastung der einzelnen Ladestationen dadurch geringer ist.

Abbildung 65 zeigt die Ausfallquoten je Nutzergruppe, die in das Mobilitätsmodell eingegangen sind. Auch hier ist deutlich der Effekt zu erkennen, den bereits eine geringe Ausbringung der Ladeinfrastruktur hat (hier 22,2 kW). Besonders profitieren davon die Gruppen der 30-49 jährigen. Die Ausfallquote wird von 92 % auf 12 % (männlich) bzw. von 84 % auf 16 % (weiblich) gesenkt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bereits durch eine relativ geringe Bereitstellung von Ladestationen ein großer Effekt bei der gesamten Nutzung von Elektrofahrzeugen (nicht nur für den Weg zum Arbeitsplatz) erreicht werden kann.

Diese Ergebnisse müssen allerdings im Zusammenhang mit den Annahmen über das Nutzerverhalten gesehen werden. Es wird in der Simulation davon ausgegangen, dass die

Tabelle 29: Einfluss der Verkehrsbelastung auf den Verbrauch und die Auswertung

	Referenz	Geschwindigkeit -20 %	Geschwindigkeit -35 %	Geschwindigkeit -50 %
Mittlerer Verbrauch	14,915	14,915	14,958	15,004
Differenz zum Referenzwert in %	-	0,0 %	0,29 %	0,58 %
Mittlere Ausfallquote	11,80%	11,82 %	12,20 %	12,45 %
Differenz zum Referenzwert in %	-	0,02 %	0,40 %	0,66 %
Mittlere Auslastung	34,05%	34,32%	31,43%	33,21%
Differenz zum Referenzwert in %	-	0,27%	-2,62%	-0,84%

Fahrzeuge die Ladestation wieder freigeben, wenn der Ladevorgang beendet ist. Diese Annahme sollte das Ergebnis allerdings nicht signifikant ändern, da nur Fahrzeuge davon profitieren, die nach Beendigung des Ladevorgangs am Arbeitsplatz ankommen. Des Weiteren ist die Annahme eingegangen, dass die Nutzer nicht ihr Mobilitätsverhalten ändern. Diese Annahme kann deutlich in den Abbildungen dadurch erkannt werden, dass in keinem Fall die Ausfallquote unter 10 % gesenkt werden kann. Es ist davon auszugehen, dass durch Adaption des Nutzerverhaltens die Ausfallquote nochmals gesenkt wird, dadurch die Effizienz der Ladestationen aber noch weiter sinkt.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die Modellierung des Verkehrsnetzes ausreichend ist, um den Verbrauch der Fahrzeuge zu bestimmen. Die Tabelle 29 zeigt, dass eine Erhöhung der Verkehrsbelastung (Reduktion der Geschwindigkeit) zu keiner signifikanten Erhöhung oder Verringerung des Verbrauchs führt. Demnach steigt der mittlere Verbrauch im Fall der Geschwindigkeitsreduktion von 50 % lediglich um 0,58 % und die mittlere Ausfallquote um 0,66 %. Auch die Auslastung wird nur marginal durch die erhöhte Straßenbelastung beeinflusst.

Die Modellierung des Verbrauchs hat demgegenüber einen wesentlich höheren Effekt auf die Auswertungen, wobei der negative Effekt einer Verbrauchserhöhung sich stärker auswirkt als der positive Effekt einer Verbrauchsminderung. Tabelle 30 stellt die Werte der Sensitivitätsanalyse dar. Bereits eine Erhöhung des Verbrauchs um 10 % treibt die mittlere Ausfallquote um ca. 9 % in die Höhe. Demnach sind viele Fahrzeuge im Referenzszenario an der Grenze der Machbarkeit angekommen. Dieses führt zu der Schlussfolgerung, dass die Modellierung des Fahrzeugs und dessen Verbrauch kritisch für die Ergebnislösung der Auswertung ist. Die in Abschnitt 5.1.3.1 modellierten Elektrofahrzeuge berücksichtigen einen unterschiedlichen Verbrauch in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und bilden im Mittel den erwarteten Verbrauch aus Tabelle 24 auf Seite 131 ab. Unter den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse scheint die gewählte Abbildung nicht mehr ausreichend, da nicht der komplette Geschwindigkeitsbereich zur Kalibrierung verwendet

Tabelle 30: Einfluss des Verbrauchs auf die Auswertung

	Verbrauch -20 %	Verbrauch -10 %	Referenz	Verbrauch +10 %	Verbrauch +20 %
Mittlere Ausfallquote	6,08%	9,07%	11,80%	20,82%	28,71%
Differenz zum Referenzwert in %	-5,71%	-2,72%	-	9,02%	16,91%
Mittlere Auslastung	29,12%	30,09%	34,05%	35,93%	36,63%
Differenz zum Referenzwert in %	-4,93%	-3,96%	-	1,88%	2,58%

wird. Gerade auf langen Strecken mit hohen Geschwindigkeiten (und demnach erhöhtem Verbrauch) sind die Werte weiter zu validieren. Darüber hinaus stellen die Werte Sommerverbräuche dar. Wird von einem 20 % höheren Verbrauch im Winter durch zusätzliche Verbraucher ausgegangen verändert sich das Ergebnis signifikant. Bevor keine weitere Validierung durchgeführt wird, sollte daher zunächst mit den pessimistischen Verbrauchswerten gearbeitet werden, um eine Untergrenze der Auswertungskennzahlen zu ermitteln und das System aus Fahrzeugen und Infrastruktur nicht zu überschätzen.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse des Szenarios werden im Folgenden zusammengefasst. Die Diskussion über die Anforderungs- und Zielerfüllung der Modelle findet gemeinsam mit dem im aufgezeigten Fallbeispiels *Gewerbliche Flottenanwendung* (5.3) in Abschnitt 5.4 statt.

- Eine geringe Ausbringung von Ladestationen (10 % der Elektrofahrzeug) mit höherer Leistung (22,2 kW) erzielt das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis. Diese Aussage gilt nur, wenn die Ladestationen auch nach Beendigung des Ladevorgangs auch wieder freigegeben werden. Es sind demnach technische oder organisatorische Mechanismen einzuführen, die diese Freigabe ermöglichen.
- Die Verkehrsbelastung hat keinen Einfluss auf die generelle Adoptionsmöglichkeit der Fahrzeugnutzer. Demnach kann eine detaillierte Modellierung des Verkehrs (Makroskopische Sicht) vernachlässigt werden, wenn der Fokus der Untersuchung rein auf den Elektrofahrzeugen und deren Ladevorgänge liegt.
- Die Ergebnisse sind sensitiv gegenüber einer Erhöhung des Verbrauchs. Bereits leichte Erhöhungen führen zu erhöhten Ausfallquoten. Bei den Bewertungen sind deshalb pessimistische Verbrauchswerte anzuwenden oder es werden detailliertere Verbrauchsmodelle benötigt.

5.3 Fallbeispiel gewerbliche Flottenanwendung

Das Fallbeispiel der gewerblichen Flottenanwendung wurde im Zuge des Projekts *Neue Mobilität im ländlichen Raum* (NeMoLand) durchgeführt. Ziel des Projektes war es, das

Potenzial von Elektrofahrzeugen im Flottenbetrieb in ländlich geprägten Gebieten aus Sicht der Mobilitäts- und Auftragsabdeckung der Flotten und im Hinblick auf die Integration von erneuerbaren Energien zu analysieren. Die Fokussierung auf die Flotte und den ländlichen Raum hatte folgende Gründe. Im Gegensatz zum urbanen Raum können Ladestationen wesentlich einfacher installiert werden. Des Weiteren ist die Fahrzeugnutzung höher, als bei privaten Fahrzeugen, so dass die Finanzierung durch den geringeren Strompreis (verglichen zur äquivalenten Menge fossilen Treibstoffs) erheblich vereinfacht wird. Zudem kann im kommerziellen Bereich von einer besseren Planbarkeit der Strecken ausgegangen werden, was den Einsatz der Fahrzeuge für Netzdienstleistungen attraktiver machen sollte. Zuletzt bieten Flotten aus Energienetztsicht ein höheres Speicherpotenzial an, womit mehr erneuerbare Energien lokal verwendet und somit das in ländlichen Bereichen häufig schlecht ausgebaute Niederspannungsnetz geschont werden kann [Hoerstebroek et al. (2012b)]. Aus dieser Ausgangslage ergeben sich folgende Fragestellungen, die in diesem Szenario adressiert werden:

1. Welche Betriebe/Unternehmen können Elektrofahrzeuge adoptieren ohne dass ihre Mobilitätsbedürfnisse verletzt werden?
2. Welchen Beitrag zur Integration von erneuerbaren Energien (EE) leisten die Fahrzeuge?
3. Welchen Effekt haben die Fahrzeuge auf die Lastspitzen im Ortsnetz?
4. Welchen Effekt haben Steuerungsmechanismen auf Adoptionsfähigkeit der Elektrofahrzeuge?

Als Untersuchungsgemeinde dient hierbei die Gemeinde Ganderkesee im Landkreis Oldenburg. Diese weist unterschiedliche Flächennutzungen auf (Städtisches Gebiet, Gewerbe, Landwirtschaft) und hat einen besonders hohen Anteil an EE-Einspeisern. Um die erste Fragestellung zu beantworten, dienen die in Abschnitt 5.1 kalibrierten Modelle. Für die Fragestellungen 2 und 3 liefert die Simulation Informationen über die Zeitpunkte der Ladungen und die realisierten Lasten an eine Energienetzsimulation. Diese wird mit dem Co-Simulationsframework *Mosaik* durchgeführt [Schütte (2013)]. Mit *Mosaik* können unterschiedliche Simulationsmodelle von Verbrauchern, Erzeugern und Energienetzen gekoppelt und gemeinsam bewertet werden. Zudem können Mechanismen zur Steuerung des Smart Grids getestet und untersucht werden. Für die Fragestellung 2 und 3 reicht eine reine (offline) Übergabe der simulierten Fahrzeuglasten aus. Für Fragestellung 4 bedurfte es allerdings einer engeren Kopplung der beiden Systeme. *Mambaa* hat dazu die *Moasik*-API implementiert [Scherfke und Schütte (2012)], wodurch es *Mosaik* möglich ist, die *Mambaa*-Simulation zu steuern und mit den anderen Simulationen (Lasten, PV-Einspeisung) zu orchestrieren. *Mosaik* bestimmt bei der gemeinsamen Simulation der Szenarien, wann welcher Simulator seine Aktionen durchführen soll. Dazu werden die

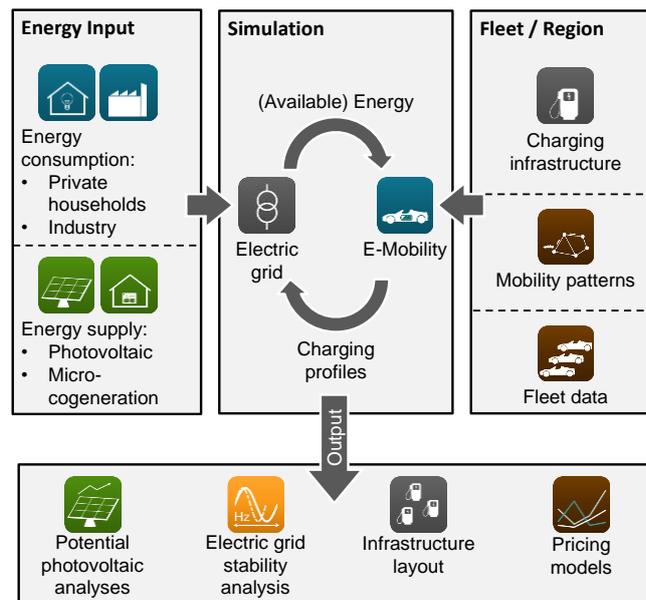


Abbildung 66 Vorgehen der Untersuchung zum gewerblichen Flotteneinsatz

drei Methoden `setData`, `step` und `getData` aufgerufen. Die `setData` übergibt dem jeweiligen Simulator die für den Schritt notwendigen Daten. Dieser führt für den definierten Zeitschritt seine Aktionen (`step`) aus und übergibt das Ergebnis zurück an *Mosaik* (`getData`). Um die Simulation in *Mambaa* pausieren zu können, wurde ein `PauseSimulationBehaviour` erstellt, das auf die Methodenaufrufe von *Mosaik* wartet (Status `Running`) und dementsprechend die Simulation blockiert. Dieses `Behaviour` verarbeitet die Daten von *Mosaik* (in diesem Fall zur Verfügung stehende Leistung aus den PV-Anlagen (s. u.)) und plant sich selbst zu dem von *Mosaik* vorgegebenen Zeitpunkt wieder ein, um dann die Daten an *Mosaik* zurückzusenden um dann erneut die Simulation zu blockieren. Durch diese Online-Kopplung ist es den Agenten in *Mambaa* möglich, auf die Informationen von *Mosaik* situativ zu reagieren. Abbildung 66 fasst das gesamte Vorgehen schematisch zusammen. In der Mitte steht die beschriebene Kopplung der beiden Systeme. *Mosaik* erhält die Daten der betrachteten Ortsnetze (Last, PV-Einspeisung und Mikro-KWK-Einspeisung) Intervallen von 15 Minuten. Diese wurden innerhalb des Projektes durch das *Bremer Energie Institut* (BEI) (heute: *Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung* (IFAM)) bereitgestellt. Auf der Mobilitätsseite gehen die ermittelten Unternehmen getrennt nach Wirtschaftszweigen und Unternehmensgrößen (Abschnitt 5.1.1), die aus den Kid2010 ermittelten Mobilitätsmuster (Abschnitt 5.1.2.2) und die technischen Eigenschaften der Fahrzeuge sowie der Ladeinfrastruktur (Abschnitt 5.1.2) ein. Die Simulationen erzeugen die Daten, die für die nachgelagerten Analysen notwendig sind. Die im Folgenden dargestellten Analyseergebnisse beziehen sich auf die Flottenauswertung. Für die Analysen bezüglich der Steigerung des EE-Anteils am Ladestrom sei auf Buchmann (2014) verwiesen.

5.3.1 Szenariobeschreibung

Für die Gemeinde Ganderkesee wurden sämtliche im Regionsmodell hinterlegten Unternehmen simuliert. Dazu wird für jedes Unternehmen eine Flotte an Elektrofahrzeugen (abhängig von der Unternehmensgröße) generiert. Die Anzahl an Unternehmen getrennt nach Nutzergruppe und die Anzahl an generierten Fahrzeugen ist in Tabelle 31 bzw. Tabelle 32 dargestellt. Danach werden den Haushalten Aktivitäts- bzw. Fahrtketten, unter Verwendung des durch die KiD2010-Daten kalibrierten Mobilitätsmodells, für eine Woche zugeordnet. Als Referenzfahrzeug dient ebenfalls der Think City. In dem Szenario werden sämtliche Fahrzeuge der Unternehmen durch Elektrofahrzeuge ausgetauscht und es findet auch hier, wie in 5.2.1 erläutert, keine Adaption des Fahrerverhaltens statt. Die Durchführung der Simulationsläufe erfolgt in zwei Sätzen. Tabelle 33 fasst die Parameter der einzelnen Szenarien zusammen. Der erste Satz an Simulationsläufen untersucht den Einfluss der am Unternehmensstandort zur Verfügung stehenden Ladeleistung. An den Heimladepunkten steht je nach Szenario 3,7 kW bzw. 11,1 kW Leistung zur Verfügung und jedes Fahrzeug hat einen eigenen Stromzugang. Da die Fahrzeuge teilweise auch für private Fahrten benutzt werden, geht die Annahme ein, dass die Fahrzeuge auch Zuhause

Tabelle 31: Anzahl an Unternehmen

		Unternehmensgröße (in Anzahl an Mitarbeitern)				Summe
		< 9	10 – 49	50 – 249	> 250	
Wirtschaftszweig	Gastgewerbe, Gesundheit, Erziehung	174	30	2	1	207
	Dienstleistungen (Finanzen, freiberuflich, wissenschaftlich)	185	10	0	9	204
	Baugewerbe, Energie, Bergbau	136	7	0	1	144
	Handel und verarbeitendes Gewerbe	444	9	0	0	453
	Verkehr	26	1	0	0	27
Summe		965	57	2	11	1035

Tabelle 32: Anzahl an Fahrzeuge

		Unternehmensgröße (in Anzahl an Mitarbeitern)				Summe
		< 9	10 – 49	50 – 249	> 250	
Wirtschaftszweig	Gastgewerbe, Gesundheit, Erziehung	402	176	36	9	623
	Dienstleistungen (Finanzen, freiberuflich, wissenschaftlich)	397	81	0	725	1203
	Baugewerbe, Energie, Bergbau	337	102	0	70	509
	Handel und verarbeitendes Gewerbe	1439	81	0	0	1520
	Verkehr	64	2	0	0	66
Summe		2639	442	36	804	3921

Tabelle 33: Parameter der Mobilitätsbewertung

Allgemeine Parameter		Ausprägungen
Austauschquote der Fahrzeuge		100 %
Anzahl Ladestationen am Unternehmensstandort und Zuhause (in Abhängigkeit der simulierten Fahrzeuge)		100 %
Leistung der Ladestationen Zuhause (des Fahrers)		3,7 kW
Verwendetes Fahrzeug		Think City
Parameter Szenario Infrastrukturbedarf		Ausprägungen
Leistung der Ladestationen am Unternehmensstandort		3,7 kW 11,1 kW
Saison		Sommer Winter (Verbrauch +20 %)
Ladesteuerung		Ungesteuert
Parameter Szenario Mobilitätsbewertung		Ausprägungen
Leistung der Ladestationen am Unternehmensstandort		11,1 kW
Saison		Sommer Winter (Verbrauch +20 %)
Ladesteuerung		Ungesteuert Gesteuert

mit 3,7 kW laden können. Insgesamt wird jeweils im Sommer und im Winter die Konfiguration der heimischen Ladestationen bewertet. Im Winter geht die Annahme in das Szenario ein, dass der Verbrauch der Fahrzeuge sich um 20 % erhöht.

Der zweite Satz an Simulationsläufen bewertet den Einfluss, den ein Steuerungsmechanismus (zur Erhöhung der Anteile an erneuerbaren Energien am Ladestrom) auf die Mobilitätsabdeckung der Nutzer hat. Dazu wird ebenfalls der Sommer und der Winter bewertet jeweils mit einer Ladeleistung von 11,1 kW für den ungesteuerten und den gesteuerten Fall. Der gesteuerte Lademechanismus (s. Abbildung 67) benötigt als Eingangsdaten nur die zu dem jeweiligen Zeitpunkt anliegende Last und PV-Einspeisung des Haushalts. Diese wird zu jedem Simulationszeitschritt (15 min) von *Mosaik* zur Verfügung gestellt. *Mosaik* rechnet die PV-Einspeisung zunächst dem Haushalt zu. Die verbleibende PV-Einspeisung wird der Ladestation bereitgestellt. Die Ladestation verhandelt mit dem

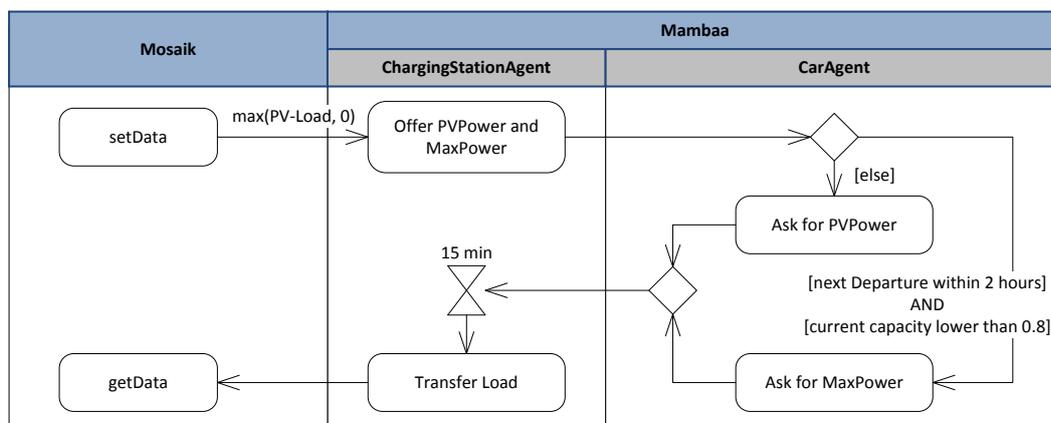


Abbildung 67 Gesteuerter Lademechanismus

Fahrzeug über die verwendete Ladeleistung entsprechend des in Abbildung 54 auf Seite 104 dargestellten Ablaufs (ChargingService). Während der Transferinitiierung wird die zur Verfügung stehende PV-Leistung und die maximale Leistung an das Fahrzeug übergeben. Dieses fragt die maximale Leistung nach, sofern sein Ladezustand unterhalb von 80 % liegt und die nächste Abfahrt innerhalb der nächsten zwei Stunden eingeplant ist. In allen anderen Fällen fragt das Fahrzeug die PV-Leistung ab. Die Antwort wird von der Ladestation entgegengenommen, die angeforderte Leistung dem Fahrzeug bereitgestellt und an *Mosaik* zurückgegeben. Im schlechtesten Fall reduziert dieser Ablauf die zur Verfügung stehende Kapazität des Fahrzeugs um 20 %, sofern keine PV-Leistung zur Verfügung steht. Die nachfolgenden Analysen zeigen, welchen Einfluss diese Reduktion der Kapazität auf die Mobilitätsabdeckung der Flotte hat.

Die Szenarien werden aus zwei Perspektiven bewertet. Zum einen werden die Ausfallquoten und zum anderen die durch Ladevorgänge verursachten Verspätungen analysiert. Im Falle der Verspätungen wird eine Referenzsimulation mit konventionellen Fahrzeugen durchgeführt, mit denen die oben dargestellten Szenarien verglichen werden. Da der Aktivitätsgenerierungsprozess probabilistisch ist und die Ankunftszeiten geschätzt werden, kann es auch bei konventionellen Fahrzeugen zu Verspätungen kommen. Der Referenzwert soll dazu dienen, den Effekt zu bewerten, dass ein Fahrzeug länger an der Heimstation stehen muss, um genügend Energie zu laden.

5.3.2 Analyse

Die Simulationsergebnisse zeigen auf, dass nicht der Tankvorgang das Problem der Nutzung von Elektrofahrzeugen darstellt, sondern vielmehr die geringe Reichweite der Fahrzeuge und die hohen Anforderungen der gewerblichen Mobilitätsmuster. Abbildung 68 zeigt die Ausfälle der Fahrzeuge getrennt nach Wirtschaftszweigen für den Sommer und den Winter. Besonders der Verkehrsbereich und das Gastgewerbe sind mit bis zu 66 % bzw. 33 % ausgefallener Fahrzeuge die Wirtschaftszweige, die den höchsten Widerstand bei der Adoption der Elektrofahrzeuge aufweisen. Dieser ist zum größten Teil den inkompatiblen Fahrtmustern zuzuschreiben, da weder der erhöhte Verbrauch im Winter noch eine erhöhte Ladeleistung einen signifikanten Einfluss auf die Ausfallquote haben. Die maximale Ausfallquote des Verkehrsbereichs ist im Sommer lediglich 3 % niedriger als im Winter, und die Erhöhung der Ladeleistung auf 11,1 kW am Flottenstützpunkt führt zu einer Verringerung der Ausfallquote von ca. 12 % im Sommer und ca 9 % im Winter. Der Handel stellt hierbei die Ausnahme dar. Hier führt die Erhöhung der Ladeleistung zu einer Halbierung der Ausfallquote im Sommer.

Neben den Ausfällen wurden die Verspätungen untersucht, die durch die Ladevorgänge im Vergleich zu den konventionellen Fahrzeugen entstehen (s. Abbildung 69). Je nach

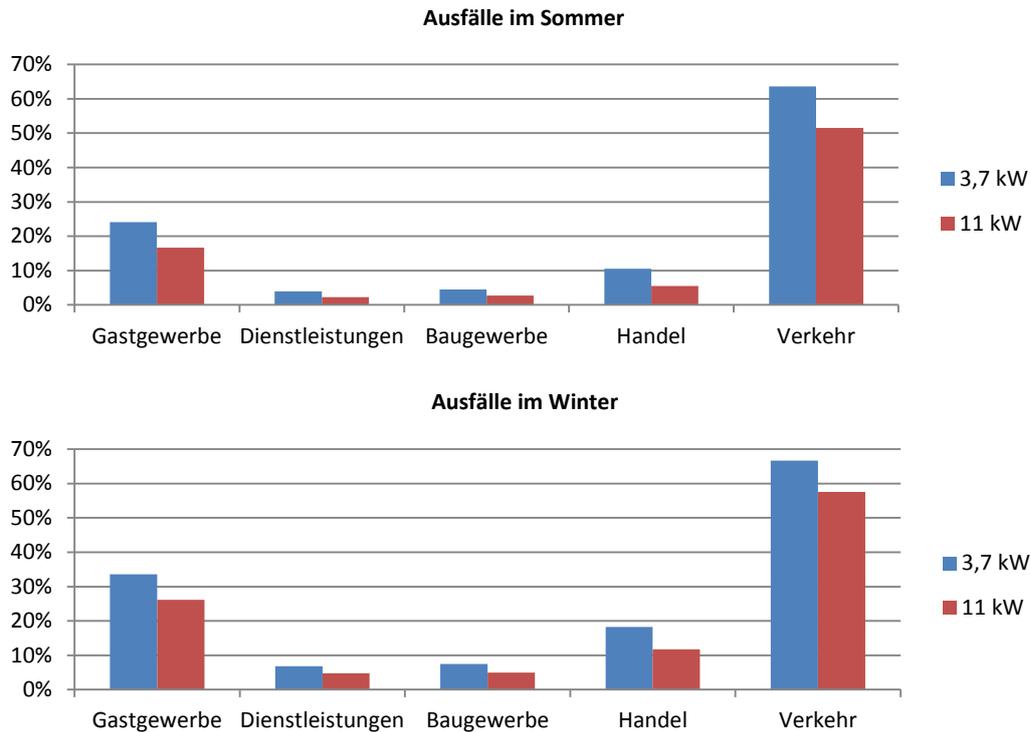


Abbildung 68 Ausfallquoten im Sommer und im Winter

Wirtschaftszweig ergeben sich unterschiedliche zusätzliche Verspätungen durch die Ladevorgänge.¹⁴ Diese liegen im Mittel im Sommer 1,6 % bzw. im Winter 2,85 % höher als im Referenzszenario. Eine Erhöhung der Ladeleistung am Heimpladepunkt hat im Sommer keinen Einfluss auf diese Verspätungen, während im Winter die Verspätungen (bis auf den Verkehrsbereich) bis zu 50 % reduziert werden können. Generell lässt sich jedoch festhalten, dass sich die Verspätungen aufgrund ihrer absoluten Höhe nicht auf die Integration der Elektrofahrzeuge in die gewerbliche Flotten auswirken. Die maximale absolute mittlere Verspätung beträgt lediglich 14 Sekunden. Demnach besuchen die nicht ausfallenden Fahrzeuge häufig genug einen Ladepunkt und bleiben dort ausreichend lange stehen, um die Batterie zu laden.

Der Einfluss des oben dargestellten Lademechanismus auf die mittlere Ausfallquote und die mittlere Verspätung ist in Abbildung 70 abgebildet. Die Ausfälle erhöhen sich nur marginal. Im Sommer erhöhen sich die Ausfälle um 0,4 % und für den Winter um 1,3 %. Die Erhöhungen der mittleren Verspätung machen sich ebenfalls kaum bemerkbar. Für den Sommer erhöht sie sich im Mittel um 0,25 % und für den Winter um 0,63 %. Das

¹⁴ Um eine Vergleichbarkeit der betrachteten Szenarien zum Referenzszenario zu erreichen, wurden nur Fahrzeuge betrachtet, die nicht ausgefallen sind.

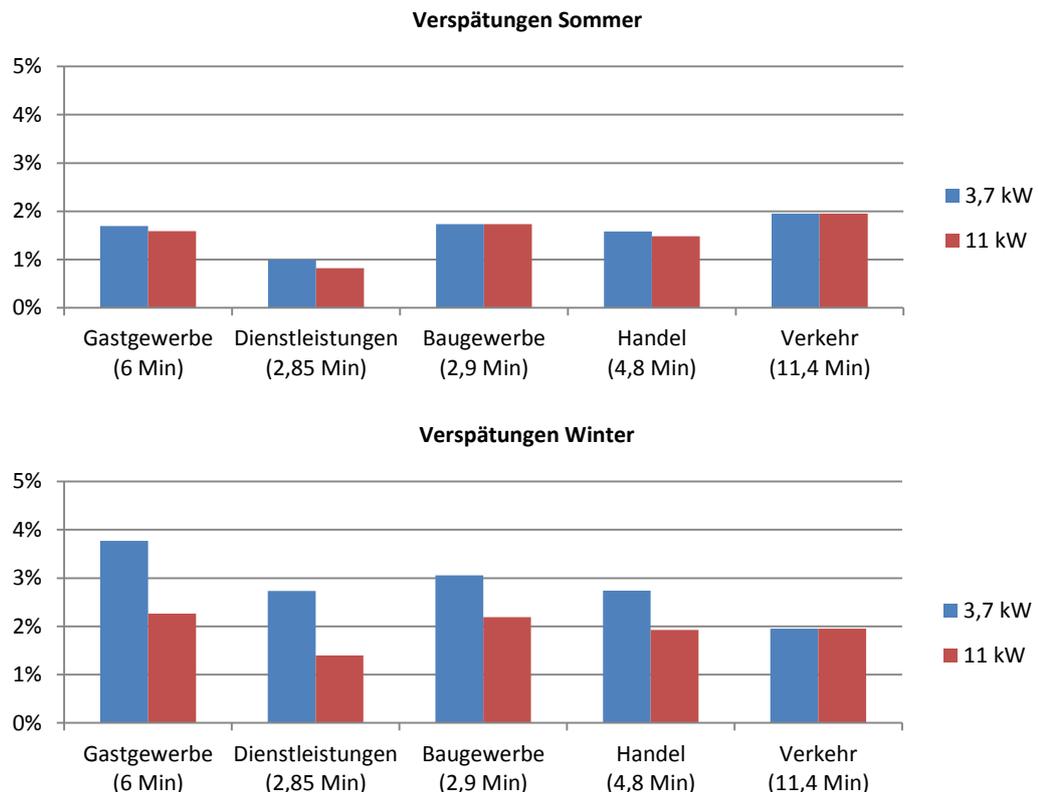


Abbildung 69 Erhöhte Verspätungen der Elektrofahrzeuge im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen (in %) getrennt nach Sommer und Winter und getrennt nach Wirtschaftszweigen (die Werte in den Klammern spiegeln die absoluten Referenzwerte für den jeweiligen Wirtschaftszweig wider)

bedeutet eine Erhöhung von 1,6 Sekunden pro Fahrt (im Winter). Insgesamt hat der Lademechanismus einen sehr geringen negativen Effekt auf die Mobilitätsabdeckung der Flotten. Trotz der drohenden Reduzierung der Kapazität um 20 % können die Fahrzeuge ihre vordefinierten Fahrten absolvieren. Der positive Effekt des Lademechanismus kann der Abbildung 71 entnommen werden. Sie stellt den Ladeverlauf einer ausgewählten Flotte dar. Wie zu erkennen ist, entstehen bei dem ungesteuerten Laden hohe und kurze Lastspitzen, die die Gesamtlast ins Positive schieben. Es wird Strom aus dem Netz bezogen, obwohl in den nächsten Stunden ausreichend PV-Leistung zur Verfügung stünde. Bei dem gesteuerten Ladevorgang reduziert sich die Spitzenlast von 10 kW auf 3,1 kW. Zudem wird die gesamte Last während des Ladevorgangs auf etwa ± 0 gehalten, d. h. sämtliche über die Haushaltslast anfallende PV-Leistung wurde durch das Fahrzeug aufgenommen und hat somit den Anteil der erneuerbar erzeugten Energie im Fahrzeug deutlich erhöht. Durch Anwendung des einfach zu implementierenden Lademechanismus konnte der Anteil an erneuerbaren Energien beim Ladestrom bei einzelnen Flotten verdreifacht werden. Zudem konnten die durch die Elektrofahrzeuge verursachten Lastspitzen um fast 50 % reduziert werden [Buchmann (2014)].

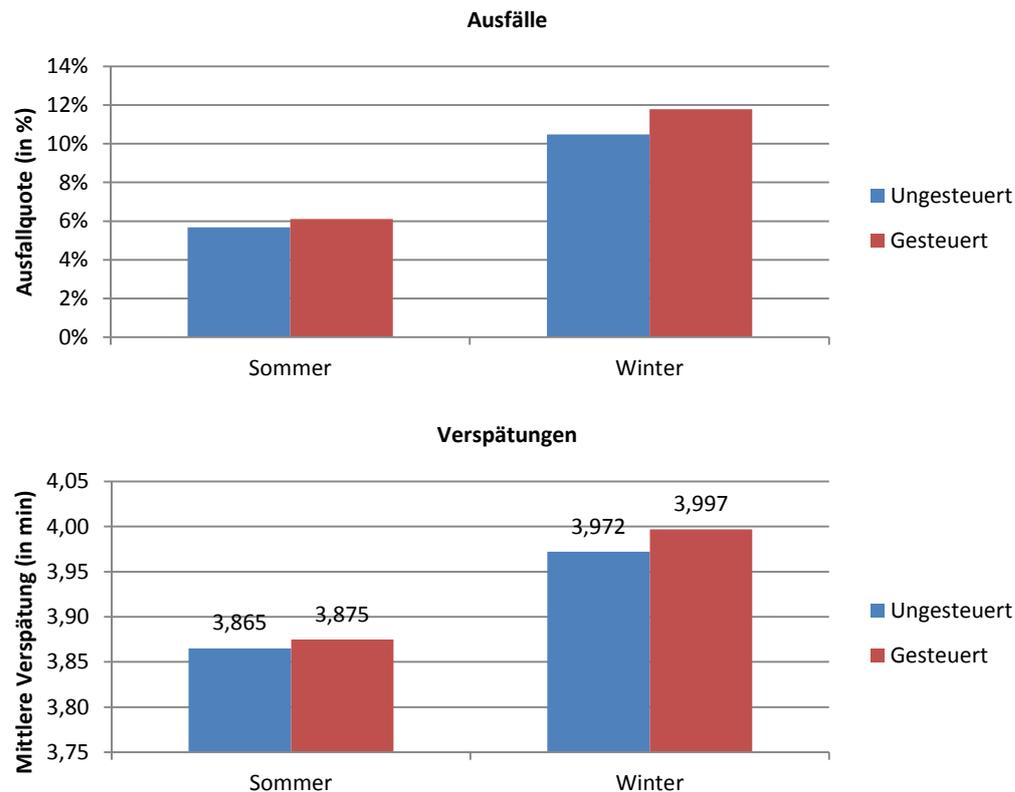


Abbildung 70 Ausfälle und mittlere Verspätungen mit und ohne Ladesteuerungsmechanismus

Zusammenfassung

Das in diesem Abschnitt behandelte Flottenszenario hat folgende Ergebnisse hervorgebracht:

- Trotz des Extenszenarios sind zwischen 33 % (Verkehr) und 93 % (Dienstleistungen) der Fahrzeuge ohne Adaption des Verhaltens austauschbar.
- Verspätungen stellen kein Problem dar, d. h. die Fahrzeuge die ausgetauscht werden konnten, waren nur marginal verspätet.
- Eine Erhöhung der Ladeleistung am Heimpladepunkt hat einen vergleichsweise geringen Einfluss
- Der hier dargestellte Ladesteuerungsmechanismus hat einen geringen Effekt auf die Möglichkeit der Nutzer die Fahrzeuge zu nutzen und führt zu einer signifikanten Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energien am Ladestrom.

Der folgende Abschnitt diskutiert anhand der beiden hier durchgeführten Fallbeispiele die Erfüllung der Anforderungen und der Ziele dieser Arbeit.

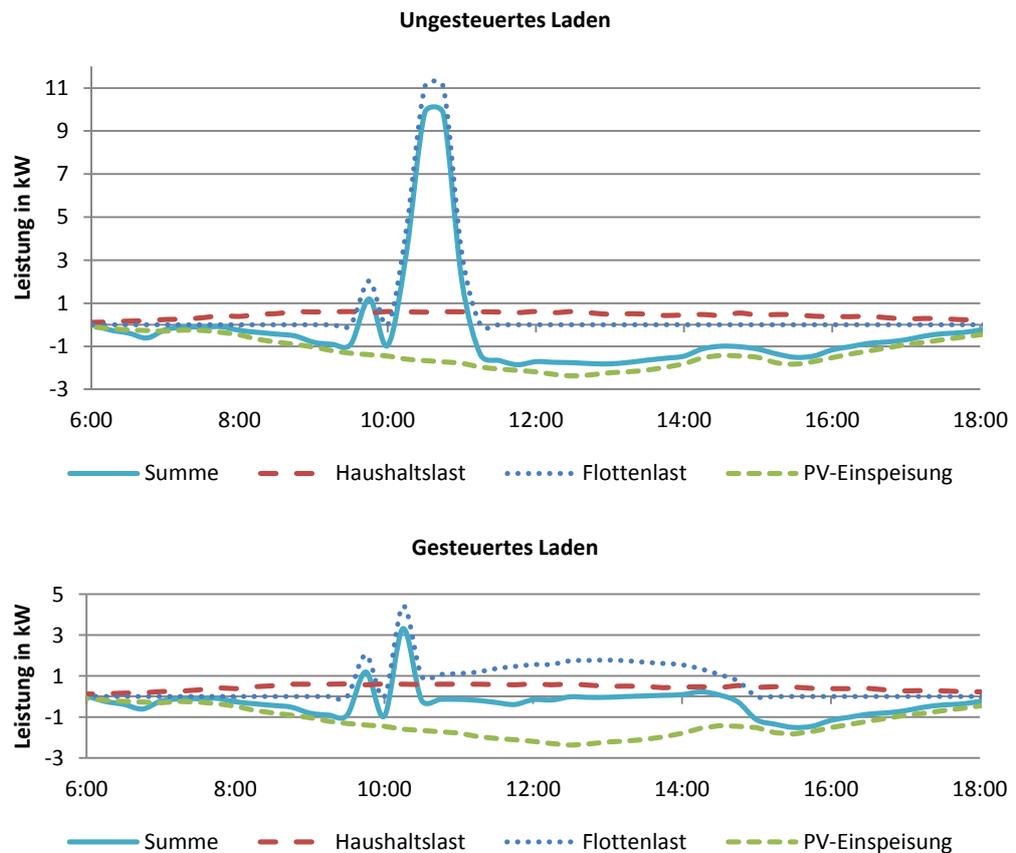


Abbildung 71 Effekt des kontrollierten und unkontrollierten Ladens

5.4 Evaluationsbewertung

Dieser Abschnitt fasst die Erkenntnisse aus den drei vorangegangenen Abschnitten zusammen. Insbesondere wird der Erfüllungsgrad der Anforderungen dieser Arbeit diskutiert. Zusätzlich werden einige Probleme behandelt, die während der Simulationsläufe aufgetreten sind.

Die oben dargestellten Szenarien hatten das Ziel die praktische Anwendung des Bewertungswerkzeuges *Mambaa* aufzuzeigen. Entlang der Modellkonfiguration und der Szenariodurchführung konnten die Anforderungen wie folgt adressiert werden:

A 1 – Nutzer und Nutzergruppen Die beiden Fallbeispiele haben gezeigt, dass das Mobilitätsmodell flexibel genug ist, sowohl das Mobilitätsverhalten von privaten als auch gewerblichen Nutzern abzubilden. Das Modell wurde erfolgreich genutzt, um mehrere Subgruppen zu bilden und die Adoptionsmöglichkeit dieser Nutzergruppen zu bewerten. Die Anforderung ist somit erfüllt.

A 2 – Haushaltsstandorte, A 5 – Strukturdaten und A 12 – Datenintegration Die Haushaltsstandorte sowie die Strukturdaten der Region konnten erfolgreich aus den öffentlichen Statistiken übernommen werden. Dabei war es möglich unter Verwendung des IPF-Verfahrens die Darstellungseinheit der Zonen auf Gemeindeebene zu reduzieren, obwohl diese Ebene für eine räumliche Analyse immer noch recht grob ist im Gegensatz zu anderen Untersuchungen, die auf einen weitreichenderen Datensatz zurückgreifen konnten [Balmer et al. (2006); Xi und Sioshansi (2012); Veldhuisen et al. (2000)]. Dennoch war es eine Anforderung auf diese Daten zurückgreifen zu können und die höchst mögliche Auflösung zu erreichen. Dieses wurde erfolgreich demonstriert.

A 3 – Aktivitätsgestaltung und A 12 – Datenintegration Die beiden Mobilitätsstudien Mid2008 und KiD2010 wurden verwendet, um die Mobilitätsmuster der Nutzer in der Metropolregion Bremen/Oldenburg zu beschreiben. Die Simulationen wurden jeweils über eine Woche durchgeführt und haben so gezeigt, dass mehrtägige zusammenhängende Aktivitätsketten generiert werden können. Die Validierung hat bewiesen, dass diese Aktivitätsketten repräsentativ sind. Der Aktivitätsgenerierungsprozess nutzt diese, um realitätsnahe Fahrtketten zu erstellen. Die Anforderung ist erfüllt. Es ist jedoch zu beachten, dass einzelne Nutzergruppen nicht vollständig durch das Modell beschrieben werden konnten. Die Ursache wurde in der durch die öffentlichen Statistik vorgegebenen Gruppenzusammensetzung ermittelt. Diese führt zu Gruppen, die in sich ein heterogenes Mobilitätsverhalten aufweisen. Diese Heterogenität wurde auch in das Modell mit übernommen.

A 4 – Operative Kennzahlen Zur Auswertung der beiden Fallbeispiele wurden operative Kennzahlen integriert. Es war ohne Probleme möglich, die in Hoerstedt und Hahn (2012) identifizierten operativen Kennzahlen zu integrieren. Die Anforderung ist erfüllt.

A 6 – Verkehrsnetz Das Verkehrsnetz wurde erfolgreich aus OpenStreetMap importiert. Die Datenqualität hat sich besonders bei der Geschwindigkeitsbestimmung als lückenhaft herausgestellt und wurde durch das Freeware-Werkzeug osm2po beim Import geschätzt. Die Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass die Geschwindigkeit keinen Effekt auf die Ergebnishöhe hatte. Die Anforderung ist erfüllt.

A 7 – Verbrauch Das technische Modell zeigt, dass unterschiedliche Verbrauchsverläufe in das Modell integriert werden können. Standardmäßig sind zwei Verbrauchsfunktionen vorgegeben: eine lineare Funktion in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und eine polynomiale Funktion mit zusätzlicher Berücksichtigung des Luft- und Rollwiderstandes. Die Modellierung hat sich als geeignet erwiesen, die in der Modellregion durch Flottenversuche ermittelten Durchschnittsverbräuche abzubilden. Allerdings hat die Sensitivitätsanalyse auch gezeigt, dass das Ergebnis sensitiv auf die Erhöhung dieses Verbrauchs reagiert. Hier sind weitere Untersuchungen durchzuführen, ob die Verbräuche auf einer

detaillierteren Ebene bestätigt werden können. Dennoch haben die Beispiele gezeigt, dass unterschiedliche Verbrauchsmodellierungen möglich sind. Die Anforderung ist erfüllt.

A 8 – Kapazität Die Kapazität wurde in den Szenarien fest vorgegeben. Eine Modellierung der Kapazität in Abhängigkeit von unterschiedlichen Umweltbedingungen wurde mangels verfügbarer Batteriemodelle nicht durchgeführt. Da die Batterie aber denselben Prinzipien folgt wie der Verbrauch des Fahrzeugs, kann angenommen werden, dass die geforderten Modellierungsmöglichkeiten (z. B. Memory-Effekt) integriert werden können. Die Anforderungserfüllung konnte nicht bestätigt werden.

A 9 – Technische Lösung In den Szenarien wurden Ladestationen mit unterschiedlichen Ladeleistungen modelliert und bewertet. Die geforderte Flexibilität wurde allerdings nicht in den Szenarien adressiert (z. B. Induktionsschleifen oder Batteriewechselstationen). Durch die Verwendung der unterschiedlichen Abstraktionsschichten der Modelle, ist zu vermuten, dass diese Umsetzung durchführbar ist. Dennoch kann die Erfüllung der Anforderung nicht bestätigt werden.

A 10 – Zugang Die Zugangsrestriktionen für Ladestationen wurden analog zu den Ausführungen in Abschnitt 4.1.2.3 modelliert. Dadurch war es den Fahrzeugen in den Szenarien nur möglich an den zuvor definierten Ladestationen zu laden. Die Anforderung ist erfüllt.

A 11 – Kommunikation Der gesteuerte Lademechanismus aus dem Szenario *Gewerbliche Flottenanwendung* hat gezeigt, wie die Kommunikation von Fahrzeug und Ladeinfrastruktur bzw. von Ladeinfrastruktur mit externen Simulationen und Modellen abgebildet werden kann, um Steuerungsmechanismen zu evaluieren. Die straffe Trennung der Agenten in *Mambaa* bietet die Möglichkeiten, Ziele der einzelnen Elemente individuell und unabhängig zu modellieren. Die Anforderung ist erfüllt.

A 13 – Erweiterbarkeit Im Zuge des Szenario *Gewerbliche Flottenanwendung* wurde *Mambaa* erfolgreich mit dem Co-Simulationsframework *Mosaic* gekoppelt. Die Multi-Agenten-Simulation konnte erweitert werden, um sich an die extern vorgegebenen Simulationsschritte anzupassen. Des Weiteren war es möglich den gesteuerten Lademechanismus erfolgreich zu integrieren. Die Anforderung ist erfüllt.

Die Auswertung ergibt, dass der Großteil der Anforderungen erfüllt wurde. Einige Anforderungen konnten nicht untersucht werden, da die Projekte diese Überprüfung nicht vorsahen. Dennoch hat das entwickelte Framework gezeigt, flexibel auf unterschiedliche Fragestellungen anwendbar zu sein. Problematisch hinsichtlich der Ausführungszeiten hat sich während der Untersuchung allerdings die Skalierung der Szenarien ergeben. Diese sind auf folgende Aspekte zurückzuführen:

1. Da die Agenten in der Multi-Agenten-Simulation durch Behaviours agieren und durch Nachrichten miteinander kommunizieren, entsteht durch das Hinzufügen eines Agenten ein Vielfaches an Behaviours und Kommunikationsabläufen. Dieser Overhead skaliert linear mit einer Steigung größer als eins.
2. Die Anzahl an wartenden Threads steigt, was bei groß skalierten Szenarien die Grenze des Threadpools sprengen kann.
3. Die Fahrzeuge suchen online ihre Routen. Diese Operationen führen zu langen Ausführungszeiten.

Aus diesem Grund wurden folgende Maßnahmen identifiziert, die für eine Verbesserung der Skalierung und damit der Durchlaufzeiten der Simulation führen:

Kombination von dezentraler und zentraler Steuerung Der aktuelle Stand der Multi-Agenten-Simulation ist komplett dezentral aufgebaut. Das führt zu dem oben erwähnten Overhead. Aus diesem Grund sollten zentrale Mechanismen in die Simulation integriert werden, die z. B. die Vergabe von Ladestationen übernehmen. Wenn es für das Szenario nicht relevant ist, kann das Wissen über die Positionen der Ladestationen in die Fahrzeuge übertragen werden. Dadurch entfallen die Anfragen an den `DirectorySystemAgent`.

Direkter Zugriff Die Kommunikationsmodellierung hat zwar den Vorteil, dass jeder Agent autark und ohne Fremdbestimmung handeln kann, führt allerdings zu den oben genannten Problemen. Daher sollte an den für das Szenario nicht relevanten Stellen ein direkter Zugriff auf die Agenten möglich sein. So können z. B. die `ContractNets` verschlankt werden, indem die Ladestation direkt auf den `fuelManager` des Fahrzeugs zugreifen kann. Unnötige Kommunikationsprozesse und wartende Threads können so vermindert werden

Vorgelagertes Routing Der Vorteil des Routings während der Simulation ist die Reaktionsfähigkeit des Agenten auf sich ändernde Umwelteinflüsse. Dem erhöhten Aufwand bei der Routenfindung sollte durch ein vorgelagertes Routing, wie es z. B. bei SUMO oder bei MATSim geschieht, begegnet werden. Da Abweichungen vom Tagesplan nur selten geschehen, sollte ein erneutes Routing nur in solchen Fällen passieren.

Wie schon beschrieben, sind diese Maßnahmen auf die Ziele und den Anwendungskontext des Szenarios anzupassen. Ein direkter Zugriff durch die Ladestation auf das Fahrzeug hätte bspw. die Möglichkeit des gesteuerten Lademechanismus aus dem *Szenario Gewerbliche Flottenanwendung* verhindert.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass das hier entwickelte Bewertungswerkzeug *Mambaa* dazu geeignet ist, die räumliche und zeitliche differenzierte Nutzermobilität darzustellen (Z 1 – Räumlich und zeitlich differenzierte Betrachtung) und diese anhand der von öffentlichen Statistiken zu bestimmen (Z 2 – Integration von privaten Haus-

halten und Unternehmen). *Mambaa* wurde genutzt, um unterschiedliche Ladestationskonfigurationen im privaten und gewerblichen Bereich zu untersuchen und zu bewerten (Z 3 – Ladeinfrastrukturbewertung). Der Effekt eines gesteuerten Lademechanismus auf die Adoptionsmöglichkeit der Nutzer wurde in dem Szenario *Gewerbliche Flottenanwendung* erörtert (Z 4 – Berücksichtigung von Technologieeffekten). Insgesamt wurde die Adoptionsmöglichkeit von unterschiedlichen privaten und gewerblichen Nutzergruppen in der Metropolregion Bremen/Oldenburg unter gegebenen Fahrzeug- und Ladeinfrastruktureigenschaften bewertet. Damit konnte die Arbeit die Ziele aus Abschnitt 1.2 erfüllen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Unsicherheit über mögliche technologische Entwicklungen im Bereich der Elektromobilität verhindert eine kurzfristige Durchdringung des Marktes mit der neuen Technologie und verzögert das Erreichen der damit verbundenen (umweltpolitischen) Ziele. Mehrere in dem System Elektromobilität involvierte Interessensgruppen stehen vor strategischen Entscheidungen, ob und wie sie sich in das System einbringen. Diese Entscheidungsfindung ist im Großteil der Fälle abhängig von den Möglichkeiten und Entscheidungen der Nutzer. Die Arbeit verfolgte das Ziel, das System Elektromobilität aus mehreren Perspektiven operativ analysieren zu können und so Wege aus den Pattsituationen zu finden, in denen sich manche Interessensgruppen befinden. Dazu wurde ein modellbasierter Ansatz entwickelt, mit dem diese nutzerseitige Adoptionsmöglichkeit von Elektrofahrzeugen bewertet werden kann. Die folgenden Abschnitte fassen den Beitrag dieser Arbeit zusammen und zeigen mögliche Ansatzpunkte für weiterführende Entwicklungen auf.

6.1 Zusammenfassung

Für eine umfassende Bewertung der nutzerseitigen Adoptionsmöglichkeit von Elektrofahrzeugen wurden vier Einflussfaktoren identifiziert, die ein Bewertungswerkzeug adressieren muss: Mobilitätsbedarf des Nutzers, technologische Rahmenbedingungen der Elektrofahrzeuge und der Ladeinfrastruktur sowie der regionale Kontext in denen diese eingebettet sind. Kapitel 2 untersuchte Ansätze, die sich auf die Bewertung der Ladeinfrastruktur und der Abdeckung von Nutzernachfrage nach Energie konzentrieren und analysierte deren Fähigkeit die vier identifizierten Einflussfaktoren abzubilden. Die Auswertungen haben ergeben, dass jeder der existierenden Ansätze einen oder mehrere dieser Einflussfaktoren (insb. die Mobilitätsabbildung) vernachlässigte. Den höchsten Abdeckungsgrad wiesen die Ansätze auf, die Simulationswerkzeuge aus der Verkehrsforschung verwenden.

Von den vier Einflussfaktoren stellte sich die Abbildung des Nutzerverhaltens und dessen räumlicher Verteilung als größte Herausforderung heraus. Das Kapitel 3 beleuchtete daher Modelle aus der Verkehrsforschung, die sich mit dem Problem bereits auseinandersetzen. Die Analysen ergaben, dass sich die aktivitätsbasierte Darstellung als geeignet herausstellt, die notwendige räumliche und zeitliche Auflösung zu erreichen, um die Adoptionsmöglichkeit der Nutzer und die Effizienz der Ladeinfrastruktur bewerten zu können. Insbesondere lag der Vorteil darin, mehrtägige und durchgängige Fahrtketten ermitteln zu können. Des Weiteren wurden die Verkehrssimulationen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für die Zielsetzung dieser Arbeit untersucht. Problematisch hat sich deren Fokus auf den Privatverkehr und auf die Bewertung der Verkehrsinfrastruktur erwiesen.

Darüber hinaus konnte kein Framework die geforderte Auflösung der Nutzermobilität *und* das individuelle Verhalten *während* der Simulation erfüllen.

Die Erkenntnisse der Kapitel 2 und 3 mündeten in einem Konzept, das diese Lücken geschlossen hat. Zentrale Komponenten sind ein Planungsmodell, das die vier Einflussfaktoren geeignet abbildet und eine Multi-Agenten-Simulation, die dieses Modell integrieren und ausführen kann, um spezielle Szenarien zu bewerten. Beide Komponenten sind dabei in mehrere Abstraktionsschichten untergliedert, um die einfache Erweiterbarkeit und Wiederverwendbarkeit zu ermöglichen. Das entstandene Framework konzentriert sich insbesondere auf die Abbildung der Verhaltensmöglichkeiten des Nutzers und die Interaktion mit den Elementen seiner Umwelt (z. B. Ladestationen).

Kapitel 5 bestätigte die Anwendbarkeit des in Kapitel 4 entwickelten Frameworks, indem es auf zwei konkrete Fallbeispiele in der Metropolregion Bremen/Oldenburg angewandt wurde. Diese befassten sich mit der notwendigen Ausbringung von Ladestationen am Arbeitsplatz eines Gewerbegebietes in Bremen und der Anwendbarkeit von Elektrofahrzeugen im gewerblichen Flotteneinsatz. Insgesamt wurde verifiziert, dass das Framework die Anforderungen dieser Arbeit erfüllt. Insbesondere das zweite Beispiel hat die Erweiterbarkeit und die Flexibilität des Frameworks aufgezeigt.

Zusammenfassend ist in dieser Arbeit ein Modell und ein Bewertungswerkzeug entstanden, das sowohl auf die Metropolregion Bremen/Oldenburg als auch auf die Elektromobilität kalibriert ist. Dieses Werkzeug ermöglicht die räumlich und zeitlich aufgelöste Analyse der Nutzer- und Technologieeffekte und kann so verwendet werden, um strategische Entscheidungen in dem Bereich Elektromobilität für die Region zu erleichtern. Bei der Evaluation haben sich darüber hinaus diverse Ansatzpunkte ergeben, die zu einer weiteren Verbesserung des Werkzeugs führen könnten.

6.2 Ausblick

Die Evaluation hat bestätigt, dass *Mambaa* geeignet ist, die Ziele und Anforderungen dieser Arbeit zu erfüllen. Dennoch haben sich laufzeit- und modellbezogene Erweiterungspotenziale ergeben, die im folgenden aufgezeigt werden.

Detaillierungsgrad Die Analysen in Kapitel 5 haben ergeben, dass die aus den öffentlich zugänglichen Daten ermittelten Mobilitätsmuster eine sehr geringe Auflösung bereitstellen. Die gemeindebezogene Zonendarstellung und die vorgegebene Einteilung der Nutzer führen zu heterogenen Gruppen und zu einer sehr groben Aktivitätsverortung. Die Integration hoch aufgelöster Daten, wie sie offensichtlich anderen Ländern wie den Niederlanden [Veldhuisen et al. (2000)], der Schweiz [Balmer (2007)] und den USA [Xi und Sioshansi (2012)] zur Verfügung stehen, würde hier einen Beitrag leisten, die Analyse-

schärfe zu verbessern. Des Weiteren wäre zu überprüfen, ob eine Erhöhung des Modellierungsdetails zu einer signifikanten Abweichung der Ergebnisse führen würde.

Dezentralität vs. Zentralität Die strikte dezentrale Modellierung der Agenten und deren Interaktionen führt zu einem sehr flexiblen Framework, das individuell auf Szenarien und deren Fragestellungen adaptiert werden kann. Diese Anpassungsfähigkeit geht jedoch zu Lasten der Skalierbarkeit des Systems (s. Abschnitt 5.4). Ansatzpunkt für zukünftige Forschungen wäre demnach, geeignete Mechanismen zu entwickeln, die für das Szenario unwichtige Entscheidungsverhalten der Agenten zentral bündelt und unnötige Kommunikationsflüsse vermindert. Diese Bündelung sollte jedoch flexibel durchgeführt werden können, um die Erweiterbarkeit und Flexibilität nicht zu gefährden.

Übertragbarkeit Nicht nur der motorisierte Straßenverkehr steht vor einem Wechsel von konventionellen zu nachhaltigen Technologien und Kraftstoffen. Im maritimen Sektor bspw. wird die Einführung von Flüssigerdgas (Liquified Natural Gas (LNG)) als alternativen Kraftstoff zum schadstoffbelasteten Schweröl diskutiert. Auch in dieser Domäne befinden sich Infrastrukturbetreiber und Nutzer (Reedereien) in einer Pattsituation, wer den ersten Schritt in die neue Technologie machen sollte. Hier könnte der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz helfen, potenzielle LNG-Infrastrukturen zu bewerten und so Wege aus dieser Situation aufzuzeigen. Ein erster Ansatz wurde bereits in Hoerstebroek et al. (2012a) entwickelt. Forschungen in diesem Bereich werden jedoch mit einer im Vergleich zu dieser Arbeit noch schlechteren Datenlage konfrontiert.

7 Literaturverzeichnis

- ACATECH - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2010): Wie Deutschland zum Leitanbieter für Elektromobilität werden kann. Status Quo - Herausforderungen - offene Fragen. Berlin: Springer (Acatech bezieht Position, 6).
- Achtnicht, Martin; Bühler, Georg; Hermeling, Claudia (2008): Impact of service station networks on purchase decisions of alternative-fuel vehicles. Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH (ZEW). Mannheim (Discussion Paper No. 08-088). Online verfügbar unter <ftp://ftp.zew.de/pub/zew-docs/dp/dp08088.pdf>, zuletzt geprüft am 21.06.2012.
- Adler, Jeffrey L.; Blue, Victor J. (2002): A cooperative multi-agent transportation management and route guidance system. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 10 (5-6), S. 433–454. DOI: 10.1016/S0968-090X(02)00030-X.
- AIMSUN (2011). Online verfügbar unter <http://www.aimsun.com/wp/>, zuletzt aktualisiert am 2011, zuletzt geprüft am 15.12.2011.
- Arentze, Theo A.; Timmermans, Harry J. P. (2004): A learning-based transportation oriented simulation system. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 38 (7), S. 613–633. DOI: 10.1016/j.trb.2002.10.001.
- Argonne National Laboratory (2014): Repast. Online verfügbar unter <http://repast.sourceforge.net/>, zuletzt geprüft am 25.04.2014.
- Arnold, Hansjörg; Kuhnert, Felix; Kurtz, Ralf; Bauer, Wilhelm (2010): Elektromobilität. Herausforderungen für Industrie und öffentliche Hand. PwC - Pricewaterhouse-Coopers; IAO - Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, zuletzt geprüft am 23.11.2011.
- Atlas - ATLAS Elektronik Group (2013): Company Info. Online verfügbar unter <http://www.atlas-elektronik.com/company-info/>, zuletzt aktualisiert am 29.10.2013, zuletzt geprüft am 23.03.2014.
- Auld, Joshua; Mohammadian, Abolfazl (2010): Efficient Methodology for Generating Synthetic Populations with Multiple Control Levels. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2175 (-1), S. 138–147. DOI: 10.3141/2175-16.
- Balmer, Michael (2007): Travel demand modeling for multi-agent transport simulations. Dissertation. ETH Zürich, Zürich. Online verfügbar unter <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:29803/eth-29803-02.pdf>.
- Balmer, Michael; Axhausen, Kay; Nagel, Kai (2006): Agent-Based Demand-Modeling Framework for Large-Scale Microsimulations. In: *Transportation Research Record* 1985 (1), S. 125–134. DOI: 10.3141/1985-14.
- Balmer, Michael; Meister, Konrad; Waraich, Rashid A.; Horni, Andreas; Ciari, Francesco; Axhausen, Kay W. (2010): Agenten-basierte Simulation für location based services: Schlussbericht KTI 8443.1 ESPP-ES. Zürich.
- Balmer, Michael; Rieser, Marcel; Meister, Konrad; Charypar, David; Lefebvre, Nicholas; Nagel, Kai (2009): MATSim-T: Architecture and Simulation Times. In: Ana L. C. Bazzan und Franziska Klügl (Hg.): Multi-agent systems for traffic and transportation engineering. Hershey, PA: Information Science Reference, S. 57–78.

- Bapna, Ravi; Thakur, Lakshman S.; Nair, Suresh K. (2002): Infrastructure development for conversion to environmentally friendly fuel. In: *European Journal of Operational Research* 142 (3), S. 480–496. DOI: 10.1016/S0377-2217(01)00309-5.
- Barceló, J.; Ferrer, J. L.; García, D.; Grau, R.; Forian, M.; Chabini, I.; Le Saux, E. (1998): Microscopic traffic simulation for att systems analysis. a parallel computing version. Contribution to the 25th Aniversary of CRT.
- Beckman, Richard J.; Baggerly, Keith A.; McKay, Michael D. (1996): Creating synthetic baseline populations. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 30 (6), S. 415–429. DOI: 10.1016/0965-8564(96)00004-3.
- Beckmann, K.-J.; Brüggemann, Ulrike; Gräfe, Jürgen; Huber, Felix; Meiners, Hans; Mieth, Peter et al. (2007): ILUMASS - Integrated Land-Use-Modelling and Transportation System Simulation. Endbericht. DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. Berlin. Online verfügbar unter http://www.spiekermann-wegener.com/pro/pdf/ILUMASS_Endbericht.pdf, zuletzt geprüft am 19.11.2012.
- Bellifemine, Fabio; Caire, Giovanni (2008): Developing multi-agent systems with JADE. Chichester: Wiley.
- Ben-Akiva, Moshe; Bierlaire, Michel; Koutsopoulos, Haris; Mishalani, Rabi (1998): DynaMIT: a simulation-based system for traffic prediction. DACCORD Short Term Forecasting Workshop. Delft, The Netherlands.
- Berman, Oded; Larson, Richard C.; Fouska, Nikoletta (1992): Optimal Location of Discretionary Service Facilities. In: *Transportation Science* 26 (3), S. 201–211.
- Bhat, Chandra R.; Guo, Jessica Y.; Srinivasan, Sivaramakrishnan; Sivakumar, Aruna (2003a): Activity-Based Travel Demand Modeling for Metropolitan Areas in Texas: Software-related Processes and Mechanisms for the Activity-Travel Pattern Generation Micro-simulator (Research Report 4080-5).
- Bhat, Chandra R.; Guo, Jessica Y.; Srinivasan, Sivaramakrishnan; Sivakumar, Aruna (2003b): Guidebook on Activity-Based Travel Demand Modeling for Planners. Product 4080-P3, prepared for the Texas Department of Transportation.
- Bhat, Chandra R.; Guo, Jessica Y.; Srinivasan, Sivaramakrishnan; Sivakumar, Aruna (2004): A Comprehensive Econometric Micro-simulator for Daily Activity-travel Patterns (CEMDAP). In: *Transportation Research Record* (1894), S. 57–66.
- Bhat, Chandra R.; Koppelman, Frank S. (1993): A conceptual framework of individual activity program generation. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 27 (6), S. 433–446. DOI: 10.1016/0965-8564(93)90050-U.
- BMVI - Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2014): Elektromobilität-Modellregionen Elektromobilität. Online verfügbar unter <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/UI/modellregionen-elektromobilitaet.html?nn=36210>, zuletzt geprüft am 25.04.2014.
- Botsford, Charles; Szczepanek, Adam (2009): Fast Charging vs. Slow Charging: Pros and cons for the New Age of Electric Vehicles. In: Electric Vehicle Symposium 24. 13.-16. Mai 2009. Starvanger, Norwegen. Online verfügbar unter <http://www.cars21.com/assets/link/EVS-24-3960315%20Botsford.pdf>, zuletzt geprüft am 29.06.2012.

- Bowman, John L. (1998): The Day Activity Schedule Approach to Travel Demand Analysis. PHD-Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Boston, Mass. Department of Civil and Environmental Engineering.
- Buchmann, Marius (2014): Projekt NeMoLand Abschlussbericht AP 3.2: Energie- und Energieinfrastruktur. IFAM - Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung. Bremen (Forthcoming).
- Capar, Ismail; Kuby, Michael (2012): An efficient formulation of the flow refueling location model for alternative-fuel stations. In: *IIE Transactions* 44 (8), S. 622–636. DOI: 10.1080/0740817X.2011.635175.
- Casceta, E.; Nuzzolo, A.; Russo, F.; Vitetta, A. (1996): A modified logit route choice model overcoming path overlapping problems. In: Jean-Baptiste Lesort (Hg.): Transportation and traffic theory. Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Lyon, France, 24-26 July, 1996. 1st ed. Oxford, Tarrytown, N.Y., U.S.A: Pergamon.
- CCL - Center for Connected Learning (2014): NetLogo. Northwestern University. Online verfügbar unter <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/index.shtml>, zuletzt geprüft am 25.04.2014.
- Chan, Tat Y.; Padmanabhan, V.; Seetharaman, P. B. (2007): An Econometric Model of Location and Pricing in the Gasoline Market. In: *Journal of Marketing Research* 44 (4), S. 622–635.
- Chapin, Francis Stuart (1974): Human activity patterns in the city. Things people do in time and in space. New York: Wiley (A Wiley-interscience publication).
- Charypar, David; Axhausen, Kay; Nagel, Kai (2006): An event-driven queue-based microsimulation of traffic flow. ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. IVT, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme.
- Chen, Bo; Cheng, H. H. (2010): A Review of the Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation Systems. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on. In: *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on DOI - 10.1109/TITS.2010.2048313* 11 (2), S. 485–497.
- Cheng, Ichieh; Desei, Dipti; Koudigkelis, Konstantinos; Vasconcellos, Pedro de; Kamin-sky, Phil; Sidhu, Ikhlaq; Tenderich, Burghardt (2008): Electric Vehicle Charging Infrastructure Rollout Strategy. Technical Brief. University of California, Berkeley. Center for Entrepreneurship & Technology. Online verfügbar unter <http://www.electricdrive.org/index.php?ht=a/GetDocumentAction/id/27932>, zuletzt geprüft am 31.10.2012.
- Chung, Sung Hoon; Kwon, Changhyun (2013): Multi-Period Planning for Electric Car Charging Station Locations: a Case of Korean Expressways. Online verfügbar unter <http://infohost.nmt.edu/~schung/chung2012.pdf>, zuletzt geprüft am 10.09.2013.
- Curtin, Richard; Shrago, Yevgeny; Mikkelsen, Jamie (2009): Plug-in Hybrid Electric Vehicles. Report. University of Michigan. Online verfügbar unter http://www.ns.umich.edu/Releases/2009/Oct09/PHEV_Curtin.pdf, zuletzt geprüft am 19.12.2013.

- Daimler (2013): Mercedes-Benz Werk Bremen. Online verfügbar unter <http://www.daimler.com/bremen>, zuletzt aktualisiert am 21.03.2014, zuletzt geprüft am 23.03.2014.
- Dale, Jonathan (2002): FIPA Request Interaction Protocol Specification. Online verfügbar unter <http://www.fipa.org/specs/fipa00026/SC00026H.pdf>, zuletzt geprüft am 25.04.2014.
- Dale, Jonathan (2014): Foundation for Intelligent Physical Agents. Online verfügbar unter <http://www.fipa.org/>, zuletzt aktualisiert am 04.04.2014, zuletzt geprüft am 25.04.2014.
- Deutsche Bundesregierung (2009): Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. Online verfügbar unter http://www.bmbf.de/pubRD/nationaler_entwicklungsplan_elektromobilitaet.pdf, zuletzt aktualisiert am 2009, zuletzt geprüft am 21.12.2011.
- Deutsche Bundesregierung (2013): Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. Online verfügbar unter <https://www.cdu.de/sites/default/files/media/dokumente/koalitionsvertrag.pdf>, zuletzt geprüft am 07.04.2014.
- Dios Ortúzar, Juan de; Willumsen, Luis G. (2011): Modelling transport. 4. Aufl. Chichester: Wiley.
- Duchrow, Timo; Schröer, Martin; Griesbach, Britta; Kasperski, Sebastian; Fabian Maas genannt Bermpohl; Kramer, Stefan; Kirchner, Frank (2012): Towards Electric Mobility Data Mining. In: Proceedings of the International Electric Vehicle Conference. IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC-12), March 4-8, Greenville, USA: o.A.
- Electrification Coalition (2009): Electrification Roadmap. Revolutionizing Transportation and Achieving Energy Security. Online verfügbar unter <http://www.electrificationcoalition.org/policy/electrification-roadmap>, zuletzt geprüft am 29.05.2012.
- Farahani, Reza Zanjirani (Hg.) (2009): Facility location. Concepts, models, algorithms and case studies. Berlin [u.a.]: Physica-Verl.
- Galus, M.; Waraich, Rashid A.; Balmer, M.; Andersson, G.; Axhausen, Kay W. (2009): A framework for investigating the impact of PHEVS. ETH, Swiss Federal Institute of Technology, IVT Institute for Transport Planning and Systems (Working paper / IVT [547]). Online verfügbar unter <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=incoll&nr=1440>, zuletzt geprüft am 31.10.2012.
- Galus, Matthias D.; González Vayá, Marina; Krause, Thilo; Andersson, Göran (2012a): The role of electric vehicles in smart grids. In: *WIREs Energy and Environment*. DOI: 10.1002/wene.56.
- Galus, Matthias D.; Waraich, R. A.; Noembrini, F.; Steurs, K.; Georges, G.; Boulouchos, K. et al. (2012b): Integrating Power Systems, Transport Systems and Vehicle Technology for Electric Mobility Impact Assessment and Efficient Control. Smart Grid, IEEE Transactions on. In: *Smart Grid, IEEE Transactions on* 3 (2), S. 934–949.

- Galus, Matthias D.; Waraich, Rashid A.; Andersson, Göran (2011): Predictive, distributed, hierarchical charging control of PHEVs in the distribution system of a large urban area incorporating a multi agent transportation simulation. In: 17th Power Systems Computation Conference.
- Gärling, T. (1998): Behavioural assumptions overlooked in travel-choice modelling. In: Ortúzar S., Juan de Dios, David A. Hensher und Sergio Jara-Diaz (Hg.): Travel behaviour research. Updating the state of play. 1st ed. Amsterdam, New York: Elsevier.
- Gawron, Christian (1999): Simulation-Based Traffic Assignment - Computing User Equilibria in Large Street Networks. Dissertation. Universität, Köln.
- Ge, Shaoyun; Feng, Liang; Liu, Hong (2011): The planning of electric vehicle charging station based on Grid partition method. Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference on. Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference on. In: *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference on*, S. 2726–2730.
- Gharbaoui, M.; Martini, B.; Bruno, R.; Valcarenghi, L.; Conti, M.; Castoldi, P. (2013): Designing and Evaluating Activity-Based Electric Vehicle Charging in Urban Areas. In: 2013 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC). Santa Clara, CA, USA, S. 1–5.
- Goodchild, M.; Noronha, V. (1987): Location-allocation and impulsive shopping: the case of gasoline retailing. In: A. Ghosh und G. Rushton (Hg.): Spatial analysis and location-allocation models. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Grote, Caspar (2001): Begleittexte zum Entwicklerforum Batterien, Ladekonzepte & Stromversorgungsdesign. Design & Elektronik, WEKA Fachzeitschriften-Verl. München.
- Guo, Jessica Y.; Bhat, Chandra R. (2001): Representation and Analysis Plan and Data Needs Analysis for the Activity-Travel System. Center for Transportation Research. Austin (Research Report 4080-1).
- Guo, Jessica Y.; Bhat, Chandra R. (2007): Population synthesis for microsimulation travel behavior. In: *Transportation Research Record* 2014 (12), S. 92–101.
- Guzzella, Lino; Sciarretta, Antonio (2013): Vehicle propulsion systems. introduction to modeling and optimization. Berlin [u.a.]: Springer.
- Hägerstrand, Torsten (1970): What about people in Regional Science? In: *Papers of the Regional Science Association* 24 (1), S. 6-21. DOI: 10.1007/BF01936872.
- Hasse, Knut; Hoppe, Mirko (2008): Standortplanung unter Wettbewerb. Teil 1: Grundlagen. Institut für Wirtschaft und Verkehr, TU Dresden (Diskussionsbeiträge aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr, 2). Online verfügbar unter http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/vkw/iwv/diskuss/Diskussbtrg_2008_2_Hoppe.pdf, zuletzt geprüft am 02.12.2013.
- He, Jun; Zhou, Buxiang; Feng, Chao; Jiao, Hengxin; Liu, Jinhua (2012): Electric Vehicle Charging Station Planning Based on Multiple-Population Hybrid Genetic Algorithm. Control Engineering and Communication Technology (ICCECT), 2012 In-

- ternational Conference on Control Engineering and Communication Technology (ICCECT), 2012 International Conference on. In: *Control Engineering and Communication Technology (ICCECT), 2012 International Conference on*, S. 403–406.
- Henesey, Lawrence; Notteboom, Theo E.; Davidsson, Paul (2003): Agent-based simulation of stakeholders relations: An approach to sustainable port and terminal management. In: International Association of Maritime Economists Annual Conference, 2003, S. 314-331.
- Hess, Andrea; Malandrino, Francesco; Reinhardt, Moritz Bastian; Casetti, Claudio; Hummel, Karin Anna; Barceló, Jose M.; -Ordinas (2012): Optimal deployment of charging stations for electric vehicular networks. In: Proceedings of the first workshop on Urban networking. Nice, France: ACM, S. 1–6.
- Hoberg, Patrick; Leimeister, Stefanie; Jehle, Holger; Krcmar, Helmut (2010): Elektromobilität 2010. Grundlagenstudie zu Voraussetzungen der Entwicklung von Elektromobilität in der Modellregion München. fortiss GmbH. München. Online verfügbar unter http://www.fortiss.org/fileadmin/user_upload/FB3/Grundlagenstudie_Elektromobilitaet2010_fortiss_final.pdf, zuletzt aktualisiert am 25.07.2010, zuletzt geprüft am 23.11.2011.
- Hodgson, M. John (1990): A Flow-Capturing Location-Allocation Model. In: *Geographical Analysis* 22 (3), S. 270–279. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1990.tb00210.x.
- Hoerstebroek, Tim; Denker, Christian; Buss, Tammo; Hahn, Axel (2012a): A Toolbased Approach to Assess Technology Introduction in Transportation Systems Demonstrated by the LNG Introduction for Ship Propulsion. In: Hans-Otto Günther, Kap Hwan Kim und Herbert Kopfer (Hg.): The 2012 International Conference on Logistics and Maritime Systems (LOGMS). Proceedings. Bremen, Germany.
- Hoerstebroek, Tim; Hahn, Axel (2012): Schema zur Ladeinfrastrukturbewertung für Elektromobilität. In: Dirk Christian Mattfeld und Susanne Robra-Bissantz (Hg.): Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2012. Tagungsband der MKWI 2012. Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2012. Braunschweig, 29.02.-01.03.2012, S. 1461–1472.
- Hoerstebroek, Tim; Schütte, Steffen; Buchmann, Marius (2012b): Integrating fleets of EVs into rural low-voltage grids with a high share of photovoltaic energy. In: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE) (Hg.). VDE Kongress 2012: Smart Grid - Intelligente Energieversorgung der Zukunft. Stuttgart, 5.-6. November 2012. Berlin / Offenbach: VDE Verlag GmbH.
- Holguín-Veras, José; List, George F.; Meyburg, Arnim H.; Ozbay, Kaan; Passwell, Robert E.; Teng, Hualiang; Yahalom, Shmuel (2001): An assessment of methodological alternatives for a regional freight model in the NYMTC Region. Prepared for New York Metropolitan Transportation Council (NYMTC). Online verfügbar unter http://www.utrc2.org/sites/default/files/pubs/regional-freight-final_0.pdf.
- IFV - Institut für Verkehrswesen (2013): Deutsches Mobilitätspanel. Online verfügbar unter <http://mobilitaetspanel.ifv.uni-karlsruhe.de/>, zuletzt geprüft am 17.12.2013.
- infas - Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH; DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (2010): Mobilität in Deutschland 2008. Ergebnisbericht. Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends. Hg. v. infas Institut für angewandte

Sozialwissenschaften GmbH und DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Online verfügbar unter http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2008_Abschlussbericht_I.pdf, zuletzt aktualisiert am 26.03.2010, zuletzt geprüft am 23.11.2011.

Institut für Mobilitätsforschung (2010): Zukunft der Mobilität. Szenarien für das Jahr 2030 ; zweite Fortschreibung. 1. Aufl. München: BMW Verl (ifmo-Studien).

ISI - Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (2012): Roadmap zur Kundenakzeptanz. Zentrale Ergebnisse der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung in den Modellregionen. Online verfügbar unter http://isi.fraunhofer.de/isi-media/docs/e/de/publikationen/roadmap_broschuere_netz.pdf, zuletzt geprüft am 11.06.2012.

Jamshidi, Masoomah (2009): Median Location Problem. In: Reza Zanjirani Farahani (Hg.): Facility location. Concepts, models, algorithms and case studies. Berlin [u.a.]: Physica-Verl.

Jia, Long; Hu, Zechun; Song, Yonghua; Luo, Zhuowei (2012): Optimal siting and sizing of electric vehicle charging stations. Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International. Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International. In: *Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International*, S. 1–6.

Jones, Peter M. (1979): New Approaches to Understanding Travel Behaviour: the Human Activity Approach. In: David A. Hensher (Hg.): Behavioural travel modelling. London: Croom Helm, S. 55–80.

Jossen, Andreas (2014): Ladung von elektrochemischen Akkumulatoren. Online verfügbar unter <http://www.basytec.de/ladung/ladung.html>, zuletzt aktualisiert am 07.02.2014, zuletzt geprüft am 07.04.2014.

Kanters, Geert F. (2013): Spatial modelling to allocate locations for public charging stations. Determining the locations of public charging station for the municipality of Eindhoven. Master Thesis. University of Technology, Eindhoven. Online verfügbar unter <http://www.kenwib.nl/wp-content/uploads/2013/09/KENWIB-Kanters-Geert-BINNENWERK1.pdf>, zuletzt geprüft am 19.12.2013.

KBA - Kraftfahrt-Bundesamt (2013): Umwelt - Deutschland und seine Länder am 1. Januar 2013. Online verfügbar unter http://www.kba.de/cIn_030/nn_269000/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2013__b__umwelt__dusl__absolut.html, zuletzt aktualisiert am 10.12.2013, zuletzt geprüft am 10.12.2013.

Kerner, B. S.; Klenov, S. L.; Brakemeier, A. (2008): Testbed for wireless vehicle communication: a simulation approach based on three-phase traffic theory. In: Intelligent Vehicles Symposium, 2008 IEEE, S. 180–185.

Kim, Jong-Geun (2010): Location of refueling stations for alternative fuel vehicles considering driver deviation behavior and uneven consumer demand. Mode, Heuristics, and GIS. Dissertation. Arizona State University, Phoenix, Arizona, USA.

Kitamura, Ryuichi; Fujii, S. (1998): Two computational process models of activity-travel behavior. In: T. Gärling (Hg.): Theoretical Foundations of Travel Choice Modeling. Oxford: Elsevier Science, S. 251–279.

- Kitamura, Ryuichi; Pas, Eric I.; Lula, Clarisse V.; Lawton, T. Keith; Benson, Paul E. (1996): The sequenced activity mobility simulator (SAMS): an integrated approach to modeling transportation, land use and air quality. In: *Transportation* 23 (3), S. 267-291. DOI: 10.1007/BF00165705.
- Kley, Fabian (2011): Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. Entwicklung und Bewertung einer Ausbaustrategie auf Basis des Fahrverhaltens. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Stuttgart, Karlsruhe.
- Könecke (2014): Unternehmen. Könecke. Online verfügbar unter <http://www.koenecke.de/home/unternehmen/lernen-sie-uns-kennen/>, zuletzt geprüft am 23.03.2014.
- Krajzewicz, Daniel; Erdmann, Jakob; Behrisch, Michael; Bieker, Laura (2012): Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban MObility. In: *International Journal on Advances in Systems and Measurements* 5 (3 & 4), S. 128–138.
- Krauß, Stefan (1998): Microscopic modeling of traffic flow. investigation of collision free vehicle dynamics. Köln: DLR.
- Kuby, Michael; Lim, Seow (2005): The flow-refueling location problem for alternative-fuel vehicles. In: *Socio-Economic Planning Sciences* 39 (2), S. 125–145. DOI: 10.1016/j.seps.2004.03.001.
- Kuby, Michael; Lim, Seow (2007): Location of Alternative-Fuel Stations Using the Flow-Refueling Location Model and Dispersion of Candidate Sites on Arcs. In: *Netw Spat Econ* 7 (2), S. 129-152. DOI: 10.1007/s11067-006-9003-6.
- Lam, Albert Y.S.; Leung, Yiu-Wing; Chu, Xiaowen (2013): Electric Vehicle Charging Station Placement: Formulation, Complexity, and Solutions. In: *Smart Grid, IEEE Transactions on*.
- Ley, Hubert (2008): Introduction to the Methodologies and Implementaion of TRANSIMS, 21.04.2008. Online verfügbar unter http://web.anl.gov/TRACC/Training/TMS/04_08/transims_-_1_-_introduction.pdf, zuletzt geprüft am 09.01.2014.
- Lin, Z.; Ogden, J.; Fan, Y.; Chen, C. (2008): The fuel-travel-back approach to hydrogen station siting. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 33 (12), S. 3096–3101. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.01.040.
- Liu, Zi-fa; Zhang, Wei; Ji, Xing; Li, Ke (2012): Optimal Planning of charging station for electric vehicle based on particle swarm optimization. Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE. Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE. In: *Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE*, S. 1–5.
- LSKN - Landesamt für Statistik Niedersachsen (2014). Online verfügbar unter <http://www.lskn.niedersachsen.de/startseite/>, zuletzt aktualisiert am 29.01.2014, zuletzt geprüft am 29.01.2014.
- Luke, Sean; Balan, Gabriel; Panait, Liviu; Cioffi-Revilla, Claudio; Paus, Sean (2003): MASON: A Java Multi-Agent Simulation Library. In: *Proceedings of the Agent 2003 Conference*.

- Luke, Sean; Cioffi-Revilla, Claudio; Panait, Liviu; Sullivan, Keith; Balan, Gabriel (2005): MASON: A Multi-Agent Simulation Environment. In: *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International* 82 (7), S. 517–527.
- Machledt-Michael, S. (2000): Fahrtenkettenmodell für den städtischen und regionalen Wirtschaftsverkehr. TU, FB Bauingenieurwesen, Aachen, Braunschweig.
- Maßmann, Matthias (2006): Kapazitierte stochastisch-dynamische Facility-Location-Planung. 1. Aufl. s.l: DUV Deutscher Universitäts-Verlag. Online verfügbar unter http://ebooks.ciando.com/book/index.cfm/bok_id/16448.
- MATSim (2014a): Multi-Agent Transport Simulation. Online verfügbar unter <http://matsim.org/>, zuletzt aktualisiert am 2014, zuletzt geprüft am 08.01.2014.
- MATSim (2014b): Within-day replanning. Status: experimental. Online verfügbar unter <http://www.matsim.org/node/587>, zuletzt geprüft am 31.01.2014.
- Matsumoto, Makoto; Nishimura, Takuji (1998): Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator. In: *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulations* 8 (1), S. 3–30. Online verfügbar unter <http://www.math.sci.hiroshima-u.ac.jp/~m-mat/MT/ARTICLES/mt.pdf>, zuletzt geprüft am 10.04.2014.
- May, James W.; Mattila, Matt (2009): Plugged In: A Stakeholder Investment Guide for Public Electric-Vehicle Charging Infrastructure. Rocky Mountain Institute. Online verfügbar unter <http://electricdrive.org/index.php?ht=a/GetDocumentAction/id/27922>, zuletzt geprüft am 22.06.2012.
- MirHassani, S. A.; Ebrazi, R. (2013): A Flexible Reformulation of the Refueling Station Location Problem. In: *Transportation Science* 47 (4), S. 617–628. DOI: 10.1287/trsc.1120.0430.
- Morrow, Kevin; Karner, Donald; Francfort, James (2008): Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging Infrastructure Review. Hg. v. U.S. Department of Energy Vehicle. Idaho National Laboratory. Online verfügbar unter <http://avt.inel.gov/pdf/phev/phevInfrastructureReport08.pdf>, zuletzt geprüft am 22.06.2012.
- Müller, Kirill; Axhausen, Kay W. (2011): Population synthesis for microsimulation: State of the Art. In: 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board. 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D. C., January 23-27, 2011.
- Nagel, Kai; Schreckenberg, Michael (1992): A cellular automaton model for freeway traffic. In: *J. Phys. I France* 2 (12), S. 2221–2229. DOI: 10.1051/jp1:1992277.
- NOW - Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (2011a): Elektromobilität in Deutschland. Aufbau einer öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur für Genehmigungsbehörden und Antragsteller. Praxisleitfaden. Online verfügbar unter www.now-gmbh.de/en/mediathek.html, zuletzt geprüft am 18.06.2012.
- NOW - Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (2011b): Szenarien zum Infrastrukturaufbau für Elektromobilität. Ergebnisse aus Experten-

- workshops der Plattform Infrastruktur im Rahmen des BMVBS-Vorgabens "Modellregionen für Elektromobilität 2009-2011. Online verfügbar unter www.now-gmbh.de/en/mediathek.html, zuletzt geprüft am 18.06.2012.
- NOW - Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (2011c): Was erwarten künftige Nutzer von elektrischen Fahrzeugen? Erste Zwischenanalyse der Nutzerbefragung aus den Modellregionen des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Online verfügbar unter http://www.now-gmbh.de/fileadmin/user_upload/RE-Mediathek/RE_Publikationen_MR/NOW_Handbuch_Elektrofahrzeuge.pdf, zuletzt geprüft am 11.06.2012.
- Odell, James (2002): FIPA Contract Net Interaction Protocol Specification. Online verfügbar unter <http://www.fipa.org/specs/fipa00029/SC00029H.pdf>, zuletzt geprüft am 25.04.2014.
- Oh, Jun-Seok; Cortés, Cristián E.; Jayakrishnan, R.; Lee, Der-Horng (1999): Microscopic Simulation with Large-Network Path Dynamics for Advanced Traffic Management and Information Systems. UCI-ITS-TS-WP-99-11. Institute for Transportation Studies, University of California, Irvine.
- OpenStreetMap Foundation (2014). Online verfügbar unter <http://www.openstreetmap.org/>, zuletzt geprüft am 23.03.2014.
- Oppenheimer, Frank; Hoerstedt, Tim (2011): Modellregion Elektromobilität Bremen/Oldenburg Personal Mobility Center, Modul 4 - Verkehrskonzepte und Geschäftsmodelle. Arbeitspaket 4.1 - Ressourcenmanagement und Infrastrukturlayout ; Arbeitspaket 4.2 - Planungs- und Steuerungsmodell. Abschlussbericht. OFFIS – Institut für Informatik (03KP544E).
- osm2po (2010): openstreetmap converter and routing engine for java. Online verfügbar unter <http://osm2po.de/>, zuletzt aktualisiert am 20.07.2010, zuletzt geprüft am 24.03.2014.
- Palma, André de; Marchal, Fabrice (2002): Real Cases Applications of the Fully Dynamic METROPOLIS Tool-Box: An Advocacy for Large-Scale Mesoscopic Transportation Systems. In: *Networks and Spatial Economics* 2 (4), S. 347-369. DOI: 10.1023/A:1020847511499.
- Papaleontiou, Leontios G. (2008): High-Level Traffic Modelling and Generation. Masterthesis. University of Cyprus. Department of Computer Science.
- Papaleontiou, Leontios G.; Dikaisakos, Marios D. (2009): Traffic Modeler: A Graphical Tool for Programming Microscopic Traffic Simulators through High-level Abstractions. In: Proceedings of the 69th IEEE Vehicular Technology Conference.
- Peffer, Ken; Tuunanen, Tuure; Gengler, Charles E.; Rossi, Matti; Hui, Wendy; Virtanen, Ville; Bragge, Johanna (2006): The Design Science Research Process: A Model for Producing and Presenting Information Systems Research. In: First International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology (DESRIST 2006), S. 83–106.
- Peters, Anja; Dütschke, Elisabeth (2010): Zur Nutzerakzeptanz von Elektromobilität. Analyse aus Expertensicht. ISI - Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung. Karlsruhe. Online verfügbar unter

http://www.elektromobilitaet.fraunhofer.de/Images/FSEM_Ergebnisbericht_Expertενinterviews_tcm243-66462.pdf, zuletzt geprüft am 18.06.2012.

- Pinjari, Abdul; Eluru, Naveen; Srinivasan, Sivaramakrishnan; Guo, Jessica Y.; Copperman, Rachel; Sener, Ipek N.; Bhat, Chandra R. (2008): CEMDAP: Modeling and Microsimulation Frameworks, Software Development, and Verification. In: 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board. 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 2008.
- PMC - Personal Mobility Center (2014): Personal Mobility Center. Online verfügbar unter <http://www.personal-mobility-center.de/de/startseite.html>, zuletzt geprüft am 08.04.2014.
- Pritchard, David R. (2008): Synthesizing Agents and Relationships for Land Use / Transportation Modelling. Master Thesis. University of Toronto, Toronto. Graduate Department of Civil Engineering.
- Pritchard, David R.; Miller, Eric J. (2012): Advances in population synthesis: fitting many attributes per agent and fitting to household and person margins simultaneously. In: *Transportation* 39 (3), S. 685–704. DOI: 10.1007/s11116-011-9367-4.
- PTV AG (2011): VISSIM - Multi-Modal Traffic Flow Modeling. Online verfügbar unter <http://www.ptvag.com/software/transportation-planning-traffic-engineering/software-system-solutions/vissim/>, zuletzt aktualisiert am 2011, zuletzt geprüft am 15.12.2011.
- Railsback, S. F.; Lytinen, S. L.; Jackson, S. K. (2006): Agent-based Simulation Platforms: Review and Development Recommendations. In: *Simulation* 82 (9), S. 609–623. DOI: 10.1177/0037549706073695.
- regio gmbh (2014): REGISonline.de - Die Wirtschaftspartnərbörse im Nordwesten. Online verfügbar unter <http://regisonline.de/de/>, zuletzt geprüft am 24.03.2014.
- Rogers, Everett M. (2003): Diffusion of innovations. 5. Aufl. New York, NY: Free Press. Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/bios/simon052/2003049022.html>.
- Schenk, Michael; Seidel, Holger; Ebert, Ramon (2010): Konfiguration einer Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. In: *Industrie Management* 26 (6), S. 53-56.
- Scherfke, Stefan; Schütte, Steffen (2012): mosaik – Architecture Whitepaper. Online verfügbar unter http://mosaik.offis.de/downloads/mosaik_architecture_2012.pdf, zuletzt geprüft am 25.04.2014.
- Schmid, Andreas (2012): Virtuelle Entwicklung und Optimierung von Ottomotoren durch OD. 1D-Simulation. Renningen: Expert-Verl.
- Schmidt, Tobias; Schlender, Dirk (2003): Untersuchung zum saisonalen Reifenwechsel unter Berücksichtigung technischer und klimatischer Aspekte. Bergische Universität Wuppertal.
- Schott, Ben (2009): Range Anxiety. The New York Times. Online verfügbar unter <http://schott.blogs.nytimes.com/2009/01/15/range-anxiety/>, zuletzt geprüft am 22.04.2014.

- Schütte, Steffen (2013): Simulation Model Composition for the Large-Scale Analysis of Smart Grid Control Mechanisms. Dissertation. Universität Oldenburg, Oldenburg. Online verfügbar unter <http://oops.uni-oldenburg.de/1768/>.
- Sener, Ipek N.; Ferdous, Nazneen; Bhat, Chandra R.; Reeder, Phillip (2009): Tour-Based Model Development for TxDOT: Evaluation and Transition Steps. Center for Transportation Research. Austin, Texas. Online verfügbar unter http://ntl.bts.gov/lib/33000/33700/33712/0_6210_2.pdf, zuletzt geprüft am 20.12.2013.
- Sivakumar, Aruna (2007): Modelling Transport: A Synthesis of Transport Modelling Methodologies. Online verfügbar unter <http://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/50669701.PDF>, zuletzt geprüft am 19.11.2012.
- Statistisches Landesamt Bremen (2014): Statistisches Landesamt. Online verfügbar unter <http://www.statistik.bremen.de/sixcms/detail.php?gsid=bremen02.c.730.de>, zuletzt geprüft am 24.03.2014.
- Steinberg, Dave; Budinsky, Frank (2011): EMF. Eclipse modeling framework. Upper Saddle River, NJ [u.a.]: Addison-Wesley.
- Telecom Italia (2007): Jade - Java Agent DEvelopment Framework. Online verfügbar unter <http://jade.tilab.com/>, zuletzt aktualisiert am 08.11.2007, zuletzt geprüft am 25.04.2014.
- Thas, Olivier (2010): Comparing Distributions. First. New York, NY: Springer Science+Business Media, LLC (Springer Series in Statistics).
- The Apache Software Foundation (2013): The Apache Commons Mathematics Library. Online verfügbar unter <http://commons.apache.org/proper/commons-math/>, zuletzt aktualisiert am 03.11.2013, zuletzt geprüft am 25.04.2014.
- Thielmann, Axel; Sauer, Andreas; Isenmann, Ralf; Wietschel, Martin; Plötz, Patrick (2012): Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. 1. Aufl. ISI - Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung. Karlsruhe. Online verfügbar unter <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-195870.html>, zuletzt geprüft am 18.06.2012.
- TRANSIMS (2014): an open source transportation modeling and simulation toolbox. Online verfügbar unter <http://code.google.com/p/transims/>, zuletzt geprüft am 31.01.2014.
- Treiber, Martin; Helbing, Dirk (2002): Realistische Mikrosimulation von Straßenverkehr mit einem einfachen Modell. Symposium Simulationstechnik (ASIM).
- Treiber, Martin; Kesting, Arne (2010): Verkehrsdynamik und -simulation. Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).
- Upchurch, Christopher; Kubly, Michael; Lim, Seow (2009): A Model for Location of Capacitated Alternative-Fuel Stations. In: *Geographical Analysis* 41 (1), S. 85–106. DOI: 10.1111/j.1538-4632.2009.00744.x.
- VDE - VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (2012): Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker - Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen. DIN EN 62196.

- Veldhuisen, Jan; Timmermans, Harry; Kapoen, Loek (2000): RAMBLAS: a regional planning model based on the microsimulation of daily activity travel patterns. In: *Environ. Plann. A* 32 (3), S. 427–443. DOI: 10.1068/a325.
- Vetter, J.; Novák, P.; Wagner, M. R.; Veit, C.; Möller, K.-C.; Besenhard, J. O. et al. (2005): Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. In: *Journal of Power Sources* 147 (1–2), S. 269–281. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.01.006.
- Vividsolutions (2003): JTS Topology Suite. Online verfügbar unter <http://www.vividsolutions.com/jts/JTSHome.htm>, zuletzt aktualisiert am 09.08.2003, zuletzt geprüft am 10.04.2014.
- Wallentowitz, Henning; Freialdenhoven, Arndt (2011): Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges. Technologien, Märkte und Implikationen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Wang, Ying-Wei; Lin, Chuah-Chih (2009): Locating road-vehicle refueling stations. In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 45 (5), S. 821–829. DOI: 10.1016/j.tre.2009.03.002.
- Waraich, Rashid A.; Galus, Matthias D.; Dobler, Christoph; Balmer, Michael; Andersson, Göran; Axhausen, Kay W. (2009): Plug-in hybrid electric vehicles and smart grid: Investigations Based on a Micro- Simulation. ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, IVT, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung [592]). Online verfügbar unter <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/show?type=incoll&nr=1655>.
- Wenzl, Heinz; Baring-Gould, Ian; Kaiser, Rudi; Liaw, Bor Yann; Lundsager, Per; Manwell, Jim et al. (2005): Life prediction of batteries for selecting the technically most suitable and cost effective battery. In: *Journal of Power Sources* 144 (2), S. 373–384. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2004.11.045.
- Wermuth, Manfred J. (1978): Struktur und Effekte von Faktoren der individuellen Aktivitätennachfrage als Determinanten des Personenverkehrs.
- Wiedemann, Rainer. (1974): Simulation des Straßenverkehrsflusses. Univ., Inst. für Verkehrswesen, Karlsruhe.
- Wiederer, Alfred; Philip, Ronald (2010): Policy options for electric vehicle charging infrastructure in C40 cities. Harvard Kennedy School. Online verfügbar unter <http://www.innovations.harvard.edu/showdoc.html?id=1108934>, zuletzt geprüft am 29.06.2012.
- Wiesspeiner, Gerhard (2005): Drahtlos Akkus aufladen. Online verfügbar unter <http://www.bticcs.com/pub/d+e2005.pdf>, zuletzt geprüft am 25.04.2014.
- WVI GmbH (2014): Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010. Online verfügbar unter <http://www.kid2010.de/de/page&id=4&navid=304>, zuletzt geprüft am 29.01.2014.
- Xi, Xiaomin; Sioshansi, Ramteen (2012): Location Planning of Public electric Vehicle charging Stations in Mid-Ohio Region Using a Simulation Optimization Model. Ohio State University, Columbus. Integrated Systems Engineering. Online verfügbar unter <http://www.driveelectricohio.org/wp-content/uploads/2012/10/Report-PEV-Stations-MidOhio.pdf>, zuletzt geprüft am 19.12.2013.
- Xi, Xiaomin; Sioshansi, Ramteen; Marano, Vincenzo (2013): Simulation–optimization model for location of a public electric vehicle charging infrastructure. In: *Trans-*

portation Research Part D: Transport and Environment 22 (0), S. 60–69. DOI: 10.1016/j.trd.2013.02.014.

Ye, Xin; Konduri, Karthik; Pendyala, Ram M.; Sana, Bhargava; Waddell, Paul (2009): A Methodology to Match Distributions of Both Household and Person Attributes in the Generation of Synthetic Populations. In: 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board. 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 11-15, 2009. Online verfügbar unter http://urbanmodel.asu.edu/popgen/papers/PopulationSynthesizerPaper_TRB.pdf, zuletzt geprüft am 19.11.2012.

Zensus 2011 (2014): Zensusdatenbank. Online verfügbar unter <http://ergebnisse.zensus2011.de/>, zuletzt aktualisiert am 17.06.2013, zuletzt geprüft am 24.03.2014.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen benutzt habe.

Tim Hoerstebroek