

Arwed Schmidt

Flottenbetrieb von elektrischen und autonomen Serviceagenten im städtischen Personennahverkehr

Arwed Schmidt

**Flottenbetrieb von elektrischen und autonomen
Serviceagenten im städtischen Personennahverkehr**

**Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik
Band 53**

Herausgeber

FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin

Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

Das Institut für Fahrzeugsystemtechnik besteht aus den Teilinstituten Bahnsystemtechnik, Fahrzeugtechnik, Leichtbautechnologie und Mobile Arbeitsmaschinen.

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen Bände finden Sie am Ende des Buchs.

Flottenbetrieb von elektrischen und autonomen Serviceagenten im städtischen Personennahverkehr

von
Arwed Schmidt

Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Fakultät für Maschinenbau, 2016

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2017 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1869-6058

ISBN 978-3-7315-0633-1

DOI: 10.5445/KSP/1000065890

Vorwort des Herausgebers

Die weltweite Bevölkerungszunahme und der kontinuierliche Zuzug in Städte führen zu einer steigenden Nachfrage nach individueller Mobilität in urbanen Ballungszentren. Diese Nachfrage wird bisher mehrheitlich mit konventionellen Personenkraftwagen (Pkw) im privaten Besitz bedient, welche für den Transportzweck häufig überdimensioniert sind und für deren Antrieb fossile Kraftstoffe eingesetzt werden. Das evolutionär gewachsene Straßenverkehrssystem besitzt dabei nur eine begrenzte Tragfähigkeit und die Pkw sind durchschnittlich sehr gering ausgelastet.

Aus diesem unverhältnismäßig hohen Material- und Ressourceneinsatz resultiert eine ineffizient umgesetzte und klima- und gesundheitsschädlich erbrachte Verkehrsleistung mit hohem Bedarf an städtischer Fläche für den ruhenden Verkehr. Die Abkehr von fossilen Kraftstoffen im Verkehr ist gesamthaft betrachtet bisher nur eine umweltpolitische Zielvorstellung.

Bisherige Beiträge konzentrieren sich beispielsweise auf die Integration von Elektromobilität oder die verkehrstechnischen Auswirkungen autonomer Fahrzeugflotten. Ein grundsätzlicher Abbau der Schwächen des derzeitigen motorisierten Individualverkehrssystems zugunsten einer systematischen Erreichung der Ziele der Energiewende existiert bisher nicht.

Mit dieser Arbeit wird ein Nahverkehrssystem konzipiert und interdisziplinär kalkuliert, welches einerseits das Potential der Digitalisierung der Mobilitätsnachfrage im Straßenverkehrsraum konsequent nutzt, andererseits die Vorteile des Individualverkehrs mit den Vorteilen des öffentlichen Verkehrs kombiniert und ausschließlich erneuerbar betrieben werden kann. Das vorgestellte Transportmodell besteht aus den Bausteinen modularisierte

Fahrzeugflotte (Serviceagenten) und Infrastruktureinrichtungen (Mobilitätszentralen) mit zellulärer Zuordnung im städtischen Verkehrsraum.

Das Modell ist an den Bedürfnissen des Endkunden orientiert und bildet einen persönlich zugeschnittenen, von anderen Fahrgästen unabhängigen, innerstädtischen Punkt-zu-Punkt Transport ab. Methodisch wird dazu die Mobilitätsnachfrage der Bevölkerung als Produktionsaufgabe interpretiert.

Ziel dieser Arbeit ist es, auf der Grundlage der Simulation des Betriebs von Serviceagenten innerhalb eines städtischen Referenzgebietes charakteristische Werte für den Einsatz als Massenverkehrsmittel zu erhalten. Die Ergebniskategorien umfassen dabei die Auslastung einzelner Serviceagenten und die benötigte Flottengröße, den Energiekonsum und die erforderliche Leistungsbereitstellung, die lokale Reduktion von Treibhausgasemissionen, die Reaktivierung städtischer Verkehrsfläche als auch die betriebswirtschaftliche Positionierung im Markt der Mobilitätsdienstleistungen.

Aus marktwirtschaftlicher Perspektive zeigen die Preisparität zu fossil angetriebenen Pkw und die positiven Ergebnisse in allen anderen untersuchten Disziplinen, dass der Flottenbetrieb von Serviceagenten in Städten eine Alternative zu dem etablierten Straßenverkehrssystem darstellt. Die Arbeit liefert einen Ansatz zur Integration des Straßenverkehrs in die Zielsetzungen für die Energiewende in Deutschland. Eine am Bedarf orientierte, vollständig elektrische und autonome Flotte mit dem Potential erweiterter Funktionalität über den eigentlichen Transportzweck hinaus kann insbesondere für den derzeitigen motorisierten Individualverkehr zu einem Substitut werden.

Karlsruhe, im Februar 2017

Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld

Flottenbetrieb von elektrischen und autonomen Serviceagenten im städtischen Personennahverkehr

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation
von

Dipl.-Ing. Arwed Schmidt

Tag der mündlichen Prüfung:	16. September 2016
Referent:	Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Gernot Spiegelberg

Kurzfassung

Der Entwicklungsstand des motorisierten Individualverkehrs ist hinsichtlich klimapolitischer Zielerreichung, Verkehrsflächenausnutzung, räumlicher Dimensionierung und Auslastung der Fahrzeuge keine zukunftsfähige Lösung für Städte. Das Verkehrssystem basiert auf der lokalen Verbrennung fossiler Ressourcen, ist gekennzeichnet durch hohe Standanteile und mit einer wachsenden Bevölkerungsgröße unvereinbar. Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Konzept kombiniert die Vorteile des öffentlichen Nahverkehrs mit den Vorteilen des Individualverkehrs. Es wird ein elektrisches, autonomes Massenverkehrsmittel mit individuellem Zuschnitt untersucht, welches als hocheffizienter und komfortabler Mobilitätsdienstleister konzipiert ist und ausschließlich durch erneuerbare Energie betrieben wird. Dieses Verkehrsmittel wird als Serviceagent bezeichnet und im Gesamtsystem betrachtet. Die Untersuchung umfasst eine verkehrstechnische, eine energietechnische und eine ökonomische Analyse. Der Flottenbetrieb wird modelliert und für einen ausgewählten Spitzenlasttag simuliert.

Serviceagenten fahren modularisiert nach der Sitzplatzanzahl autonom Wegekettten ab, um Fahrgäste zu transportieren. Wegekettten beginnen und enden in Mobilitätszentralen, welche als innerstädtische Betriebshöfe Abstellplätze zur Ladung und Wartung vorhalten. Die Untersuchung erfolgt in einem für urbane Räume repräsentativen Referenzgebiet mit 20000 Einwohnern. Die Verkehrsnachfrage wird als Produktionsaufgabe verstanden, welche durch Serviceagenten abgearbeitet wird. Verkehrstechnisch steht die Auslastung in der Flotte und die benötigte Flottengröße zur Substitution herkömmlicher Pkw im Vordergrund. Energietechnisch wird das aus dem Betrieb resultierende Lastprofil und die Planbarkeit der

Leistungsanforderung untersucht. Ökonomisch werden die Gesamtbetriebskosten von Serviceagenten einer Zahlungsbereitschaft gegenübergestellt und das Restkapital für eine Flotte bestimmt. In übergeordneter Betrachtung wird das Potential ermittelt, im Kontext der Energiewende lokalen Treibhausgasausstoß zu vermeiden und passive Verkehrsflächen durch die Entnahme von ruhendem Verkehr zu reaktivieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass für die gleiche Beförderungsaufgabe im Referenzgebiet anstatt 7980 privat genutzter Pkw nur 933 Serviceagenten benötigt werden. Die Einsitzer-Agenten als größte Flotte erreichen inklusive des Nachtzeitfensters eine durchschnittliche Flottenauslastung von 37 % (Spitzenwert: 71 %) und liegen damit über den Auslastungen von Pkw und Taxi. Durch die autonomen Transferfahrten zwischen den Einsätzen erhöht sich die Fahrleistung im Tagesverlauf um 23 % gegenüber privat genutzten Pkw. Der Energiebedarf zur Substitution des motorisierten Individualverkehrs und des öffentlichen Personenverkehrs beträgt 60 MWh im Tagesverlauf. Für den Betrieb wird kontinuierlich zwischen 1 MW und 6 MW aggregierte Ladeleistung benötigt. In Preisparität mit der Verwendung privater Pkw und dem ausschließlichen Einsatz erneuerbarer Energie erwirtschaftet die Einsitzer-Flotte im Untersuchungsgebiet jährlich 8,7 Mio. € zur Planung und Finanzierung der Infrastruktur. Mit dem vorgestellten Modell werden mehr als 98 % der städtischen Wege und 86 % der Verkehrsleistung von Pkw durch Serviceagenten substituiert. Dies führt im Referenzgebiet zu einer Emissionsvermeidung von 32 t CO₂ pro Tag. Das Potential zur Flächenfreigabe durch Verminderung des ruhenden Verkehrs liegt bei mindestens 18 % der städtischen Straßenverkehrsfläche.

Zusammenfassend können Serviceagenten heutige Nahverkehrsmittel in Städten ersetzen, den ausschließlichen Einsatz von erneuerbarer Energie ermöglichen, die CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs deutlich senken und ruhenden Verkehr verringern. Das Restkapital eröffnet Spielraum für den wirtschaftlichen Flottenbetrieb. Das Gesamtsystem hat damit das Potential, den städtischen Straßenverkehr grundlegend positiv zu verändern.

Abstract

This work presents a systematic analysis of a large-scale integration of electric and autonomously controlled vehicles (service agents) with corresponding infrastructure in cities. The urban area is virtually partitioned into separate traffic cells to allow a precise tailoring of a fleet of this type to a certain number of inhabitants. The aim is to substitute cars and public transport with a highly efficient but comfortable traffic system based on renewable energies. This is expected to reduce both climate-relevant emissions caused by traffic as well as the amount of stationary traffic in cities.

A framework is formulated assessing the transport-related, electrotechnical and economical parameters of operation. The demand of mobility is regarded as a production planning task. On the basis of this framework a tripartite model is constructed and simulated, describing first the requested profile of transport services from the inhabitants of a generic urban study area, second single trips with customers in road traffic and last the general operation of a fleet out of mobility hubs with charging infrastructure.

The results show that autonomous and state-of-the-art electric service agents have potential to replace conventional motorized individual and public local transport entirely. The number of service agents needed to provide the same mobility is below 12 % of the number of cars today. The transport system can be powered solely by renewable energies. Thereby the integration of service agents extracts energy-related CO₂ emissions of local traffic. Additionally, high occupancy rates in the fleet lead to a reactivation of street traffic area by removing stationary traffic. An operation in price parity with conventional cars leaves capital to invest into infrastructure such as mobility hubs and components for autonomous driving.

Danksagung

Diese Dissertation ist in enger Abstimmung mit der zentralen Forschungs- und Entwicklungsabteilung der Siemens AG in München am Teilinstitut Bahnsystemtechnik des Karlsruher Institut für Technologie zwischen Juni 2013 und Juni 2016 entstanden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld für die Vielzahl der zielorientierten, wissenschaftlichen Diskurse, die sachliche Operationalisierung der Forschungsfrage und die Übernahme des Hauptreferates. Herrn Prof. Dr.-Ing. Gernot Spiegelberg möchte ich für sein großes Interesse an der autonomen Elektromobilität, das kritische und konsequente Suchen nach schlüssigen Argumentationsketten und die Übernahme des Korreferates danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Marcus Geimer gebührt mein Dank für die differenzierte Revision der Arbeit und die freundliche Übernahme des weiteren Korreferates. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer bedanke ich mich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Die vergangenen Jahre sind gekennzeichnet durch meine persönlich wahrgenommene, vollständige Freiheit der Gedanken und die Herausforderung, trotz thematischer Interdisziplinarität fokussiert Ergebnisse zu erzielen. Ohne die Wegbereitung durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Siegfried Russwurm, die kompromisslos sachliche Zerlegung meiner Überlegungen durch Frau Dr. rer. nat. Kerstin Häse und das Kondensieren der momentanen Resultate für die Rücksprachen mit Herrn Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler hätte ich dieses Ziel nicht erreicht, und dafür möchte ich mich bedanken.

Der Siemens-Forschergruppe um Dr. rer. nat. Jens-Christian Holst und Florian Jäger in Berlin danke ich für konstruktive Erörterungen und die Bereitstellung einer Arbeitsumgebung, in welche ich mich zurückziehen und

ohne Ablenkung die Dissertation ausgestalten konnte. Für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die anspruchsvolle Auseinandersetzung mit meinen Fragestellungen danke ich Ivana Kramer, Dr.-Ing. Markus Springmann, meinen Doktorandenkollegen am Institut und Evelyn Loibl und dem ehemaligen „RACE-Team“ der Siemens AG um Karl-Josef Kuhn in München.

Ohne Paulé und Benjamin Voß in Karlsruhe als auch Familie Degenkolb und Judith Westermann in München hätte diese Dissertation nicht in vergleichbarer räumlicher Verteilung entstehen können, und dafür bedanke ich mich herzlich. Meinen Eltern möchte ich für Ihren Rückhalt und den Nährboden danken, formulierte Ziele umzusetzen. Für Ihre Unterstützung und motivierende Zuversicht danke ich meiner Freundin Tamara Testrich. Unser kritischer Dialog hat einen großen Anteil zum Gelingen beigetragen.

Karlsruhe, im Februar 2017

Arwed Schmidt

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	xv
Symbolverzeichnis	xvii
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung und Forschungsfrage	2
1.2 Stand der Forschung	6
1.3 Gliederung der Arbeit	14
2 Straßenverkehr in Städten	15
2.1 Städtische Bevölkerung	15
2.2 Personenverkehr in Zahlen	17
2.3 Energieeinsatz im Verkehrssektor	20
2.4 Treibhausgasemissionen im Straßenverkehr	22
2.5 Motorisierter Individualverkehr in Deutschland	25
2.5.1 Auslastung der Fahrzeuge	25
2.5.2 Raumbedarf des motorisierten Individualverkehrs	29
2.5.3 Elektrisches Carsharing	32
2.6 Zwischenfazit	37
3 Modellaufbau	39
3.1 Serviceagenten	40
3.1.1 Ideale Auslastung und Modularisierung	43
3.1.2 Elektrischer Speicher	46
3.1.3 Gesamtbetriebskosten	51
3.2 Untersuchungsgebiet: Verkehrszelle	58

3.2.1	Konstruktion des Wegeprofils der Verkehrszelle	61
3.2.2	Zuschnitt der Referenzverkehrszelle	70
3.2.3	Räumliche Struktur der Referenzverkehrszelle	78
3.3	Fahrtmodellierung	81
3.3.1	Phasenmodell	81
3.3.2	Fahrt und Verzögerung im Verkehrssystem	86
3.3.3	Stromkonsum	91
3.4	Elektrische Infrastruktur und Betriebsmodellierung	96
3.4.1	Energieversorgung aus Mobilitätszentralen	96
3.4.2	Autonome Betriebsführung verketteter Einsätze	98
3.4.3	Analyse der Betriebszustände von Serviceagenten . .	101
3.4.4	Ablauforganisation eines Betriebstages	103
4	Simulation des Betriebs von Serviceagenten	107
4.1	Einsatzplanung in der Referenzverkehrszelle	108
4.2	Tagesablauf der Serviceagenten	112
4.3	Dimensionierung einer Flotte	115
4.4	Energiebedarf in der Referenzverkehrszelle	117
4.5	Leistungsauslegung einer Mobilitätszentrale	119
4.6	Auswirkungen des Betriebs auf Städte	126
4.6.1	Reduktion von Treibhausgasemissionen	127
4.6.2	Reduktion von passiven Verkehrsflächen	131
4.7	Betriebswirtschaftliche Bewertung von Serviceagenten . . .	132
4.8	Sensitivitätsanalyse	141
4.8.1	Flottengröße	144
4.8.2	Restkapital	146
5	Ergebnis der Simulation	149
5.1	Transporttechnische Kalkulation	149
5.2	Energietechnische Planung	150
5.3	Emissionsreduktion und Raumnutzung	151
5.4	Betriebswirtschaftliche Analyse	152

6 Zusammenfassung	155
6.1 Fazit	155
6.2 Kritische Würdigung	156
6.2.1 Betriebsablauf	156
6.2.2 Einsatzanforderungsprofil	158
6.2.3 Bewegung im Verkehrsraum	159
6.2.4 Höhe und Verwendung des Restkapitals	161
6.2.5 Emissionsvermeidung in Kernstädten	161
6.3 Ausblick	162
6.3.1 Serviceagenten als Baustein der Energiewende	162
6.3.2 Stadtplanung: Verkehrsflächen und Verkehrsmittel	164
6.3.3 Akzeptanz von Serviceagenten	165
6.3.4 Serviceagenten im wirtschaftlichen Kreislauf	166
Anhang	169
A.1 Bausteine der Struktogramme	169
A.2 Struktogramm der Fahrtmodellierung	170
A.3 Struktogramm des Modalitätsmodells	172
A.4 Struktogramm des Betriebsmodells	174
A.5 Variablen des MID-Wege Datensatzes	176
A.6 Regionstypen	177
A.7 Wegedauer in Kernstädten	178
A.8 Fehler durch Berechnung der Sitzplatzanzahl	179
A.9 Tagesablauf der Agenten bei der Substitution von Pkw	182
A.10 Restwertanalyse im Kompaktklassensegment	184
A.11 Substitution des öffentlichen Verkehrs	185
A.12 Temperaturprofile der untersuchten Städte	186
Abbildungsverzeichnis	187
Tabellenverzeichnis	191
Literaturverzeichnis	193

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
ADAC	Allgemeine Deutsche Automobil-Club e. V.
Agent-ID	Agenten-Identifikationsnummer
AMoD	Autonomous Mobility-on-Demand
BVG	Berliner Verkehrsbetriebe
DoD	Depth of Discharge
DRS	Dynamic Ride-Sharing
EoL	End-of-Life
FFCS	Free-Floating-Carsharing
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
IKS	Informations- und Kommunikationssystem
MID	Mobilität in Deutschland 2008
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MOZ	Mobilitätszentrale
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖSPV	Öffentlicher Straßenpersonenverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
POWER	Prediction of Worldwide Energy Resource
SAEV	Shared Autonomous Electric Vehicle
SAV	Shared Autonomous Vehicle

Abkürzung **Beschreibung**

SSE	Surface meteorological and Solar Energy
SuV	Siedlungs- und Verkehrsfläche
TCO	Total Cost of Ownership
V2G	Vehicle-to-Grid
VKM	Verbrennungskraftmaschine
VoT	Value-of-Time

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
a	Anzahl an Fahrzeugen der Flottenposition x in einer Nutzungsdauer	[-]
A	Einzelnes Fahrzeug für die Flottenposition x	[-]
b	Anzahl an elektrischen Speichern für die Flottenposition x in einer Nutzungsdauer	[-]
B	Einzelner elektrischer Speicher für die Flottenposition x	[-]
b_{min}	Minimal verfügbare Kapazität des elektrischen Speichers	[Wh]
c_c	C-Rate der Ladung	[1/h]
c_d	C-Rate der Entladung	[1/h]
C	Verkehrszelle	[-]
C_{ref}	Referenzverkehrszelle	[-]
d_I	Dauer des Transfers	[s]
d_{II}	Dauer der Personalisierung	[s]
d_{III}	Gesamtdauer der Phase III	[s]
d_{IV}	Dauer der Buchungsbeendigung	[s]
$d(k, t)$	Dauer von k zu t	[s]
$d(p_n, t)$	Querungsdauer von p_n zu t	[s]
ED_M	gemittelte Einsatzdistanz	[Pkm]
$e(k, t)$	Energieverbrauch auf k zu t	[Ah]

Symbol	Beschreibung	Einheit
$f_d(T, x)$	Auf der Zeit basierende Auslastung von x innerhalb von T	[%]
\mathcal{F}_x	Ladung von x	[s]
$f_s(T, x)$	Auf der Distanz basierende Auslastung von x innerhalb von T	[%]
\mathcal{H}_x	Entnahme von Energie von x	[s]
I_c	Ladestrom	[A]
I_d	Entladestrom	[A]
\mathcal{I}_x	Stillstand ohne Ladung oder Entladung von x	[s]
k	Einzelnes Kettenelement	[-]
\mathcal{K}	Anzahl von k in T	[-]
$l_{ext}(p_n, t)$	Gesamtzeitverlängerung eines Blockes p_n	[%]
$l_{ext_q}(p, t)$	Zeitverlängerung durch Verkehrsdichte	[%]
$l_{ext_s}(p)$	Streckenspezifische Zeitverlängerung	[%]
LF_{li}	Ladefaktor für Lithium-Ionen Batterien	[-]
\mathcal{L}_x	Summe der Verlustzeiten von x ohne Transportaufgabe	[s]
$\mathcal{L}_{I,x}$	Verlustzeiten durch Transferfahrten von x	[s]
$\mathcal{L}_{II,x}$	Verlustzeiten von x durch Rückkehr zu Mobilitätszentralen	[s]
m	Passagier	[-]
M	Modalität im Verkehrssystem	[-]
n	Anzahl der Streckenstücke von k	[-]
NC_x	Benötigte Anzahl an Fahrzeugen und Speichern einer Flottenposition x	[-]
N_{max}	Maximale Anzahl der angeforderten Einsätze in der Referenzverkehrszelle	[-]
$P_{C,M}(t)$	Leistungsprofil einer Mobilitätszentrale in C für M	[W]

Symbol	Beschreibung	Einheit
p_{DoD}	Entladetiefe	[%]
p_n	Streckenstück im Verkehrsflächenraster	[m]
P_X	Leistung zur Ladung von X in einer Mobilitätszentrale	[W]
P_x	Ladeleistung für x ohne Verluste	[W]
Q_{batt}	Nominalkapazität der Batterie	[Ah]
Q_{life}	Maximaler Energiedurchsatz in der Nutzungsdauer des elektrischen Speichers durch Laden und Entladen	[Ah]
r	Freigabe eines Agenten aus einer Mobilitätszentrale	[-]
\mathcal{R}	Anzahl der Freigaben von x aus Mobilitätszentralen in T	[-]
$s(k, t)$	Gesamtstrecke von k zu t	[m]
s_m	Von m nachgefragte Distanz	[m]
$s_V(r)$	Strecke der Rückkehr von x zur Mobilitätszentrale in r	[m]
t	Tageszeitpunkt in T	[hh:mm:ss]
T	Analysierte Betriebszeit von x	[s]
T_U	Umgebungstemperatur des Einsatzortes	[°C]
u	Einzelner Zeitpunkt, zu welchem x keine Transportanfrage erhält	[-]
U_{batt}	Nennspannung der Batterie	[V]
\mathcal{U}	Anzahl der Zeitpunkte ohne Transportanfrage an x in T	[-]
$v(p_n, t)$	Verkehrsflussgeschwindigkeit auf p_n über t	[m/s]
$v_{max}(p_n, t)$	Maximal zulässige Geschwindigkeit auf p_n zum Zeitpunkt t	[m/s]

Symbol	Beschreibung	Einheit
$V_m(T, x)$	Auf die Passagierbeförderung bezogene Fahrleistung von x zu T	[km]
v	Durchschnittliche Geschwindigkeit des Verkehrsflusses in einer Stadt	[m/s]
$V(T, x)$	Gesamtfahrleistung von x zu T	[km]
$w_{C, T}$	Wegeprofil von C in T	[-]
$W_{X, res}$	Nach Erbringung von w verfügbare Energie in den elektrischen Speichern der Flotte X	[Wh]
W_T	Energiebedarf zur Traktion für die Vollsubstitution in T	[Wh]
$W_{x, w}$	Energiekonsum von x für w	[Wh]
$W_{X, c}$	In T nachgeladene Energie von X	[Wh]
$W_{X, i}$	Initiale Energiemenge in den elektrischen Speichern der Agenten	[Wh]
$W_{X, w}$	Traktionsenergie von X für w	[Wh]
x	Flottenposition innerhalb der Flotte X	[-]
X	Flottengröße zur Substitution von M in C	[-]
y_{ND}	Maximale Anzahl an Vollzyklen in der Nutzungsdauer der Batterie	[-]

1 Einleitung

Die Abfolge der technischen Entwicklungen der Menschheit formt die Selbstwahrnehmung der Gesellschaft. Mit Beginn der Industrialisierung und einer robusten verkehrstechnischen und elektrischen infrastrukturellen Ausprägung hat der Pkw als Maßstab für Individualmobilität einen zentralen Platz in der Bevölkerung errungen. War motorisierter Individualverkehr (MIV) früher den wohlhabenden Menschen der Gesellschaft vorbehalten, haben Produktionseffizienz und struktureller Wohlstand den Pkw zu einem Jedermannsgut gemacht, welches auf einer starken Diversifizierung des Angebots aufbaut und sich an der gesellschaftlich verteilten Kaufkraft in Preis- und Komfortstufen orientiert. Im Rahmen dieser Entwicklung entstanden vollständig neue Industriezweige und Arbeitsplätze und ein politisches Schutzwerk zur Absicherung des Marktgeschehens. Dies führt dazu, dass selten grundsätzlich hinterfragt wird, ob die einst angestoßene Entwicklung für die Gesellschaft in Summe noch positiv ist.

Die Zunahme des Individualverkehrs offenbart heute die Schattenseite der fehlenden Weiterentwicklung: Städte sind gekennzeichnet durch eine hohe Flächenversiegelung, verbrennungsmotorisch angetriebener Individualverkehr ist die Massenbewegung von unökologischen, schlecht ausgelasteten und nicht auf den eigentlichen Transportzweck spezifizierten Verkehrsteilnehmern. Heutzutage werden in Städten Flächen versiegelt, auf welchen Fahrzeuge still stehen. Seitens der Automobilhersteller wird neben dem Transportzweck vor allem die emotionale Bindung an das eigene Auto in den Vordergrund gestellt. Auch die bisherige Entwicklung der Elektromobilität setzt das Verwendungsmuster des bestehenden MIV fort. Der Appell, das Fahrzeug oder das Mobilitätsverhalten zu ändern, setzt dabei

auf rationalen Idealen auf, welche vorrangig ökologisch motiviert sind. Aus Sicht des Autors ist ein Großteil der Bevölkerung jedoch nicht an technisch oder idealistisch motivierten Argumentationen interessiert, sondern handelt nach den selbst empfundenen Bedürfnissen. Ziel sollte daher ein Lösungsansatz sein, der die Vorteile der bestehenden Individualmobilität aufgreift, dabei jedoch die Qualität städtischen Lebens erhält oder verbessert. Zusammenfassend wird ein System benötigt, welches die Mehrheit der Menschen anspricht und effizienten, ökologischen Personentransport ermöglicht.

Die vorliegende Arbeit ist Teil der wissenschaftlichen Planung eines zukünftigen, städtischen Gesamtsystems im ökologischen Gleichgewicht, in welchem der derzeitige, durch Verbrennungskraftmaschinen (VKM) angetriebene Individualverkehr, durch elektrisch angetriebenen substituiert wird. Dazu werden die technischen, ökonomischen und ökologischen Potentiale aufgezeigt, welche durch die systematische Planung eines autonomen Personenbeförderungssystems mit hoch ausgelasteten, auf den tatsächlichen Bedarf zugeschnittenen und ausschließlich durch erneuerbare Energie angetriebenen Fahrzeugen entstehen.

1.1 Zielsetzung und Forschungsfrage

In diesem Abschnitt wird die Zielsetzung der Arbeit vorgestellt. Nach der Vorstellung des Autors existiert in der zukünftigen Stadt auf einem Verkehrsweg kein individuell gesteuertes Nebeneinander verschiedener Verkehrsmittel mit geringen Besetzungsgraden. Ein zentrales Nahverkehrssystem belegt den in Echtzeit überwachten und regelbaren Verkehrsraum. Die Fahrzeuge sind elektrisch angetriebene, autonome Einheiten, welche nicht im Privatbesitz sind, sondern durch Mobilitätsanbieter betrieben werden. Es gibt keine verbrennungsmotorisch bedingten Rückstände und Emissionen im Straßenraum und die Geräuschbelastung wird durch leise Antriebe reduziert. Die einzelnen Einsätze werden bei der Verkehrsleitzentrale angemeldet. Im Gesamtsystem sind die Fahrzeuge *Aktuatoren*, welche

die Bewegung unter der Regie der Leitzentrale ausführen. Ein Passagier wählt zu einem Zeitpunkt ein Fahrtziel, eine Sitzplatzanzahl (oder Zula-dekapazität), ein Komfortniveau und eine gewünschte Reisezeit bei einem Mobilitätsanbieter aus. Die Reisegeschwindigkeit und das Komfortniveau sind dabei Produktmerkmale, durch welche sich der Anbieter am Mobilitätsmarkt differenziert. Die gefahrene Strecke wird durch die Leitzentrale nach dem Kriterium eines staufreien Verkehrsflusses ausgewählt. Je nach Angebot im Fahrgastinnenraum wendet sich der Passagier während des autonomen Transports eigenen Bedürfnissen zu. Es existieren Mobilitätsangebote für jedes gesellschaftliche Segment, so dass keine kommunale oder staatliche Subventionierung der Mobilität erforderlich ist. Durch eine hohe Auslastung der Fahrzeuge sinken die spezifischen Beförderungskosten gegenüber derzeit gering ausgelasteten Fahrzeugen und ausgenommen an zentralen Ladehäfen entsteht kein ruhender Verkehr. Aufgrund der hohen Beförderungsqualität und der erweiterten Möglichkeiten der Zeitznutzung beim Transport fragen die Passagiere dieses Mobilitätsangebot aktiv nach und treiben die technische Weiterentwicklung voran. Für die Speisung der Fahrzeuge und deren Infrastruktur wird ausschließlich erneuerbare Energie verwendet. Für das Erreichen dieser idealen Darstellung eines hocheffizienten Nahverkehrs sind in Abbildung 1.1 für die vier Einflusskategorien *Energie, Verkehr, Gesellschaft* und *Städte* wesentliche Anforderungen formuliert und in den sozioökonomischen Kontext des Jahres 2016 eingebettet.

Die *Energiewende* stellt zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit keine weltweit koordinierte Maßnahme dar. Insbesondere der Ressourceneinsatz und die Emissionen im Straßenverkehr bilden ein noch nicht gelöstes Problem. Auf der anderen Seite ermöglicht die zunehmende Digitalisierung im Allgemeinen eine verbesserte Beobachtbarkeit, wodurch die Auslastung technischer Systeme erhöht werden kann. In Bezug auf die Mobilitätsnachfrage wird diese damit transparenter. Durch die hohe Diskretisierung der Verkehrsströme eines Verkehrssystems nach Ort und Zeit können diese – ähnlich der Führung elektrischer Netze – digital geregelt werden.

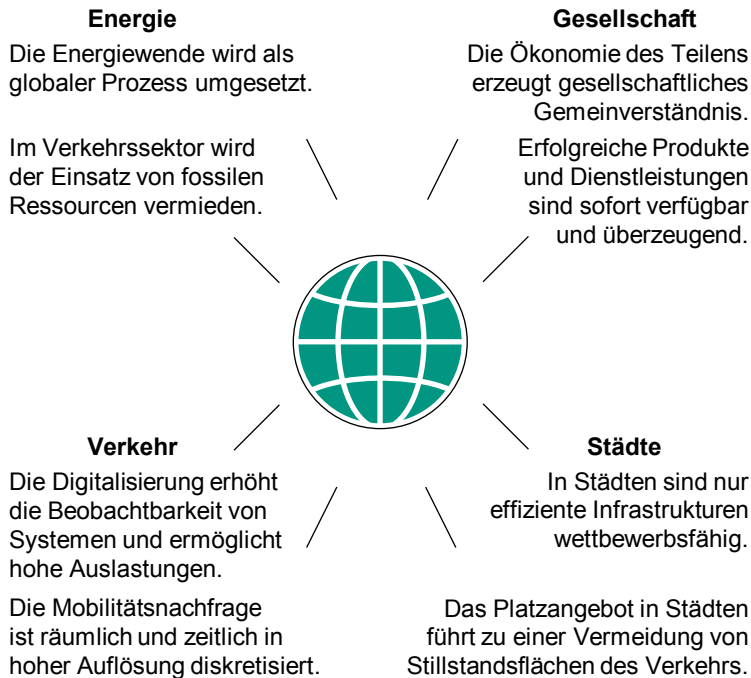


Abbildung 1.1: Anforderungen an das Gesamtsystem Straßenverkehr im sozioökonomischen Kontext des Jahres 2016.

In Verbindung mit dem durch die Vorgenerationen aufgebauten, gesellschaftlich erlangten Wohlstand können Konsumgüter durch geteilte Nutzung ökonomischer verteilt werden. Die Digitalisierung der Infrastruktur führt zu sinkenden Zugriffszeiten und der marktwirtschaftlichen Verpflichtung, für jedes Produkt den Zeitraum zwischen Nachfrage und Angebot zu minimieren. Die mit den Produkten und Dienstleistungsangeboten einer digitalisierten Welt heranwachsende, derzeit noch junge Generation kann die Anforderung an die benötigte Technik konkreter formulieren. Erfolgreich angebotene Produkte und Dienste sind gekennzeichnet durch augenblickliche Verfügbarkeit und überzeugen als komplexe Einheit. Für

die Fahrzeuge des Straßenverkehrs bedeutet das einen Nutzen zu vermitteln, bei welchem der Personentransport als ursprünglich zentrale Funktion nur Teilbestandteil ist. Die empfundene, höhere Lebensqualität urbaner Gebiete zieht die Menschen weiterhin an. In den Städten existieren jedoch gewachsene und zunehmend ineffiziente Infrastrukturen für Transport und Energie. Der städtische Lebensraum für Menschen ist jedoch auch zukünftig durch das Platzangebot begrenzt, so dass sich nur effiziente Infrastrukturen wettbewerbsfähig durchsetzen können. Das bedeutet für den Straßenverkehr, dass Stillstandsflächen vermieden werden.

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit soll erreicht werden, dass das eingangs formulierte, abstrakte Zielszenario auf eine theoretische Grundlage gestellt werden kann. Aus den Vorteilen des öffentlichen Nahverkehrs in Kombination mit den Vorteilen des Individualverkehrs soll ein elektrischer Massentransport mit individuellem Zuschnitt auf Basis erneuerbarer Energien erarbeitet und systemtechnisch untersucht werden. Für den Nahverkehr wird ein hoch ausgelastetes und autonomes Personentransportsystem modelliert und für ein definiertes Zeitfenster simuliert. Durch diesen Betrieb soll der ruhende Verkehr im öffentlichen Raum deutlich reduziert werden. Je präziser die zusätzliche elektrische Last durch den Verkehr in Höhe und Verteilung prognostiziert werden kann, desto planbarer ist die benötigte Leistungsbereitstellung und der Einsatz von erneuerbarer Energie zur lokalen Emissionsvermeidung. Für die Bewertung wird eine Systemplattform erstellt, welche aus den in Abbildung 1.2 aufgezeigten Bausteinen besteht. Die Forschungsfrage für diese Arbeit lautet:

„Wie viele Fahrzeuge und welcher Energieeinsatz werden benötigt, um den städtischen MIV-Nahverkehr bei gleicher Beförderungsqualität in einem Referenzgebiet vollständig zu substituieren und gleichzeitig die ausschließliche Speisung durch erneuerbare Energie zu ermöglichen?“



Abbildung 1.2: Bestandteile (orange) und Zielsetzung (grün) der Systemplattform.

Im Speziellen steht in der transporttechnischen Kalkulation die Ermittlung der benötigten Anzahl an Fahrzeugen als Flottengröße für ein Zielgebiet im Vordergrund. Die energietechnische Planung ergänzt die Betrachtung der Fahrzeugflotte um die Leistungsanforderung der zentralen Ladeeinrichtung. Die betriebswirtschaftliche Analyse ermittelt das ökonomische Potential für Systembetreiber und Kunden. Den ökologischen Rahmen bilden die Vermeidung lokaler CO₂-Emissionen und eine verbesserte Nutzung städtischer Verkehrsflächen. Zusammenfassend ermöglichen die vier Teilaspekte eine ganzheitliche Analyse des vorgestellten Transportkonzeptes.

1.2 Stand der Forschung

Die Interdisziplinarität dieser Arbeit erfordert eine Aufteilung des Forschungsstandes in die Bereiche *Fahrzeuge* und *autonome Verkehrssysteme*. Die Absicherung eigener Produkte in ertragreichen Märkten führt dazu, dass maßgebliche Entwicklungen und Innovationen im Bereich alternativer Fahrzeugkonzepte nicht oder nur sehr zögerlich durch die gewachsenen

Automobilhersteller vorangetrieben werden. Erste Modelle zu kompakten, komfortablen und elektrischen Kleinfahrzeugen in den 1990-Jahren haben keine Großserienreife erreicht [14], [29], [118].

Im Bereich spezialisierter Fahrzeuge mit hohem Nutzwert sind in den vergangenen Jahren zahlreiche Konzepte entstanden. Beispielweise entwickelt das Fraunhofer IWU mit dem Fokus der landwirtschaftlichen Nutzung den *KULAN*. Das elektrische Fahrzeug mit einer Masse von 300 kg ist in der Lage, Lasten bis zu 1000 kg zu transportieren und hat eine maximale Reichweite von 300 km [42]. Auf Basis einer modularen Fahrzeugarchitektur zur Adaption an verschiedene Einsatzbereiche ist der *StreetScooter* entstanden. Dieses Elektrofahrzeug wurde speziell für das Segment des Kurzstreckenverkehrs konzipiert mit dem Ziel, ein umweltfreundlich hergestelltes und kostengünstiges Fahrzeug zu gestalten. Einsatzfelder sind neben dem Personentransport beispielsweise soziale Dienste oder städtischer Gütertransport [106]. Als effizienter und anpassungsfähiger Mobilitätspartner mit einem personalisierbaren Fahrgastraum wurde am Institute for Advanced Study der Technischen Universität München in Kooperation mit der Automobil-Manufaktur Rimac Automobili der *eSeater* konzipiert [99]. Die Zielsetzung dabei war es, eine hohe Agilität im städtischen Umfeld zu erreichen und den Einsatz für flexible Transportmuster als autonom fahrendes, elektrisches Taxi zu ermöglichen. Einfache mechanische Strukturen und eine elektronische Fahrsteuerung sollen zu niedrigen Herstellungskosten führen und demonstrieren, dass in Verbindung mit hochqualitativen Mobilitätsdiensten der elektrische Antrieb ein logischer Baustein im Gesamtsystem ist. Zuletzt findet in dieser Auswahl der Konzeptautobauer Rinspeed mit dem Stadtbus *microMAX* Erwähnung. Dieses elektrische Fahrzeug für den öffentlichen Einsatz und kleinere Personengruppen wurde mit dem Ziel konzipiert, bequemen und unkomplizierten Kurzstreckenverkehr zu ermöglichen. Im Vordergrund steht dabei mit einer Länge von 3,6 m und einer Höhe von 2,2 m das kompakte Außenmaß [87]. Die Abbildung 1.3 gibt eine Übersicht der vorgestellten Fahrzeugkonzepte.



Abbildung 1.3: Auswahl aktueller Servicefahrzeuge. Oben links: *KULAN*, oben rechts: *StreetScooter*, unten links und in der Mitte: *eSeater*, unten rechts: *microMAX*. Quellen: [42], [106], [99] und [87].

Hinsichtlich des Einsatzes von Fahrzeugen für autonome Transportsysteme im Nahverkehr gibt es mehrere Gedankenansätze. Mit dem Ziel, ohne Wartezeiten eine Mobilitätskette für das letzte Wegstreckenstück zu installieren, ist das Fahrzeugkonzept „Fly-Wheel“ entstanden [31]. Einsatzfeld ist die Anbindung einer stillgelegten Großfreifläche an das städtische Ringbahnnetz von Berlin. Dem Ansatz der vorliegenden Ausarbeitung nahe kommt die Vorstellung von [20]. Dort wird das Ziel verfolgt, eine gesamte Stadt mit Fahrzeugen zu versorgen, welche sich nicht mehr in Privateigentum befinden. Der sich ständig bewegende Taxischwarm benötigt keine Parkplätze im klassischen Sinn und wird über eine Kommunikationsschnittstelle bestellt. Die Verteilung der Fahrzeugflotte im Verkehrswegenetz verhindert Stau und es wird davon ausgegangen, dass nur 25 % der heute genutzten Pkw benötigt werden (entsprechend ca. 11 Mio. Pkw in Deutschland). Als größte Herausforderung wird die Integration der ersten Generation selbstfahrender Fahrzeuge genannt. Diese müsse sich in einem „Verkehrssystem zurechtfinden, das für Menschen geschaffen wurde“ [20]. Aktuelle Forschungsergebnisse

tate beziehen sich daher auf die Übergangsphase, in welcher die *car2car*- und *car2x*-Kommunikation im Vordergrund stehen. Als Ausblick für nicht straßengebundenen, autonomen, elektrisch angetriebenen Punkt-zu-Punkt-Transport im Nahverkehr kann die einsitzige Transportkapsel *Ehang 184* herangezogen werden. Mittels eines Quadcopterantriebs wird ein Passagier bis 110 kg Masse mit 100 km/h auf 400 m Höhe 23 Minuten befördert [35].

Abschließend kann eine Gemeinsamkeit bei den vorgestellten Entwicklungen und Konzepten gefunden werden: Mit Ausnahme des *eSeater* wird mit keinem Fahrzeug das Komfortbedürfnis der Menschen angesprochen, sondern ökonomisches Fahrverhalten, Emissionsvermeidung oder Platzsparen in den Vordergrund gestellt.

Im Folgenden wird der Stand der Forschung zu nachfrageorientierten autonomen Verkehrssystemen (engl. Autonomous Mobility-on-Demand (AMoD)) vorgestellt. Die bisherigen Forschungsergebnisse werden dabei den Zielsetzungen der Systemplattform aus Abbildung 1.2 zugeordnet. Zunächst werden Beiträge mit dem Schwerpunkt auf der *transporttechnischen Kalkulation* herausgestellt. Forschungen auf Basis räumlicher Modelle konzentrieren sich auf das Verhältnis von der Wartezeit eines Nutzers im Zielgebiet zur benötigten Flottengröße des Gebiets. In [83] werden der Taxibetrieb in New York City und der MIV in Singapur untersucht. Im Ergebnis wird zur Vollsubstitution des Taxibetriebs in New York City, gegenüber derzeit 13 300 Fahrzeugen, bei gleicher Nachfragefunktion eine autonome Flotte von 7 000 bis 8 000 Fahrzeugen benötigt. Für Singapur wird sogar ein Reduktionspotential auf 33 % der derzeit verwendeten Pkw aufgezeigt, einhergehend mit einer Kostenreduktion für Mobilität für den Endnutzer um ca. 50 %. In Ergänzung zu diesen Forschungsbeiträgen wird in [100] die systematische Planung von AMoD formalisiert beschrieben. Die Antriebsart und die Energiebereitstellung für das Mobilitätssystem sind bei keinem Beitrag Gegenstand der Untersuchung. In [37] werden die Auswirkungen des gleichzeitigen Beförderns von Passagieren mit voneinander abweichenden Start- und Zielorten als auch Reisezeiten innerhalb dessel-

ben Pkw (engl. Dynamic Ride-Sharing (DRS)) untersucht. Dazu wird im Stadtgebiet von Austin (Texas) der Betrieb einer konventionell angetriebenen Shared Autonomous Vehicle (SAV)-Flotte simuliert. Resultate zeigen, dass die Anwendung von DRS einerseits sowohl die Gesamtservicezeit als auch die Fahrtkosten für die Passagiere reduziert. Durch die Transferfahrten erhöht sich die Fahrleistung der SAV um 8 %.

Mit der Java-basierten Multi-Agenten Simulationsumgebung MATSim [76] können mit mikroskopischer Präzision modalitätsspezifisch Verkehrsbewegungen in einem räumlichen Verkehrsnetz mit zeitabhängiger, lokaler Verkehrsbeeinflussung dargestellt werden. Als „Agent“ wird dabei ein einzelner Einwohner bezeichnet, welcher mit seinem Trip Teil des simulierten Verkehrsstroms ist. Kombinationen von Wegen werden im Zeitverlauf nicht gebündelt betrachtet, sondern jedem Agenten wird genau ein Trip zugewiesen. Hinsichtlich der Auswirkungen einer ganzheitlichen Ökonomie des Teilens im Individualverkehr werden in verschiedenen, weltweit verteilten Forschungsgruppen auf Basis von MATSim Simulationen durchgeführt [13]. Aufbauend auf Resultaten von [19] wird in [18] mit dieser Simulationsgrundlage der Betrieb einer autonomen Taxiflotte als neues Verkehrsmittel innerhalb des Berliner Stadtbahnringes als abgesperrtes Gebiet untersucht. Ziel der Simulationen ist es, unter Berücksichtigung der Verteilungsfunktion der Wartezeit der Beförderungsgäste im Tagesverlauf, die optimale Flottengröße zu ermitteln. Um die Lastspitze abzudecken sind die Betriebszustände der Flotte zu jedem Zeitpunkt bekannt, so dass unterschiedliche Flottengrößen untersucht werden können. Als Ausgangspunkte werden für das Geschäftsgebiet vier sehr große, zentrale *mobility-hubs* definiert. Für den Betrieb wird ein standardisierter Beförderungsprozess nach [74] verwendet, der simulierte Tag umfasst 4,7 Mio. Wege, welche heutzutage mit dem Pkw gefahren werden. Nach [19] wird für das Geschäftsgebiet eine Flottengröße von 90 000 bis 100 000 autonomen Taxis vorgeschlagen, entsprechend einem Ersetzungsgrad von 1:10 bis 1:12 bezogen auf die derzeitige Pkw-Flotte. Für das Szenario mit 100 000 autonomen Taxis werden von einzel-

nen Taxis mehr als 7,5 Stunden reine Fahrtzeit am Tag erreicht. Für diese Flottengröße beträgt die durchschnittliche Wartezeit im Tagesverlauf unter drei Minuten zwischen Anfrage und Ankunft beim Beförderungsgast. Generell wird das Problem herausgestellt, dass trotz des präziseren Zuschnitts der Fahrzeuge durch die Volatilität des Lastgangs weiterhin hohe Stillstände in der Flotte auftreten. Die Ergebnisse aus [18] zeigen weiterhin, dass durch die Transferfahrten die Fahrleistung um 13 % gegenüber der heutigen Fahrleistung von Pkw steigt. Gegenüber einer präzidierten Reihenfolge von Wegen im Tagesverlauf besitzen Simulation in einem realen Verkehrsnetz den Vorteil, dem Passagier die Freiheit zu ermöglichen, bis zum physischen Einstieg das Fahrtziel noch unbekannt zu lassen.

Erste Ansätze einer Verbindung der transporttechnischen Kalkulation mit einer *energietechnischen Planung* finden sich in [119]. Dort wird die elektrische Last des MIV mittels Multi-Agenten-basierter Verkehrssimulation ermittelt. Aufgrund der Annahme privater Halter entstehen an wenigen Knoten des Mittelspannungsnetzes hohe Lastwerte in den Stoßzeiten des Tages.

Im Folgenden werden Beiträge vorgestellt, welche neben der transporttechnischen Kalkulation ebenso der Kategorie *betriebswirtschaftliche Analyse* zuzuordnen sind. [25] untersucht dazu das Zusammenspiel von autonomer Betriebsführung und elektrischen Fahrzeugen (engl. Shared Autonomous Electric Vehicle (SAEV)). Zentrales Ergebnis ist, dass die Ladezeit und die Reichweite entscheidende Parameter für den Ersetzungsgrad von herkömmlichen Pkw sind. So ersetzt ein SAEV mit 130 km Reichweite bei einer AC-Ladung mit 240 V 3,7 Pkw in Privatbesitz und ein SAEV mit 320 km Reichweite 5,5 Pkw in Privatbesitz. Durch DC-Ladung mit 480 V steigen diese Werte auf 5,4 Pkw (130 km Reichweite) und 6,8 Pkw (320 km Reichweite). Durch autonome Transferfahrten entsteht eine Mehrfahrleistung gegenüber dem heutigen Betrieb von maximal 14 %. Unter Berücksichtigung zusätzlicher Kosten für die erforderlichen Komponenten für autonomes Fahren von 8000 € pro Fahrzeug liegen die in [25] berechneten Vollkosten bei umgerechnet 0,21 €/km bis 0,25 €/km.

Für den amerikanischen Fahrzeugmarkt wird daraus der Schluss gezogen, dass SAEVs einerseits erheblich günstiger als Taxis, andererseits vergleichbar mit heutigen, nicht autonomen und nicht Stellplatz-gebundenen Carsharing-Anbietern sind. Aus einer von der Autorin angenommenen Zahlungsbereitschaft von durchschnittlich 0,45 €/km wird ein deutliches betriebswirtschaftliches Potential eines Flottenbetreibers abgeleitet. In [38] steht neben der Erhöhung der Flottenauslastung der wirtschaftliche Vorteil des Betriebs einer SAEV-Flotte im Vergleich zu dem unwirtschaftlichen Betrieb des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) im Vordergrund. Trotz einer Erhöhung der Fahrleistung durch autonome Transferfahrten um durchschnittlich 23 %, sinken für das simulierte Stadtgebiet von Canberra die Einsatzkosten von SAEV gegenüber dem ÖPNV um 63 % und gegenüber privaten Pkw um 71 % auf 0,40 €/km. Dabei muss berücksichtigt werden, dass für private Pkw hohe innerstädtische Parkkosten anfallen und der ÖPNV aufgrund eines geringen Servicegrads in der Bevölkerung nur eine Zufriedenheit von 65 % verzeichnen kann.

Hinsichtlich der *ökologischen Auswirkung* wird in [49] das Synergiepotential des autonomen Fahrens mit Carsharing qualitativ herausgestellt und auf potentiell positive Auswirkungen von AMoD auf den städtischen Energiekonsum und die Umwelt hingewiesen. Für die Verkehrsentwicklung im Kontext einer gesellschaftlichen *Nachhaltigkeit* nutzt [81] drei Dimensionen: Ökonomisch, ökologisch und sozial. So dürfe eine Gesellschaft weder wirtschaftlich über ihre Verhältnisse leben; noch dürfe die ökologische Tragfähigkeit der Natur missachtet und gefährdet werden. Ebenso muss die Chancengleichheit und die Verteilungsgerechtigkeit gewahrt bleiben, um Spannungen konsensorientiert auszutragen und Eskalationen zu vermeiden. Mit der verkehrsplanerischen Komponente fügt [52] eine vierte Dimension ein. Diese unterstreicht, dass auch die grundsätzlichen Bedürfnisse aller Verkehrsteilnehmer gleichermaßen erfüllt werden müssen. [86] führt an, dass jede Infrastruktur drei Systemelemente zur Funktion benötigt: Einen logistischen Mechanismus, eine Energiequelle und ein Kommunikationsmedium.

Den Stand der Forschung zusammenfassend, werden die Teilbereiche Interkonnektivität im Straßenverkehr, elektrischer Antrieb, Konstruktion zweckorientierter Fahrzeuge für den Nahverkehr und Steuerung eines (autonomen) Straßenverkehrssystems mit geteilter Ökonomie einzeln derzeit umfassend betrachtet. Im Vergleich zum Forschungsstand haben [19], [18] und [25] die größte Überschneidung mit der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit. In [19] und [18] wird die Antriebsart und einhergehend eine Begrenzung der Reichweite nicht berücksichtigt, aus welcher limitierende Zeitpunkte für die Rückkehr der Fahrzeuge zum Laden entstehen. Die Dimensionierung der elektrischen Infrastruktur für eine Flotte ist daher nicht Untersuchungsgegenstand. In [25] werden neben der Flottengröße zwar Kosten analysiert, nicht aber die Leistungsanforderung an das Energienetz in den Kontext einer erneuerbaren Energiebereitstellung gestellt.

Kein Forschungsbeitrag umfasst bisher alle vier Punkte der Systemplattform gemeinsam. Gegenüber der Untersuchung in einem spezifischen Verkehrsnetz steht das Aufzeigen der generellen Machbarkeit eines autonomen Nahverkehrstransportsystems in dieser Arbeit im Vordergrund. Für die ganzheitliche Betrachtung von Transportmitteln und der Versorgungsanforderung fehlt in den bisherigen Arbeiten die benötigte infrastrukturelle Voraussetzung zur Leistungsbereitstellung und das aus dem Betrieb entstehende elektrische Lastprofil als Forschungsbeitrag. Es existiert nach Wissensstand des Autors keine konsequente Gesamtsystemsimulation, die einerseits die genannten Punkte umfasst und zusätzlich unter Berücksichtigung der benötigten Infrastruktur eine systematische und betriebswirtschaftliche Flottenplanung beinhaltet. Das aber ist die Voraussetzung, damit eine Flottenlösung zugleich als ökologische Maßnahme mit einem Potential zur Emissionsvermeidung Teil der Energiewende sein kann. Die vorliegende Arbeit hat den Anspruch, unabhängig von einem konkreten Verkehrssystem, alle Kategorien der Systemplattform in ein logisches Gesamtsystem zu überführen und durch eine Betriebssimulation zu bewerten.

1.3 Gliederung der Arbeit

In Kapitel 2 werden zunächst die Entwicklung der städtischen Bevölkerung, das zu Grunde liegende Verkehrssystem und der bisherige Einsatz von Primärenergie im Straßenverkehr vorgestellt. Aufgrund der zentralen Bedeutung wird anschließend die bisherige Struktur der Individualmobilität aufgezeigt und die Schwerpunkte Fahrzeugauslastung, Raumbedarf im Straßenverkehr und geteilte Fahrzeugnutzung durch Carsharing untersucht.

Aufbauend auf den Erkenntnissen des Vorkapitels und unter Vermeidung der herausgestellten Schwächen wird in Kapitel 3 das Modell der Serviceagenten als vollständig elektrische und autonome Mobilitätsdienstleister im Nahverkehr vorgestellt. Neben der Charakterisierung der Fahrzeuge nach Auslastung, Antrieb und Kostenstruktur steht eine dreigliedrige Modellbildung im Zentrum dieses Kapitels. Als Erstes wird eine Referenzverkehrszone als städtisches Untersuchungsgebiet mit Zuschnitt auf eine konkrete Anzahl an Einwohnern konstruiert. Anschließend wird die Bewegung der Serviceagenten mit einzelnen Fahrten modelliert. Im dritten Modellteil werden die zentrale Energieversorgung und die autonome Betriebsführung als übergeordnete Routine vorgestellt.

In Kapitel 4 erfolgt die Simulation eines Betriebstages mit den Schwerpunkten Einsatzplanung, Tagesablauf einzelner Serviceagenten, Größe der benötigten Flotte und Leistungsauslegung der elektrischen Infrastruktur. Darauf aufbauend werden die Auswirkungen des Betriebs im städtischen Raum hinsichtlich der vermiedenen CO₂-Emissionen und der Raumnutzung aufgezeigt. Abschließend erfolgt eine betriebswirtschaftliche Bewertung des Flotteneinsatzes, bevor ausgewählte Parameter der Modellbildung auf ihre Sensitivität untersucht werden.

Geleitet von den ursprünglichen Zielsetzungen werden in Kapitel 5 die technischen, ökonomischen und ökologischen Ergebnisse der Arbeit kompakt zusammengeführt. Abschließend wird in Kapitel 6 ein Fazit gezogen, das konstruierte Modell kritisch gewürdigt und ein Ausblick gegeben.

2 Straßenverkehr in Städten

2.1 Städtische Bevölkerung

Im Jahr 2009 lebten erstmalig mehr Menschen in der Stadt als auf dem Land. Der *World Urbanization Prospects* der Vereinten Nationen für das Jahr 2011 veranschlagt ein Wachstum der Weltbevölkerung von 7,0 Mrd. im selbigen Jahr auf 9,3 Mrd. für 2050, wovon 6,3 Mrd. in Städten leben [115]. Dies entspricht in absoluten Zahlen einem Wachstum der Stadtbevölkerung von 72 % gegenüber dem Jahr 2011 und für das Zeitfenster bis 2030 einem jährlichen Wachstum um 1,7 %. Täglich ziehen weltweit über 200 000 Menschen vom Land in die Stadt [79]. Weiterhin nehmen die Vereinten Nationen an, dass die Bevölkerungszunahme vollständig von urbanen Gebieten mit dem Schwerpunkt afrikanischer und asiatischer Städte aufgenommen werden wird. 61 % der urbanen Bevölkerung im Jahr 2011 lebt in Städten mit weniger als 1 000 000 Einwohnern, demgegenüber stehen 9,9 %, welche in Städten mit mehr als 10 Mio. Einwohnern leben [115]. Abbildung 2.1 gibt eine Übersicht über die historische und prognostizierte Entwicklung der Weltbevölkerung, aufgeteilt nach Stadt und Land, für das Zeitfenster 1950 bis 2050. Die Prognose zeigt, dass derzeit etwa 4 Mrd. Menschen in Städten leben. Im Flächenvergleich bedecken Städte heute nur 1 % bis 2 % der Erdoberfläche, für 2050 wird eine Steigerung auf 4 % bis 5 % angenommen [54]. Demgegenüber haben die Menschen in Städten mit 75 % des Gesamtenergieverbrauchs einen überproportionalen Anteil und verursachen 80 % der weltweiten CO₂-Emissionen [95].

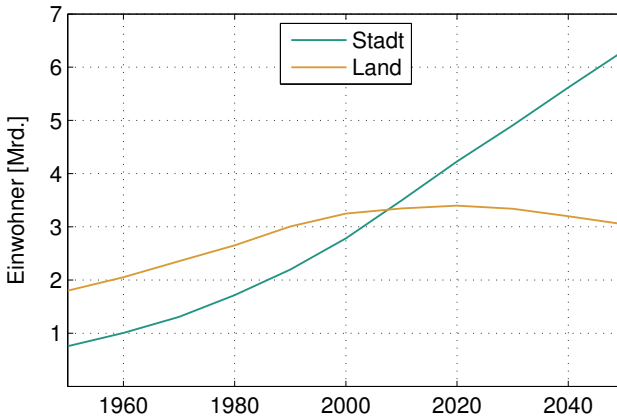


Abbildung 2.1: Prognose der Entwicklung der Weltbevölkerung. Quelle: [115], nach Fortschreibung der Zahlen aus 2009.

Einerseits hat der Verkehr mit 23 % einen bedeutenden Anteil an der CO₂-Bilanz einer Stadt [92]. Andererseits führen vor allem unkontrollierte Verkehrsströme im Straßenverkehr durch Feinstaub und Verbrennungsrückstände zu erheblichen Gesundheitsbelastungen und Einschränkungen der Mobilität. Beispielsweise führen die Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland im Vergleich zu Verkehrsunfällen zu doppelt so vielen Todesopfern [68]. Insbesondere erhöht der durch VKM-angetriebene Pkw emittierte Feinstaub das Risiko deutlich, an Krebs zu sterben [121]. Extreme Entwicklungen zeigen sich in Asien: Unterstützt durch häufige Inversionswetterlagen übersteigt die Feinstaubbelastung in Peking den von der Europäischen Union festgesetzten Grenzwert von 25 µg/m³ mehrmals im Jahr um den Faktor zehn [104]. Aus diesem Grund werden temporäre Fahrverbote für den Individualverkehr verhängt [51].

Werden Städte als ganzheitliches Ökosystem betrachtet, sind diese Zahlen Handlungsaufforderung. Im Vergleich zukünftiger Städte untereinander werden „Städte (...) wettbewerbsfähig sein, welche ihre knappen Ressourcen Arbeit, Kapital, Boden und natürliche Umwelt am haushälterischsten

nutzen“ [44, S. 183]. Um die größten Einflusskategorien im Verkehrssektor zu identifizieren, wird im folgenden Abschnitt das Personenverkehrssystem zahlenmäßig vorgestellt.

2.2 Personenverkehr in Zahlen

In diesem Abschnitt wird das Verkehrssystem in Deutschland vorgestellt. Von den beiden Subkategorien Personenverkehr und Güterverkehr wird in dieser Arbeit ausschließlich der Personenverkehr, insbesondere der Personennahverkehr, betrachtet. Abbildung 2.2 gibt eine vollständige Aufschlüsselung nach Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung des Personenverkehrs für das Jahr 2010 in Deutschland. Herausgestellt sind die vier für diese Arbeit besonders relevanten Modalitäten Fuß, Fahrrad, Öffentlicher Verkehr (ÖV) und MIV. Für die Unterteilung des MIV in Nah- und Fernverkehr wird nach den Zahlen aus [34] ausschließlich der Verkehrszweck *Urlaub* dem Fernverkehr zugeordnet, die anderen Verkehrszwecke werden hingegen als Nahverkehr interpretiert.

Es ist ersichtlich, dass mehr als 67 % aller Wege des Personenverkehrs in Deutschland motorisiert zurückgelegt werden [34] (Quelle auch für folgende Zahlenwerte). Das höchste Verkehrsaufkommen innerhalb des motorisierten Verkehrs zeigt der MIV mit 83 %, wovon mehr als 99 % Nahverkehr sind. Dies entspricht dem annähernd Fünffachen des Verkehrsaufkommens des ÖV. Öffentlicher Straßenpersonenverkehr (ÖSPV), welcher die Transportmittel Stadtschnellbahn, Straßenbahn und (Kraft-)Omnibus zusammenfasst, steht auf der Seite des öffentlichen Verkehrs nach dem MIV bei 13,5 %. An dritter Stelle folgt der Eisenbahnverkehr mit 3,6 % des Verkehrsaufkommens. 99 % des Linienverkehrs des ÖSPV ist Linien-Nahverkehr. Hinsichtlich des Verkehrsaufkommens der Eisenbahn zeigt sich ein ähnlicher Zustand: Dort entspricht der Anteil des Fernverkehrs ca. 5 %. Zusammenfassend übernahm im ÖV der Nahverkehr im Jahr 2010 mit 11,5 Mrd. Wegen 98 % des Verkehrsaufkommens.

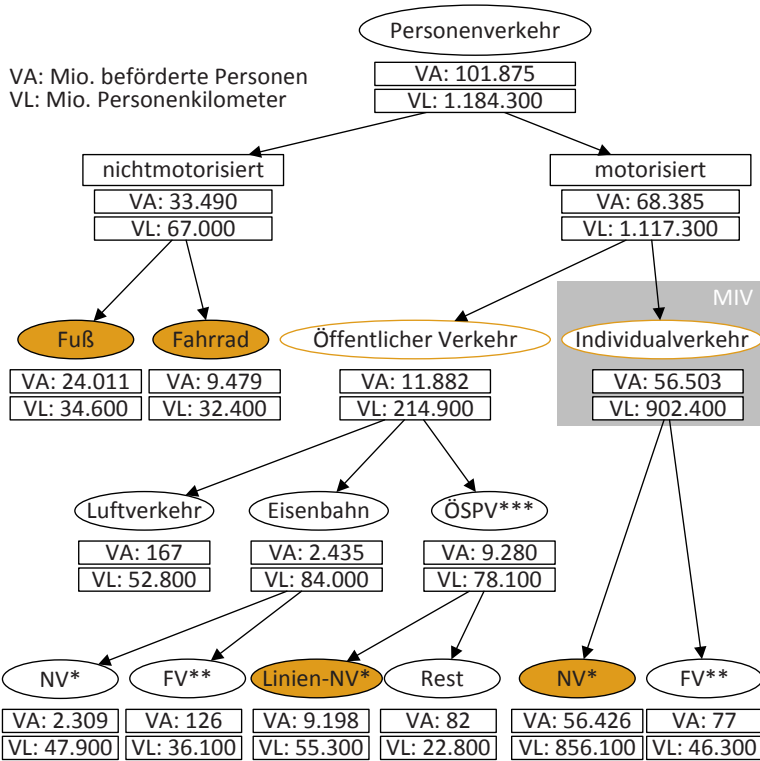


Abbildung 2.2: Verkehrsaufkommen (VA) und Verkehrsleistung (VL) im Personenverkehr in Deutschland im Jahr 2010. Farblich hervorgehoben sind die in dieser Arbeit untersuchten Verkehrsmittel. Grau unterlegt ist der MIV als größte Kategorie. *Nahverkehr, **Fernverkehr, ***Öffentlicher Straßenpersonenverkehr. Quelle: [34].

Der Vergleich der Verkehrsleistung in Personenkilometern (Pkm) nach Abbildung 2.2 zeigt ein ähnliches Bild. Obgleich nicht an Linien gebundener Verkehr im ÖSPV und auch der Fernverkehr der Eisenbahn große Teile der motorisiert zurückgelegten Verkehrsleistung beanspruchen, hat der Nahverkehr des MIV mit 77 % überragende Bedeutung. 64 % der Personenkilometer werden heutzutage im urbanen Umfeld zurückgelegt.

Ferner wird angenommen, dass sich bis zum Jahr 2050 die Summe der städtischen Personenkilometer verdreifachen wird [9]. Wegen der zunehmenden Verstädterung und dem hohen Anteil des Nahverkehrs am MIV werden im Folgenden die Bewegungsmuster der Bevölkerung in urbanen Gebieten untersucht. Dazu wird die Mobilität innerhalb einer relativ homogenen Bevölkerungsgruppe analysiert. Im Rahmen der 2008 in Deutschland durchgeführten Studie „Mobilität in Deutschland“ [56], können Aussagen zu den Bewegungsmustern, der Wegezanzahl und täglichen Strecke einer jeweiligen Lebenszyklusgruppe bezogen auf einen Stichtag getroffen werden. Abbildung 2.3 gibt dazu eine Übersicht.

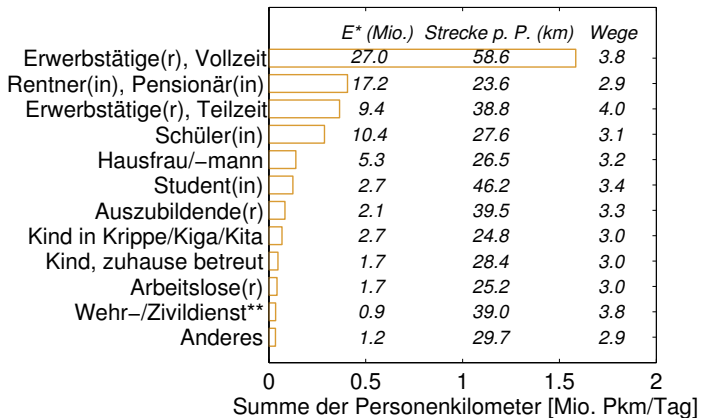


Abbildung 2.3: Durchschnittliche Verkehrsleistung in den Lebenszyklusgruppen bezogen auf einen Stichtag. *Einwohner, **inklusive Erziehungsurlaub. Quelle: [56].

Aus der Darstellung lassen sich mehrere Schlüsse für die vorliegende Arbeit ziehen. Es wird deutlich, dass nur vier Bevölkerungsgruppen nahe oder mehr als 10 Mio. Einwohner beinhalten. Diese vier Gruppen verursachen 82 % aller durchgeführten Wege. Mit über 1,5 Mio. Pkm stellen die Erwerbstätigen in Vollzeit die zentrale Gruppe im Verkehrsgeschehen dar. Es ist zudem ersichtlich, dass die Strecken, welche durchschnittlich pro Person

am Stichtag im Tagesverlauf zurück gelegt werden, zwischen 23,6 km und 58,6 km liegen. Abschließend variiert die Anzahl der Wege zwischen den Lebenszyklusgruppen nicht bedeutend, sondern schwankt zwischen drei und vier. Die Ableitungen für die umfassende Integration eines weiteren Transportsystems für den Personennahverkehr lauten damit:

- Das Einsatzgebiet sollte so zugeschnitten sein, dass einzelne Beförderungsanfragen bis 50 km Distanz regulär bedient werden können, der Schwerpunkt jedoch auf deutlich kürzeren Einsatzdistanzen liegt.
- Die Verkehrsnachfrage von Erwerbstätigen, Rentnern/Pensionären und Schülern sollte priorisiert werden.
- Für jeden Einwohner des Einsatzgebietes können 3-4 Wege pro Person pro Tag innerhalb des Einsatzgebietes angenommen werden.

Erreicht das verwendete Transportmittel hinsichtlich der Transportkapazität, der Verfügbarkeit und unter Berücksichtigung individueller Komfortpräferenzen diese drei Punkte, rücken mehr als 80 % der täglichen Wege in den Fokus. Zusammengefasst könnte mit einem Verkehrsmittel, welches in Transportqualität und Flexibilität dem MIV entspricht, das aber auf die Nachfrage der Bevölkerung präziser zugeschnitten wird, eine bedeutende Veränderung im Verkehrssystem erreicht werden.

2.3 Energieeinsatz im Verkehrssektor

Im folgenden Abschnitt wird der Energiekonsum im Verkehr in einen Gesamtkontext gestellt. Es wird herausgestellt, welche Bedeutung der Straßenverkehr mit Schwerpunkt MIV im Endenergiesektor Verkehr besitzt und in welchem Umfang erneuerbare Energie verwendet wird. Die ausschließliche Verwendung erneuerbarer, bevorzugt solarer Energie hat dabei nicht nur das Ziel, Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Ebenso bedeutend ist die Entkopplung von der Erdölwirtschaft und deren geopolitischen Folgen.

Die Gewinnung von Primärenergie ist in Deutschland seit 1990 von 6224 Petajoule (PJ) auf 4124 PJ im Jahr 2012 gesunken. Dieser Wert entspricht umgerechnet 1146 Terawattstunden (TWh). Besonders die Einstellung des Abbaus von Steinkohle hat zu diesem Rückgang der Primärenergiegewinnung geführt. Im Gegenzug haben die erneuerbaren Energieträger im gleichen Zeitraum eine Steigerung des Marktanteils von 3,2 % auf 33,4 % zu verzeichnen. Trotzdem entspricht der Anteil der in der Bundesrepublik Deutschland gewonnenen Primärenergie im Jahr 2012 nicht mehr als 31 % des Primärenergieverbrauchs. Mehr als zwei Drittel der in Deutschland konsumierten Energie werden damit importiert [6]. Im Jahr 2013 belief sich der Primärenergieverbrauch in Deutschland auf 13908 PJ. Davon entfielen 1605 PJ auf erneuerbare Energien. Im gleichen Jahr lag die Bruttostromerzeugung bei 634 TWh, von denen 152 TWh (entsprechend 23,9 %) aus erneuerbaren Energiequellen stammen bei einem Bruttostromverbrauch von 600 TWh [8] (alle Zahlenwerte).

Der Endenergieverbrauch wird in die vier Sektoren *Industrie, Haushalte, Verkehr* und *Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD)* eingeteilt. Der Gesamtendenergieverbrauch für 2013 betrug 9242 PJ, davon 2612 PJ (entsprechend 714 TWh) im Sektor Verkehr [7]. Im Vergleich der Sektoren entspricht das etwa 28 % des gesamten Endenergieverbrauchs. Der Verkehr hat damit neben dem Sektor Industrie den Spitzenplatz. Dieser Wert ist relativ konstant: Zwar ergibt sich rechnerisch für die Jahre 2000 bis 2012 eine Senkung um einige Prozentpunkte, im graphischen Zeitverlauf ist jedoch kein eindeutiger Trend zu identifizieren [6], [21].

Insgesamt betrachtet übersteigt die für Verkehr in Deutschland benötigte Endenergie (714 TWh) damit den derzeitigen Bruttostromverbrauch (600 TWh). Von der im Verkehrssektor benötigten Endenergie entfallen 1451 PJ (403 TWh) auf den MIV, so dass dieser 16 % des gesamten Endenergieverbrauchs in Deutschland beansprucht [34]. Im Speziellen wird der Einsatz von Primärenergie im Sektor Verkehr vorgestellt. In diesem Sektor entfällt mit 83 % der mit Abstand größte Anteil des Endenergieverbrauchs

auf den Straßenverkehr [5]. Insbesondere in dieser Untergruppe zeigt sich mit 93,1 % (1985 PJ aus 2133 PJ) die große Bedeutung von Mineralölen als Energieträger. Gase tragen ergänzend mit 2 % zum Konsum fossiler Ressourcen bei. Strom ist nur mit 2,3 % vertreten; dieser Wert ist der mit Abstand niedrigste innerhalb der Endenergiesektoren [5]. Im Gegensatz dazu wurden im Schienenverkehr im Jahr 2010 83 % des Personennahverkehrs und 98 % des Personenfernverkehrs elektrisch erbracht [62].

Zusammengefasst entfällt mehr als die Hälfte des Endenergieverbrauchs im Sektor Verkehr auf den MIV, für dessen Betrieb im deutschen Straßenverkehr hauptsächlich Mineralöle importiert werden. Wird der Wirkungsgrad der eingesetzten Verbrennungskraftmaschinen überschlägig mit 33 % angesetzt, dissipieren derzeit jährlich etwa 270 TWh in Deutschland allein im Straßenpersonenverkehr durch Pkw in Wärme und Abgase.

2.4 Treibhausgasemissionen im Straßenverkehr

In diesem Abschnitt werden die Treibhausgasemissionen im Straßenverkehr vorgestellt. Da Energie- und Emissionsbilanzierungen ex post auf Modellbasis erfolgen, wird zur Vergleichbarkeit das Stützjahr 2010 gewählt. Im Allgemeinen werden für Vergleiche die Emissionen der sechs durch das Kyoto-Protokoll reglementierten Treibhausgase in CO₂-Äquivalenten (CO₂e) angegeben [117]. Seit 2009 stagnieren die jährlichen Gesamtemissionen in Deutschland bei 925 Mio. t CO₂e [111], davon 836 Mio. t CO₂ [110]. Der Anteil der energiebedingten CO₂-Emissionen lag im Jahr 2010 bei 782 Mio. t [113]. Der Verkehr trägt dazu 153 Mio. t bei. Diese Zahlen berücksichtigen nur die direkten CO₂-Emissionen ohne die Emissionen in der Vorkette durch Förderung, Aufbereitung und Verteilung der Kraftstoffe. Gegenüber dem Referenzjahr 1990 liegt die CO₂-Emissionsreduktion im Bereich Verkehr bei ca. 5 % und stellt im Vergleich mit anderen Wirtschaftszweigen die mit Abstand geringste Abnahme dar. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit haben die Maßnahmen zur Umsetzung der Ener-

gewende den Verkehrssektor noch nicht erreicht. Auf den Straßenverkehr entfallen 145 Mio. tCO₂, entsprechend 95 % der Emissionen des Verkehrssektors [110]. Im Vergleich der Emittentensektoren ist der Straßenverkehr beispielsweise in Berlin jährlich für 1 t pro Einwohner verantwortlich, entsprechend 15 % der jährlichen städtischen CO₂-Emissionen [92].

Aus der Verkehrsleistung des Individualverkehrs nach Abbildung 2.2 und den spezifischen Emissionen ohne Vorkette der Pkw mit 123,3 g/Pkm ergeben sich 111 Mio. tCO₂ durch den MIV in Deutschland. Unter Anwendung des durchschnittlichen Besetzungsgrades des MIV von 1,5 ([56]) folgen daraus CO₂-Emissionen von 180 g/km für die mit fossilen Kraftstoffen angetriebene deutsche Flotte. Im Vergleich dazu liegen die CO₂-Emissionen neu zugelassener Pkw im Jahr 2013 bei 136 g/km [64]. Demgegenüber können die indirekten Emissionen eines ausschließlich batterieelektrisch angetriebenen Pkw gestellt werden. Wird der deutsche Strommix des gleichen Jahres zu Grunde gelegt, werden 559 g/kWh emittiert [55]. Mit einem gemittelten Fahrverbrauch für einen klimatisierten Durchschnitts-Pkw von 0,22 kWh/km ([47]) folgen 123 g/km, entsprechend 84 g/Pkm. Diese energiebedingten Emissionswerte stellen nur einen Ausschnitt der ganzheitlichen Treibhausgasbilanzierung von Pkw dar. Werden zusätzlich die Kraftstoffbereitstellung und die Fahrzeugherstellung, -entsorgung und Wartung berücksichtigt, ist der Einsatz elektrischer Pkw im Jahr 2016 in der Emissionsbilanz nicht wesentlich vorteilhafter als der Einsatz herkömmlich angetriebener Pkw [60]. Erst ein veränderter Strommix hin zu erneuerbaren Energien führt zu Vorteilen in ganzheitlicher Perspektive.

Gegenüber dem MIV hat der ÖPNV eine vorteilhafte personenbezogene Emissionsbilanz. Für das Jahr 2010 weist das Umweltbundesamt für Linienbusse im Nahverkehr 75 g/Pkm und für Straßen-, S- und U-Bahnen 78,1 g/Pkm aus [110]. Das öffentlich gezeichnete Bild *umweltfreundlicher* Verkehrsmittel [112] und die Verstärkung des Anspruches durch die Nahverkehrsnetzbetreiber, einen *ökologischen* Transport anzubieten, beispielsweise durch die Wahl einer *Umweltkarte* [17], ist jedoch nur in

relativer Betrachtung zulässig und insgesamt unvollständig. Nicht elektrifizierte Busse konsumieren fossile Kraftstoffe zur Traktion. Stammt der Strom rein elektrischer Bahnsysteme oder Busse aus Verbrennung fossiler Energieträger, erzeugen auch diese Verkehrsleistungen Emissionen.

Für die Umsetzung der *Energiewende* sind seitens der Deutschen Bundesregierung bis zum Jahr 2050 quantitative Ziele festgeschrieben worden. Für das Themenfeld dieser Arbeit liegen geschlossen verbindliche Werte für das Jahr 2040 vor. Bis zu diesem Jahr sollen 70 % der Treibhausgasemissionen gegenüber dem Referenzjahr 1990 gesenkt werden. Erneuerbare Energie soll dabei einen Anteil von mindestens 65 % am Bruttostromverbrauch erreichen und der Anteil am Bruttoendenergieverbrauch bei 45 % liegen. Der Verkehrssektor hat für das Jahr 2040 eine Reduktion des Endenergieverbrauchs um 40 % gegenüber 1990 als Zielwert erhalten [23].

Die Kosten des Übergangs zu einer vollständigen Versorgung mit erneuerbarer Energie in Deutschland im Jahr 2050 werden mit 1 200 Mrd. € beziffert, entsprechend 30 Jahren mit jährlich 40 Mrd. € [43]. Dabei wird einerseits angenommen, dass durch Effizienzsteigerungen der Primärenergieverbrauch von 3 500 TWh im Jahr 2010 auf 1 750 TWh im Jahr 2050 sinkt. Der zukünftige Strombedarf für Deutschland wird mit 1 000 TWh beziffert, von welchen 120 TWh den Endenergiesektor Verkehr darstellen. Demgegenüber stehen die Ergebnisse einer Rückrechnung zur Erfüllung der Treibhausgasemissionszielwerte der Energiewende im Jahr 2050, welche die gesamte Stromnachfrage des Verkehrssektors mit 67 TWh beziffern [36].

Unter Berücksichtigung der Verkehrsleistung des MIV, dem aktuellen Einsatz von Primärenergie und den resultierenden Treibhausgasemissionen wird die Rolle des Personennahverkehrs als maßgeblicher Hebel im Erreichen der Klimaziele aufgezeigt. [36] führt an, dass eine Abkehr des derzeitigen Mobilitätsverhaltens für das Erreichen der klimapolitischen Zielsetzungen benötigt wird. Im Folgenden wird daher die bestehende Struktur des über Jahrzehnte gewachsenen MIV-Systems als zentraler Baustein des Nahverkehrs in Deutschland und existierende Schwächen vorgestellt.

2.5 Motorisierter Individualverkehr in Deutschland

Aufgrund des hohen Bedarfs an fossiler Primärenergie und der Treibhausgasemissionen wird in diesem Abschnitt der MIV in den Mittelpunkt gestellt. Die Marktposition der Individualmobilität spiegelt die Bedeutung der Entscheidungsfreiheit und der logistischen Einfachheit bei der Verrichtung eines Weges wider. Es wird davon ausgegangen, dass zukünftig auch unter Einsatz von Anreizen von diesem Grundmuster nicht abgewichen wird. In diesem Abschnitt wird nach einer Analyse der Auslastung der Fahrzeuge im Vergleich mit anderen Verkehrsmitteln das Potential zur Steigerung der Auslastung durch elektrisches Carsharing aufgezeigt.

2.5.1 Auslastung der Fahrzeuge

In diesem Abschnitt wird die aktuelle Auslastung des MIV, des ÖPNV und des Taxibetriebs in Deutschland vorgestellt. Analysen des europäischen Fahrzeugmarktes der Deutschen Bank geben für 239 Mio. Pkw im Jahr 2010 ein Durchschnittsalter von 8,3 Jahren und eine technische Lebenserwartung von 16,6 Jahren an [46]. Der jährliche erscheinende Tabellenband *Verkehr in Zahlen* weist als Letztwert für das Jahr 2006 das durchschnittliche Stilllegungsalter der Pkw in Deutschland mit 12,0 Jahren aus - dieser Wert hat sich seit 1995 nicht bedeutend verändert [34]. Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Jahresfahrleistung von 14 200 km [34] ergibt sich mit einem Stilllegungsalter zwischen 12,0 und 16,6 Jahren eine Gesamtfahrleistung in der Spanne von 170 400 km bis 235 720 km.

Im städtischen Europa liegen die niedrigsten, durchschnittlichen Verkehrsflussgeschwindigkeiten im Straßenverkehr zwischen 19 km/h und 35 km/h [102]. Unberücksichtigt bleibt bei dieser Erhebung die Verteilung auf die Verkehrsmittel und die relative Häufigkeit von verkehrsberuhigten- oder Tempo-30-Zonen [84]. Unter der Annahme von 30 km/h als durchschnittliche Verkehrsflussgeschwindigkeit und 14 200 km Jahresfahrleistung

werden Pkw derzeit im städtischen Europa jährlich 473 h gefahren. Auf 8760 h des Jahres entspricht dies als Resultat einem Standanteil von 95 %. Bei gleicher Verkehrsleistung zieht eine weitere Erhöhung der Verkehrsgeschwindigkeit einen zunehmenden Standanteil nach sich.

Diese Zahl ist als Durchschnittswert zu interpretieren: Fahrzeuge für regelmäßige berufliche Wege oder der Verteilungsverkehr von Gütern mit Pkw für private Nutzer haben höhere Auslastungen. Demgegenüber stehen jedoch auch Fahrzeuge, welche nicht einmal 5 % des Jahres bewegt werden, beispielsweise Zweitfahrzeuge. Würde ein heute in Verkehr gebrachter Pkw mit den Rahmendaten aus diesem Abschnitt mit einer Auslastung von 100 % gefahren werden, hätte er die Gesamtfahrleistung von 170400 km nach 237 Tagen erreicht. Eine schematische Darstellung des Verhältnisses Standzeit zu Fahrzeit für die gesamte Flotte gibt Abbildung 2.4.

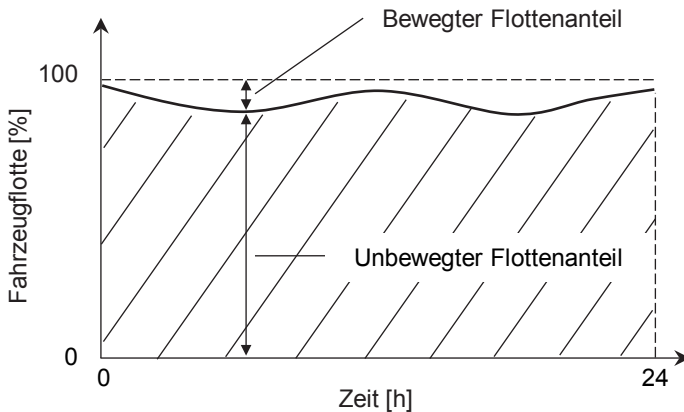


Abbildung 2.4: Qualitative Darstellung der Auslastung der derzeitigen Pkw-Flotte im Tagesverlauf mit angedeuteten Nachfragespitzen am Morgen und Abend.

Der abgebildete Verlauf stellt einen werktäglichen Ablauf mit morgendlicher und abendlicher Nachfragespitze dar. Deutlich erkennbar ist der große Anteil der nicht bewegten Flottenteilnehmer. Diese parkende Masse reprä-

sentiert die „Flexibilität“ in der Individualmobilität. Nur der bewegte Flottenanteil erbringt Verkehrsleistung. Das Produkt der momentanen Leistung des Maschinenparks mit der Zeit stellt die verrichtete Arbeit und damit auch das Emissionsprofil dar. Daraus ist ersichtlich, dass die durch den Verkehr entstehenden externen Kosten tageszeitabhängig sind.

Gegenüber dem MIV hat der ÖPNV durch geplante Fahrten und Taktung eine höhere Auslastung und ermöglicht einen durch einen Fahrer gesteuerten Ortswechsel. Die zum Abfahren des festen Fahrplans benötigte Flotte wird nach dem ökonomischen Abwägungsmuster *Flottengröße gegenüber Auslastung* dimensioniert. Durch Anforderungen unterschiedlicher Interessensgruppen an den Nahverkehrsbetreiber tritt hinsichtlich der Verbesserung der Auslastung jedoch ein struktureller Nachteil im ÖPNV auf. So wird der Leitsatz effizienter Beförderung in einer Transportkette verletzt: „Lass(e) nie einen Passagier in ein Transportmittel, ohne sein (genaues) Ziel zu kennen“ [31]. Die *Berliner Verkehrsbetriebe* (BVG) geben für das Jahr 2013 eine Auslastung des Linienverkehrs von 17,8 % an [16].

Dieser Abschnitt schließt ab mit einer zahlenmäßigen Erfassung des Taxiwesens in Deutschland für eine spätere Vergleichbarkeit mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Transportsystem für den Nahverkehr. Wesentlich für die Beurteilung ist die Feststellung, dass das Taxiwesen stadtspezifisch ist und es keine von der Stadt unabhängige, gleichartige Nachfrage gibt [70]. Ergänzend hat der Betriebstyp, die Personalintensität und die Flottengröße auf die Jahresfahrleistung und den Erlös Auswirkung. Für einen Vergleich der Nachfrage wird die „Taxi-Dichte“ herangezogen, welche die Anzahl der Einwohner pro Taxi kennzeichnet. Grundsätzlich nimmt diese Dichte mit steigender Einwohnerdichte zu: In Hamburg wohnen durchschnittlich 510 Einwohner pro Taxi, in Berlin sind es 473 Einwohner [32]. Umgekehrt sinkt die Fahrleistung durch einen höheren Anteil kürzerer Wege, je städtischer und damit kleinräumiger ein Gebiet ist [70]. In Tabelle 2.1 sind charakteristische Zahlen des Stuttgarter Taxigewerbes herausgestellt. Diese werden als leicht unterdurchschnittlich ausgewiesen. So wird ein spezifi-

scher Umsatz von 0,92 €/km als branchenüblich herangezogen. Für zeitlich hoch ausgelastete Fahrzeuge kann in Hamburg eine Auslastung von etwa 40 % angenommen werden. Die Jahresfahrleistung erreicht ihren Spitzenwert in Ludwigshafen mit knapp 100 000 km [70].

Jahresfahrleistung	55 100 km
Jahresumsatz (netto)	47 000 €
Spezifischer Umsatz	0,85 €/km
Besetzkilometer	49 %
Schichtanteil	46 %
Zeitliche Auslastung	29 %
Spezifische Kosten	0,67 €/km

Tabelle 2.1: Auf ein Fahrzeug bezogene Kennwerte des Taxibetriebs in Stuttgart.
Quelle: [70].

Für das Verständnis von Tabelle 2.1 muss berücksichtigt werden, dass die Definition der Auslastung auch unbezahlte Anfahrten zu den Passagieren beinhaltet. Es ist ersichtlich, dass der jährliche Überschuss pro Fahrzeug auch im gewerblichen Betrieb mit 9 300 € sehr niedrig ist.

Zusammenfassend wird in dem heutzutage vorrangig durch fossile Ressourcen angetriebenen MIV durch fehlende Einsatzplanung das Zwanzigfache der tatsächlich benötigten Verkehrskapazität vorgehalten. Als Markt mit vorrangig privaten Konsumenten resultieren daraus sichtbare, marktwirtschaftliche Entwicklungen hinsichtlich der mindestens benötigten Haltbarkeit der Fahrzeuge und nachgelagerten Servicemodellen. Die Auslastung im Taxiwesen ist deutlich höher als im MIV, zeigt jedoch aufgrund der Abhängigkeit von Fahrern und dem zu Grunde liegenden Marktmodell ebenso erhebliches Entwicklungspotential. Mit dem in Kapitel 3 vorgestellten Modell eines autonomen Verkehrsmittels für den Personennahverkehr soll bei

gleicher Transportqualität eine deutliche Zunahme der durchschnittlichen Flottenauslastung aufgezeigt werden.

2.5.2 Raumbedarf des motorisierten Individualverkehrs

Im folgenden Abschnitt wird anhand typischer Werte der deutschen Pkw-Flotte der Raumbedarf des ruhenden und fließenden MIV untersucht. Durchschnittlich liegt der Fahrzeugbestand in Deutschland bei 550 Pkw je 1000 Einwohner [65]. Im relativen Vergleich der Bundesländer liegt der Bestand in Flächenstaaten zwischen 500 und 600 Pkw, gegenüber den drei Stadtstaaten mit 399 Pkw im Durchschnitt pro 1000 Einwohner. Berlin als größte Stadt weist dabei mit 341 Pkw je 1000 Einwohner den geringsten Wert auf. Wird hingegen die absolute Fahrzeuganzahl bezogen auf die Fläche herangezogen, stehen in den Flächenstaaten nur zwischen 36 Pkw/km² (Mecklenburg-Vorpommern) und 278 Pkw/km² (Nordrhein-Westfalen). Für Berlin sind es 1309 Pkw/km². In der Literatur wird angenommen, dass jeder Pkw durch die Ortsveränderung innerhalb eines Tages 1,7 Stellplätze und insgesamt 24 m² beansprucht [91]. Für hochverdichtete, städtische Räume wie den Prenzlauer Berg in Berlin, können 86 % der Stellplätze im öffentlichen Raum verortet werden [71]. Werden diese Zahlen miteinander kombiniert, benötigen 1125 ruhende Pkw auf einem städtischen Quadratkilometer im öffentlichen Raum zusammen 2,7 % der Bruttostadtfläche. Diese Zahl verdeutlicht das Ausmaß des Raumkonsums unbewegter Fahrzeuge.

Neben der geringen Auslastung und der Platzverschwendung im ruhenden Zustand haben die überdimensionierten Pkw auch negative Auswirkungen auf den Flächenbedarf im fließenden Verkehr. Abbildung 2.5 gibt dazu eine Übersicht für verschiedene Verkehrsmittel pro Person [91]. Für die graphische Aufbereitung der Flächen zueinander wird das Verhältnis von Länge zu Breite der durch den Verkehrsteilnehmer verwendeten Verkehrsfläche mit 2:1 angenommen. Für den Zielwert wurde das arithmetische Mittel der Zahlenwerte der Quellenangabe gebildet und der Besetzungsgrad mit

1,5 Personen pro Pkw angesetzt [56]. Die Vorteile des ÖPNV aufgrund der höheren Besetzungsgrade der transportierten Personen sind ersichtlich. Der Pkw zeigt die mit Abstand höchste Belastung der Infrastruktur und fällt deutlich in dieser Darstellung auf.

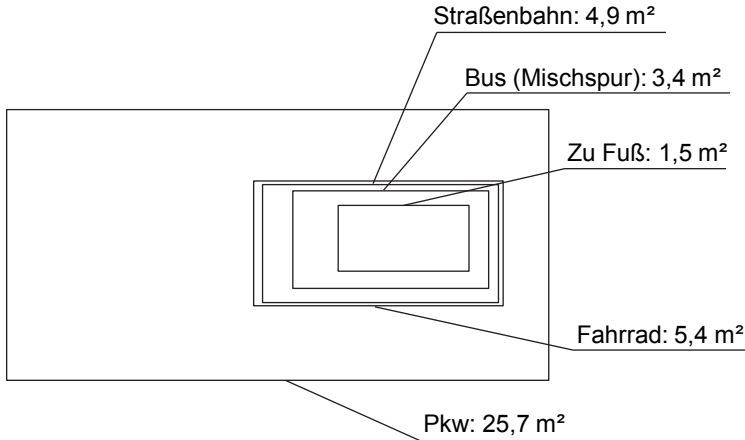


Abbildung 2.5: Verkehrsfläche pro Person im fließenden Verkehr. Quelle: Darstellung nach Zahlen aus [91].

Die Darstellung des Raumkonsums in einer Stadt durch den MIV wird um die Betrachtung der benötigten bewegten Masse pro Person ergänzt. Wird das durchschnittliche Leergewicht eines Pkw der Kompaktklasse mit 1374 kg angesetzt [103], werden für die individuelle Ortsveränderung einer einzelnen Person ohne Eigengewicht 916 kg benötigt. Zusammenfassend wurde gezeigt, dass der MIV neben der Komponente der zeitlichen Auslastung (vgl. Abschnitt 2.5.1) hinsichtlich des Flächenbedarfs und der benötigten, spezifischen Masse zum Personentransport erhebliches Entwicklungspotential besitzt. Insbesondere der ruhende Verkehr könnte durch präzisen Zuschnitt des Beförderungsangebotes vermieden werden.

Der ineffiziente Energieeinsatz, die resultierenden Treibhausgasemissionen und die hohe spezifische Masse eines herkömmlichen Pkw verursachen

aus volkswirtschaftlicher Sicht negative externe Effekte. Ebenso stellt der Raumbedarf einen negativen externen Effekt dar, welcher selbst bei elektrifiziertem, erneuerbar gespeistem Antrieb durch die ausschließliche Bepreisung der Beförderungsleistung nicht internalisiert wird. Exemplarisch können die volkswirtschaftlichen Kosten und der Zeitverlust durch Stau im Straßenverkehr herangezogen werden. In [24] werden diese Zahlen auf Basis europäischer Verkehrsdaten bestimmt: Mit 38 Stunden im Stau pro Jahr und Pkw belegt Deutschland im europäischen Vergleich den dritten Platz hinter Belgien und den Niederlanden. Es wird prognostiziert, dass die direkten und indirekten Kosten durch Stau in Deutschland von 25 Mrd. € im Jahr 2013 auf 33 Mrd. € im Jahr 2030 ansteigen werden. Dies entspricht in etwa einem Prozentpunkt des jährlichen deutschen Bruttoinlandsprodukts [105]. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit wird das Potential einer individuellen Personenbeförderung nicht ausgeschöpft. Stattdessen werden die realen gesellschaftlichen Kosten, die durch die Ineffizienzen des MIV-Systems entstehen, nicht verursachergerecht getragen. Die aktuelle Situation des MIV zeigt eine „Zukunftsblindheit der Marktwirtschaft“ [98]. Diese äußert sich darin, dass eine gegenwärtig günstige Lösung einer zukünftig günstigeren Lösung vorgezogen wird.

Im Vergleich mit der Individualmobilität ist der Nachteil des heutigen ÖPNV, dass nicht die individuellen Bedürfnisse nach Komfort, Platz und Abstand zu den Mitmenschen berücksichtigt werden können. Ergänzend sind die Orte des Zu- und Ausstiegs festgelegt, so dass eine niedrigere Praktikabilität existiert. Die Nachteile des MIV liegen in der Verwendung fossiler Energieträger und dem unpräzisen Zuschnitt des eingesetzten Beförderungsmittels zum tatsächlichen Beförderungsaufwand. Die Vorteile des ÖPNV sind eine effiziente Nutzung der Verkehrswege, ein höherer Grad der Elektrifizierung und der regelmäßige Ablauf. Der MIV auf der anderen Seite ermöglicht die Wahl persönlicher Präferenzen und das gewünschte Maß an Komfortabilität und Flexibilität. Es wird ein Nahverkehrsmittel benötigt, welches die Vorteile des MIV mit den Vorteilen des ÖPNV kombiniert.

Dieses Verkehrsmittel muss vor allem auf die tatsächliche Transportaufgabe zugeschnitten sein, so dass keine Überdimensionierung hinsichtlich des Fahrzeuges oder seiner Präsenz im fließenden Verkehr auftritt.

2.5.3 Elektrisches Carsharing

Allgemein wird die sich vollziehende Weiterentwicklung von Märkten mit ausgeprägten Eigentümerstrukturen hin zu Zweckbündnissen auf Grundlage effizienterer Verwendung von Gütern unter dem Begriff „Ökonomie des Teilens“ (engl. *Shared Economy*) zusammengefasst [101]. Der Wechsel des Konsumverhaltens ist Gegenstand Technologie-unabhängiger, theoretischer Diskurse [86]. Hinsichtlich der Marktmodelle geteilter Güter ist für die vorliegende Arbeit die Entwicklung im Fahrzeugmarkt relevant. Werden Pkw nur noch für kurze Zeiträume besessen, anstatt für einen längeren Zeitraum in Privateigentum zu sein, wird der Begriff Carsharing verwendet. Im Speziellen werden nicht an feste Rückgabestationen gebundene Konzepte als Free-Floating-Carsharing (FFCS) bezeichnet.

Die nachfolgend aufgeführten Werte sind das Ergebnis einer Studie zu FFCS in Berlin ([28]) auf Basis der Nachbildung von 18 Mio. Anmietungen [27]. Die Ergebnisse zeigen, dass 50 % der Fahrten kürzer als 5 km sind bei einer mittleren Reiseweite von 5,8 km und die Tageslastspitze am Abend nach Beendigung des täglichen Berufsverkehrs auftritt. Die zeitliche Auslastung der Fahrzeuge liegt mit durchschnittlich 62 Minuten am Tag hinter ÖPNV und Taxi. Der modale Anteil im Vergleich der Wege liegt bei 0,1 %, so dass keine verkehrliche Relevanz von FFCS in Berlin erkennbar ist. Wird die mittlere Reiseweite verrichtet, entstehen dem Nutzer je nach Anbieter Kosten für einen einzelnen Einsatz zwischen 4 € und 5 €. Da der hohen Verfügbarkeit der Fahrzeuge keine koordinierte Verkehrsnachfrage gegenübergestellt ist, schwanken die Erlöse eines Tages je nach Anbieter zwischen 7 € und 24 € pro FFCS-Fahrzeug in Berlin. Insgesamt werden für FFCS in Berlin Umsatzerlöse von 14 Mio. € ausgewiesen. Das Gesamtvolumen des

Berliner Mobilitätsmarktes beträgt 4,8 Mrd. € [28] und die Konzernumsatzerlöse der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) betragen 741 Mio. € [16]. Im Verhältnis zum Gesamtmarkt sind die Umsatzerlöse aus FFCS damit sehr gering und deutlich unter denen des ÖPNV. Zusammengefasst wird FFCS in Berlin als Ausweitung des Mobilitätsmarktes und nicht als Substitution anderer Verkehrsmittel betrachtet [27].

Hinsichtlich der Bruttoerlöse einer einzelnen Fahrt werden für Berlin je nach FFCS-Anbieter zwischen 0,65 €/km und 0,75 €/km festgestellt [28]. Die Zahlungsbereitschaft der Kunden liegt je nach Tarif und Anbieter zwischen 0,20 €/min und 0,34 €/min. Bisherige Forschungsbeiträge nehmen an, dass für den Einsatz von SAEV ohne Schnellladen Preise zwischen 0,41 €/km und 0,54 €/km verlangt werden müssen ([25], Umrechnung mit einem Wechselkurs von EUR/USD 1,15). Bei einer Verkehrsflussgeschwindigkeit von 29 km/h entspricht das zwischen 0,20 €/min und 0,27 €/min und liegt damit im Preisniveau günstiger FFCS-Anbieter. Die Betrachtung der Zahlungsbereitschaft kann um eine monetäre Bewertung der Opportunitätskosten eines Verkehrsteilnehmers bei Ausübung der Mobilität erweitert werden. Der Wert der Zeit (engl. Value-of-Time (VoT)) entspricht der Geldmenge, die ein Verkehrsteilnehmer bereit ist zu entrichten, um Zeitverluste zu kompensieren [52]. Für deutsche Städte wird ein VoT-Wert von 0,13 €/min vorgeschlagen [26]. [52] schlägt ferner vor, zukünftig den VoT nach Person, Fahrtzweck und Tageszeit zu unterscheiden. Bei Betrachtung einer räumlich verteilten Flotte von FFCS-Fahrzeugen stellt die derzeit benötigte Laufdistanz zum nächsten freien Fahrzeug noch Suchkosten dar, welche Teil der VoT sind.

Im Folgenden wird untersucht, ab welcher Laufleistung und welcher zeitlichen Nutzungsdauer FFCS vorteilhaft gegenüber dem privaten Besitz eines Pkw ist. Unabhängig vom Marktmodell lautet die utilitaristisch geprägte Nachfrage eines Passagiers: „Wie schnell, zu welchen Kosten und mit welchem Reisekomfort kann der nächste Weg zurückgelegt werden?“. Demgegenüber lautet die Zielsetzung der unternehmerischen Angebotsseite: „Mit

welchem Einsatz an Fahrkapazität kann bei maximalem Saldo einem Kunden die nachgefragte Wegstrecke angeboten werden?“. Für die Zahlungsbereitschaft für FFCS wird in der Vergleichsrechnung ein Mittelwert von $0,27 \text{ €/min}$ verwendet, bei einer angenommenen Verkehrsflussgeschwindigkeit $v = 8 \text{ m/s}$, entsprechend etwa 29 km/h als gewichtetes Mittel ausgewählter, europäischer Großstädte nach [84]. Aus diesen Zahlen resultiert für FFCS eine auf die Distanz bezogene Zahlungsbereitschaft von $0,56 \text{ €/km}$.

Die Kosten für einen privaten Pkw variieren stark nach Anschaffungspreis, Nutzung und Fahrverhalten, so dass kein allgemeiner Wert herangezogen werden kann, sondern für die Kompaktklasse ein Band herausgestellt wird. Für den Fall einer vollständigen Eigenfinanzierung als günstigste Variante und einer Lebensdauer von 12,4 Jahren weist [85] für ein durchschnittliches Modell der Kompaktklasse ohne Berücksichtigung externer Effekte $0,29 \text{ €/km}$ Gesamtkosten aus (458 €/Monat). Dieser Wert wird im Folgenden als minimale Zahlungsbereitschaft verwendet. Der Allgemeine Deutsche Automobil-Club e. V. (ADAC) setzt für das gleiche Fahrzeugsegment bei einer Haltedauer von 2 Jahren und einer jährlichen Fahrleistung von 15000 km Gesamtkosten von $0,45 \text{ €/km}$ (563 €/Monat) an [2]. Dieser Wert wird im Folgenden als maximale Zahlungsbereitschaft verwendet. Höherpreisige Fahrzeuge in übergeordneten Fahrzeugsegmenten können Gesamtkosten zwischen $0,60 \text{ €/km}$ und $1,20 \text{ €/km}$ erreichen [1]. Diese Fahrzeugsegmente werden nicht berücksichtigt. In Tabelle 2.2 sind als mittlere Werte zwischen Minimum und Maximum für die jährliche Fahrleistung eines Pkw 16500 km und monatliche Kosten von 510 € gewählt. Diese gegenüber [34] leicht erhöhte Jahresfahrleistung stellt aus der Sicht eines privaten Pkw-Eigentümers einen wirtschaftlich besseren Fall dar und sichert damit die für FFCS abgeleiteten Werte ab. Im Ergebnis ist ersichtlich, dass die Zahlungsbereitschaft für den privaten Besitz eines Pkw zwischen $0,14 \text{ €/min}$ und $0,22 \text{ €/min}$ liegt. Aus dem Fahrpreis für FFCS resultiert damit für den gewählten Wert bei Kostenparität des Nutzers ein tägliches Distanzbudget von 30 km und ein Zeitbudget von 63

Minuten Fahrzeit. Auf das Jahr bezogen entspricht das etwa 11000 km, welche zu gleichen Kosten mit FFCS zurückgelegt werden können. Bei Vernachlässigung spezieller Tarifierungen oder Einschränkungen durch Geschäftsgebiete kann Folgendes verallgemeinert werden: Unter diesen Schwellwerten ist aus ökonomischer Sicht der Verzicht auf einen Pkw sinnvoll, darüber ist Carsharing unvorteilhafter. Würde die Verkehrsflussgeschwindigkeit auf mindestens 43 km/h steigen, könnte zu gleichen Kosten mit FFCS eine höhere Fahrleistung als mit einem Pkw erreicht werden.

Parameter	Einheit	min. ZB*	Wahl	max. ZB*
<i>Privater Pkw</i>				
Kosten je Betriebstag	[€]	15,3	17,0	18,8
Tägliche Fahrleistung	[km]	52	45	41
Tägliche Fahrzeit	[min]	107	94	85
Zahlungsbereitschaft	[€/min]	0,14	0,18	0,22
<i>Carsharing</i>				
Tägliches Distanzbudget	[km]	27	30	34
Tägliches Zeitbudget	[min]	57	63	69

Tabelle 2.2: Budgets für Free-Floating Carsharing mit einem Preis von 0,27 €/min abgeleitet aus den Kosten für einen privaten Pkw. *ZB: Zahlungsbereitschaft. Quellen: [85] (min.), [2] (max.) und [84] (Verkehrsfluss).

Neben der Aufnahme des Ist-Zustandes werden im Folgenden systemische Schwächen von FFCS in Deutschland vorgestellt. In [27] wird argumentiert, dass durch FFCS Wegstrecken substituiert werden, welche üblicherweise mit dem Fahrrad zurückgelegt werden. Der Einsatz von FFCS entspricht „motorisierter Bequemlichkeitsmobilität im Nahbereich“ und stellt keine Lösung auf der Suche nach einer für die Stadt verträglichen Mobilität dar [28]. Der Zuschnitt eines starren Geschäftsgebiets ist aus Kundensicht

ein Nachteil gegenüber der freien Distanzwahl eines Taxipassagiers. Im Geschäftsgebiet müssen zudem Parkplätze zum zwischenzeitlichen Abstellen der Fahrzeuge vorgehalten werden. Aus klimapolitischer Perspektive ist die noch fehlende Kostenparität von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb gegenüber VKM-angetriebenen Fahrzeugen ein Nachteil [50]. Als vorrangig durch die Automobilhersteller getriebene Märkte sind die Fahrzeuge der ersten Generation von FFCS meistens VKM-angetriebene Serienfahrzeuge, bei welchen eine Kommunikationsschnittstelle nachgerüstet worden ist. Diese Fahrzeuge sind für keinen anderen Betrieb als herkömmliche Pkw ausgelegt. Insbesondere existiert noch kein elektrisches Fahrzeug, welches mit den Anforderungen durch eine hohe Auslastung konstruiert wurde. Abschließend wird in eigengesteuerten Fahrzeugen das Anfassen von Bedienelementen benötigt, so dass über mehrere Nutzer hinweg individuell wahrgenommene Hygiene und Sauberkeit die Qualität des Transports beeinflussen können.

Zusammengefasst besitzt FFCS zwar grundsätzlich erhebliches Potential, bei gleicher Verkehrsleistung durch eine verbesserte Auslastung die Flottengröße zu reduzieren und durch elektrischen, erneuerbar gespeisten Antrieb lokale Emissionen zu vermeiden. Der derzeitige Einsatz zeigt jedoch auch, dass weder dieses Potential ausgeschöpft wird, noch FFCS heutzutage eine Lösung bei der Suche nach stadtverträglicher Mobilität darstellt. Durch eine systematische Verkehrsraumplanung und die Verwendung von autonom eingesetzten Fahrzeugen könnten die aufgeführten Nachteile des FFCS vermieden und das eigentliche Kundenbedürfnis effizienter abgearbeitet werden. Hinsichtlich der vorgestellten Umsatzerlöse ist es ausserdem fraglich, ab welchem Grenzpreis sich der Einsatz eines autonomen Fahrzeugs betriebswirtschaftlich lohnt. Wird die Versorgungsaufgabe mit Mobilität ganzheitlich geplant, könnte auch das lokale Energiemanagement integraler Bestandteil des Gesamtsystems werden.

2.6 Zwischenfazit

Zusammenfassend wurde in diesem Kapitel aus den Einzelsträngen Verstädterung, Personenverkehrsnachfrage und derzeitiger Ressourceneinsatz aufgezeigt, dass der bestehende, private MIV hinsichtlich klimapolitischer Zielerreichung, Verkehrsflächenausnutzung, externer Kosten und Auslastung keine zukunftsfähige Lösung für Städte darstellt. Das existierende und hauptsächlich auf lokaler Verbrennung fossiler Ressourcen basierende Verkehrssystem ist mit wachsender Bevölkerungsgröße unvereinbar und kann nicht evolutionär fortgesetzt werden. Maßnahmen zur Umsetzung der Ziele der Energiewende wie beispielsweise eine lastnahe Gewinnung von Primärenergie aus erneuerbaren Quellen haben bisher den Verkehrssektor noch nicht erreicht. Der öffentliche Nahverkehr erfüllt weder die individuellen Komfortbedürfnisse noch kann er die Flexibilität der Individualmobilität erreichen. Der höheren Auslastung von Taxis steht eine relative Personalkostenintensität gegenüber. Aus diesem Grund wird ein flächendeckender Betrieb auch mit elektrischen Taxiflotten nach herkömmlichem Betriebsmuster kein Konkurrenzangebot entwickeln können.

Bisherige Ansätze geteilter Fahrzeugnutzung sind vielversprechend, jedoch Einzelbausteine und bisher nicht konsequent genug umgesetzt, um eine tatsächliche Wende im Verkehrssystem erwirken zu können. Forderungen nach einer Abkehr vom heutigen Mobilitätsverhalten begründen die Wichtigkeit der Forschungsfrage (vgl. Abschnitt 1.1), da der Autor nicht davon ausgeht, dass diese Abkehr realistisch ist und damit die Klimaziele erreicht werden können. Vielmehr wird angenommen, dass die zur Zielerreichung benötigte Veränderung von bisherigen Gebrauchs- und Konsummustern nur durch eine weitere Steigerung von Komfort und der durch den Konsumenten individuell wahrgenommenen Wertigkeit des Personentransports entstehen kann. Für diese Nachfrage werden Produkte benötigt, welche mit der Option, gewohnte Verhaltensweisen und Lebensrhythmen aufrecht zu erhalten, den Konsumenten durch wirtschaftliche Vorteile überzeugen und trotzdem

im Einklang mit ökologischen Zielsetzungen stehen. Die Attribute volkswirtschaftlicher Nutzen, Emissionen und öffentlicher Raum haben eine höhere Relevanz für die Gesellschaft als für das Individuum.

Aus den Ergebnissen dieses Kapitels kann folgende Erkenntnis abgeleitet werden: Einzelmaßnahmen zur effizienteren Energienutzung und Treibhausgasemissionsreduktion im Straßenverkehr sind durch die existierenden Marktverhältnisse in großem Maße auf die Unterstützung von privaten Kunden angewiesen. Demgegenüber wird ein strategischer Ansatz benötigt, welcher durch die Aggregation von Fahrzeugen zu einer Flotte einen größeren klimapolitischen Hebel besitzt. Ist es möglich, den Energieeinsatz für den städtischen MIV-Nahverkehr als Lastgang zu planen, kann auf der Erzeugerseite eine ausschließlich erneuerbare Leistungsbereitstellung dimensioniert und umgesetzt werden. Es bedarf daher eines präzise zu der Verkehrsnachfrage zugeschnittenen Systems zur Erbringung von Mobilitätsdienstleistungen im Nahverkehr.

Mit dieser Arbeit soll ein Konzept vorgestellt werden, um die durch die steigende Verstädterung anfallende Verkehrsnachfrage systematisch bedienen zu können und eine ganzheitliche Lösung für urbanen Nahverkehr zu konstruieren. Dies betrifft insbesondere die lokale Emissionsvermeidung durch eine angemessene Koordination der Mobilitätsangebote gemäß der Nachfrage und den Einsatz lokal emissionsfreier Verkehrsmittel. Als Lösungsansatz wird im folgenden Kapitel ein Gesamtsystem aus Fahrzeug und Infrastruktur vorgestellt. In Kapitel 4 erfolgt anschließend eine Simulation des Betriebs für einen Tag.

3 Modellaufbau

Für ein hoch ausgelastetes und elektrisches Fahrzeug, welches als Teil einer autonom betriebenen Flotte unter anderem Fahrten des heutigen MIV substituieren kann, wird der Begriff *Serviceagent* verwendet. In diesem Kapitel wird das Gesamtsystem als Ergänzung und Substitution bestehender Verkehrsmittel des Nahverkehrs vorgestellt. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 2 werden die Fahrzeuge und die zum Betrieb benötigte Infrastruktur beschrieben. Anschließend wird das Modell für die Simulation in Kapitel 4 aufgebaut. Abbildung 3.1 gibt eine Übersicht über die wesentlichen Bausteine der Modellierung in diesem Kapitel.

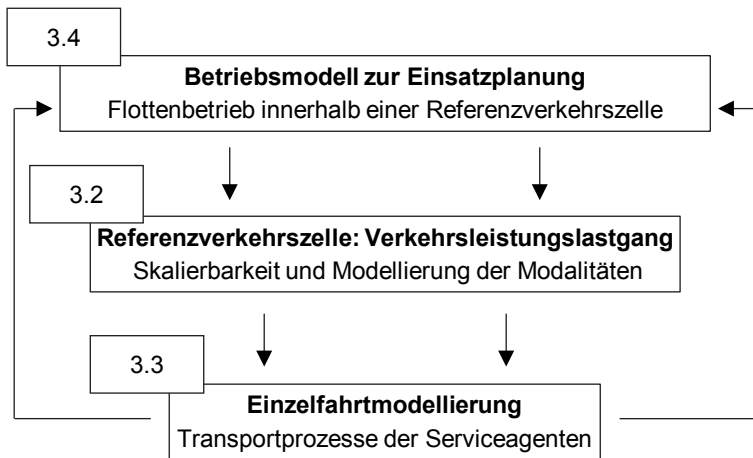


Abbildung 3.1: Stufen der Modellierung der vorliegenden Arbeit.

Das Modalitätsmodell in Abschnitt 3.2 generiert den Lastgang der zu erbringenden Verkehrsleistung für ein festgelegtes Zeitfenster. Für den Zugriff erfolgt der Zuschnitt auf ein städtisches Referenzgebiet. Für die Umsetzung der Fahrten im Straßenverkehrssystem wird auf die Fahrtdmodellierung als Subroutine aus Abschnitt 3.3 zugegriffen. In diesem Modellteil werden die einzelnen Transportprozesse durchgeführt. Das Betriebsmodell setzt auf beiden vorherigen Modellteilen auf und wird in Abschnitt 3.4 vorgestellt. In diesem werden die einzelnen, autonom durchgeführten Fahrten nach Anforderungsprofil aus dem Modalitätsmodell zur Erstellung des Tagesfahrplans aggregiert. Mit dem Betriebsmodell können für die Punkte der Systemplattform Ergebnisse erstellt werden.

3.1 Serviceagenten

In diesem Abschnitt wird das zu Grunde liegende Konzept für Serviceagenten vorgestellt. Einige Bestandteile dieses Abschnittes wurden bereits im Konferenzbeitrag [90] veröffentlicht. Mit Serviceagenten werden drei derzeit voneinander getrennte Weiterentwicklungen am Automobil zusammengeführt. Mit der vorliegenden Arbeit wird bewertet, ob diese Kombination erfolgversprechend ist. In der Abbildung 3.2 sind die wesentlichen Elemente des Gesamtsystems vorgestellt.

Für die drei Bausteine Antrieb, Nutzung und Betriebsführung bildet das Informations- und Kommunikationssystem (IKS) der Fahrzeuge die betriebliche Integrationsschnittstelle zu einer Leitwarte. Serviceagenten erbringen hochqualitativen Nahtransport und fahren autonom eine Nachfragegesteuerte Route ab, bevor eine Rückkehr zum Betriebshof erfolgt. Die Betriebshöfe werden im Folgenden als Mobilitätszentrale (MOZ) bezeichnet. Ziel ist es einerseits, die kontinuierlich in Bewegung befindliche Flotte von Agenten auf den tatsächlichen Transportbedarf zugeschnitten einzusetzen. Andererseits soll durch ein elektrisches Transportmittel mit individuellem Zuschnitt der Gesellschaft ein attraktives und komfortables Verkehrsmittel

tel angeboten werden. Durch die zentrale Flottensteuerung aus den MOZ heraus kann eine Planbarkeit der elektrischen Last erreicht werden. Ein präzise vorherbestimmtes Lastprofil mit Speicherstützung ermöglicht es, den volatilen Eintrag erneuerbarer Energie zu nutzen.

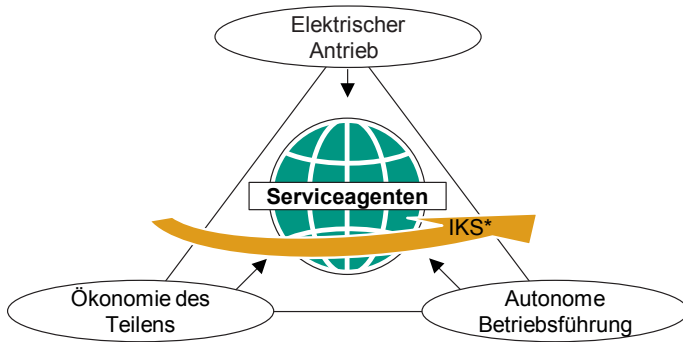


Abbildung 3.2: Elemente des Gesamtsystems Serviceagent. *Informations- und Kommunikationssystem. Quelle: [90].

Insgesamt sind Serviceagenten die Fortsetzung von elektrischem FFCS mit einer größeren Vielfalt an Fahrzeugen. Die Passagiere werden am Wunschort abgeholt und zu einem exakt definierten Ziel gefahren. Im Folgenden wird das Anforderungsprofil an Serviceagenten erstellt. Eine an der Reichweite bestehender Verkehrsmittel orientierte Einordnung von Serviceagenten in den Personenverkehr gibt Abbildung 3.3. Für den Zuschnitt zum Beförderungsbedarf sind vor allem die Wege der vier Modalitäten Fuß, Rad, MIV und ÖV im Nahbereich relevant. Die Balken repräsentieren die Einsatzdistanzen von 97,5 % der Wege in Deutschland (ÖV: 90 %).

In Abschnitt 2.5.1 wurde die Auslastung eines durchschnittlichen Pkw der heutigen Flotte aufgezeigt. Ergänzend dazu gibt die Abbildung 3.4 eine Monatsübersicht über die durchschnittlichen Fahrleistungen an den Wochentagen [59]. Der Abbildung kann eine relative Gleichmäßigkeit der Fahrleistungen entnommen werden. Bis auf Mai und August mit etwa 375 km liegt

die durchschnittliche Fahrleistung in den anderen Monaten bei 300 km bis 350 km. Der grobe Vergleich zeigt ebenso, dass auch im Monatsvergleich die Wochentage eine relative Ähnlichkeit zueinander aufweisen. Aus dieser Darstellung lässt sich der stete Rhythmus des Verkehrsgeschehens ableiten.

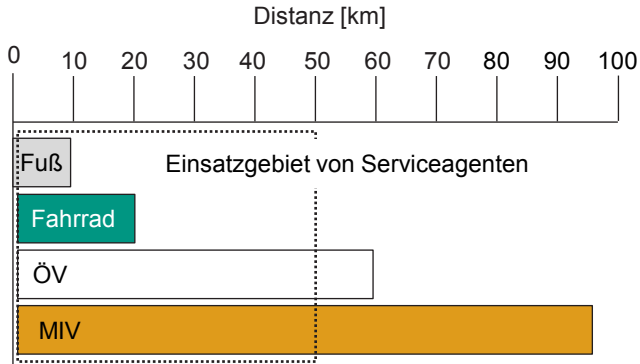


Abbildung 3.3: Verkehrsmittel im Personenverkehr und Kennzeichnung des Einsatzgebietes von Serviceagenten. Quelle: Auswertung von [58].

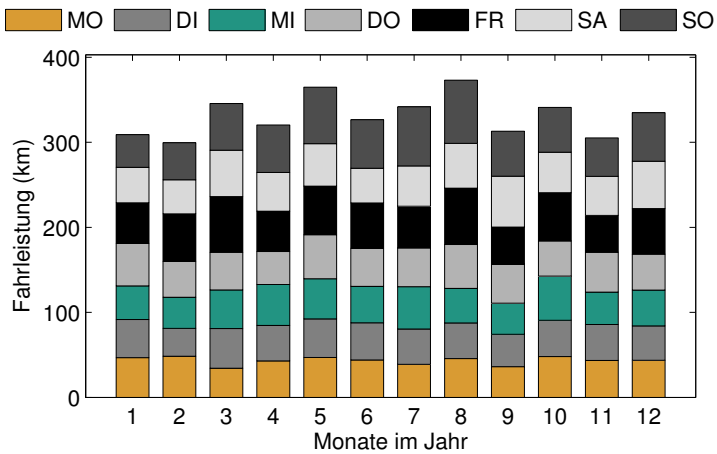


Abbildung 3.4: Durchschnittliche Fahrleistungen im MIV. Quellen: [59] und [90].

Hinsichtlich der Definition eines Anforderungsprofils an Serviceagenten konkretisieren die Abbildungen 3.3 und 3.4 zusammen ein geschlossenes Bild: Einerseits existiert ein hohes Substitutionspotential im Nahverkehr, andererseits ermöglicht die relativ konstante Fahrleistung einen präzisen Zuschnitt einer Flotte zu einer Einwohnerzahl.

3.1.1 Ideale Auslastung und Modularisierung

In Abschnitt 2.5 wurde die sehr geringe Auslastung herkömmlicher Pkw und der wirtschaftlich herausfordernde Betrieb von Taxis vorgestellt. Demgegenüber wird in diesem Abschnitt das Potential zur Auslastungssteigerung durch Serviceagenten skizziert. Der schematisierte Betriebsablauf für einen Tag ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass nachts keine Nachfrage existiert.

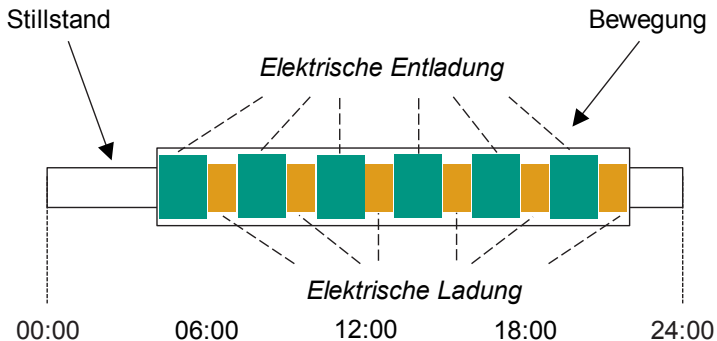


Abbildung 3.5: Darstellung des Betriebsablaufs von Serviceagenten im Tagesverlauf zwischen 04:00 Uhr und 22:00 Uhr mit Bewegungs- und Stillstandszeitfenstern.

Der Darstellung kann entnommen werden, dass sich der Serviceagent als elektrisches Fahrzeug beständig im Transport von Passagieren (Entladung) oder in der Nachladung befindet. Nach einer Vollladung wird unmittelbar die nächste Wegekette verrichtet, bis erneut eine Aufladung benötigt

wird. Abbildung 3.6 erweitert diese Überlegung und stellt Serviceagenten dem Betriebsmuster konventioneller Pkw gegenüber. Werden 14200 km Jahresfahrleistung herangezogen (vgl. Abschnitt 2.5.1), liegt die tägliche Fahrleistung unter 50 km, entsprechend einer zeitlichen Auslastung von unter 10%. Werden als durchschnittliche Verkehrsflussgeschwindigkeit 30 km/h zu Grunde gelegt, könnten in 18 Betriebsstunden an einem Tag Fahrleistungen über 500 km realisiert werden. Werden für Leerfahrten und Ladezeitfenster je 20% Zeitverlust angenommen, kann die Auslastung von Serviceagenten potentiell auf 60% steigen.

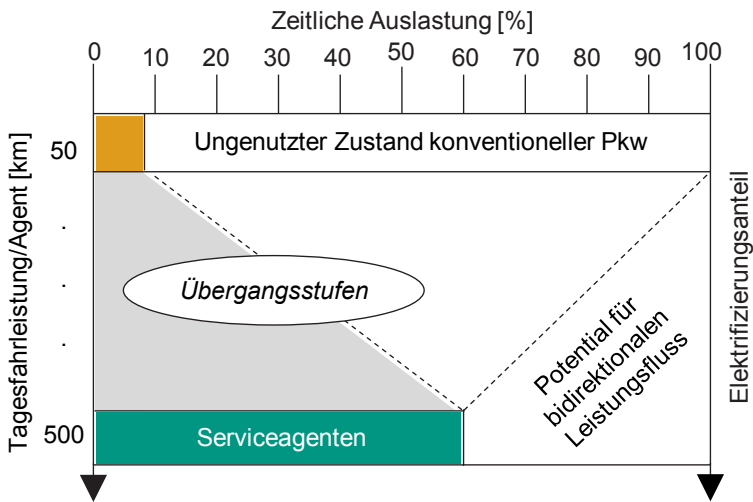


Abbildung 3.6: Auslastung von Serviceagenten anhand der Tagesfahrleistung und Potential zur bidirektionalen Leistungsbereitstellung.

Eines der Ergebnisse in Kapitel 4 ist die exakte Bestimmung der Fahr- und Standzeiten und der Auslastung von Serviceagenten. Wesentliches Merkmal dabei ist, dass die Stillstandszeiten im Tagesverlauf reduziert werden. Neben der Erhöhung der Auslastung zeigt Abbildung 3.6 auch die zunehmende Elektrifizierung im Straßenverkehrssystem.

Da Serviceagenten vollständig elektrisch betriebene Individualverkehrsmittel im Flottenverbund darstellen, ist es denkbar, in längeren Zeiträumen ohne Verkehrsnachfrage durch bidirektionale Ladeschnittstellen Energie in das elektrische Netz zurück zu speisen (engl. Vehicle-to-Grid (V2G)). Je präziser die Einsatzfolgen im Verkehrssystem kalkuliert werden können, desto genauer können Standzeiten zur Rückspeisung vergeben werden. Zwischen dem evolutionär gewachsenen, MIV-orientierten Verkehrssystem und der vollständigen Substitution der Wege einer Modalität durch elektrische Serviceagenten befinden sich Übergangsstufen. Beispiele dafür sind elektrisches FFCS oder elektrifizierte Taxiflotten.

Die gesteigerte Auslastung und der Zuschnitt zum tatsächlichen Transportbedarf entsprechen nicht dem bisherigen Verkaufsmodell der Automobilhersteller. Im Jahr 2011 besaßen 82 Mio. Einwohner in Deutschland 43 Mio. Pkw [63]. Der Wechsel von Fahrzeugen im Privatbesitz hin zu Fahrzeugen im Firmenbesitz mit effizientem Flottenbetrieb verändert die Kundenstruktur eines Fahrzeugherstellers und damit die Produktstrategie. Relativ zu heutigen Pkw sinkt durch die Erhöhung der Auslastung die kalendarische Lebensdauer der Fahrzeuge. Da trotz präziser formulierten Transportanfragen jedoch insgesamt die gleiche Verkehrsleistung auf der Straße erbracht werden soll, wird bei gleicher Fahrzeugqualität rechnerisch auch die gleiche Anzahl an Fahrzeugen benötigt. Innerhalb eines Zeitraums bleibt damit die erforderliche Produktionsmenge an Fahrzeugen theoretisch gleich. Eine Steigerung der Auslastung und eine veränderte Fahrzeugdimensionierung führen aber zu neuen Produkten, welche Konkurrenzplätze zu bestehenden Pkw einnehmen können.

Neben der Steigerung der Auslastung und der Elektrifizierung der einzelnen Agenten sieht das Gesamtsystem die Modularisierung der Flotte nach Sitzplätzen vor. Die Beförderungsanfrage beinhaltet eine Information über die Anzahl der Passagiere und die benötigte Zuladung. In dem im folgenden Verlauf dieses Kapitels vorgestellten Modell werden dafür Sitzplatzkategorien bestimmt. Insgesamt wird mit dem Modell ermittelt, mit wel-

cher Anzahl an Agenten die Verkehrsleistung des MIV im Nahverkehr nach heutigem Maßstab substituiert werden kann. Ein weiteres Ergebnis der Simulation ist es zu quantifizieren, welche Lebensdauer ein Serviceagent hat und wann der elektrische Speicher getauscht werden muss. Aufgrund der hohen Bedeutung für das Gesamtsystem wird im folgenden Abschnitt der elektrische Speicher als zentrale Komponente vorgestellt.

3.1.2 Elektrischer Speicher

In diesem Abschnitt wird der in der Modellierung verwendete elektrische Speicher und der Ladevorgang beschrieben. Eine Quantifizierung der Leistungsparameter von Lithium-Ionen Energiespeichern für den Einsatz in elektrischen Fahrzeugen gibt [41]. In einem weltweiten Vergleich wird eine Steigerung der Energiedichte auf Zellebene von 100 Wh/kg (2010) auf 250 Wh/kg (2020) angenommen bei gleichzeitiger Senkung der Kosten von 1000 €/kWh (2010) auf 200 €/kWh (2020). Tabelle 3.1 zeigt die für die Modellierung wichtigen Parameter des elektrischen Energiespeichers für die beiden Jahre 2015 und 2020. Für die Werte ist ein zulässiges Intervall der Umgebungstemperatur zwischen -25 °C bis 50 °C ausgewiesen [41]. Die Energiedichten sind dabei nicht auf Zellebene, sondern für das gesamte Batteriesystem angegeben. Dies umfasst die Verschaltung einzelner Batteriemodule zu einer an die Verwendung angepassten Einheit und den dazu benötigten elektronischen und mechanischen Komponenten (z.B. Isolierung, Kühlung und Gehäuse) [89].

Die Alterung von Lithium-Ionen Speichern wird in die beiden Alterungsarten *kalendarische* Alterung und *zyklische* Alterung aufgeteilt. Die erste Art charakterisiert dabei abträgliche Vorgänge durch Stillstand der Batterie, die zweite Art Alterungen in der Zeit der aktiven Nutzung des Speichers durch Ladung und Entladung. Zentraler Effekt der Alterung ist der Anstieg des Innenwiderstandes einer Zelle, welcher eine Reduktion der entnehmbaren Kapazität nach sich zieht. Untersuchungen an Lithium-Ionen-Zellen

betrachten die kalendarische Alterung in deutlicher Trennung von der zyklischen Alterung, um den Zustand nach einem längeren Stillstand bei höherer Temperatur zu erzeugen [53]. Die in Tabelle 3.1 ausgewiesene zukünftige Verringerung der kalendarischen Alterung nach [41] ist für den Autor nicht nachvollziehbar. Aufgrund der gesteigerten Auslastung eines Serviceagenten und der damit einhergehenden erhöhten Einsatzhäufigkeit des elektrischen Speichers ist die kalendarische Alterung für die vorliegende Arbeit jedoch von geringerer Bedeutung. Es wird hingegen angenommen, dass das Lebensende (engl. End-of-Life (EoL)) durch Zyklisierung erreicht wird.

Parameter	Einheit	2015	2020
Grav. Energiedichte (System)	[Wh/kg]	110	126
Grav. Leistungsdichte (System)	[W/kg]	420	480
Wirkungsgrad	[%]	>90	>92
Kalendarische Lebensdauer	[a]	10	<10

Tabelle 3.1: Übersicht wesentlicher Parameter von Lithium-Ionen Energiespeichern. Quelle: [41].

Für die Betriebssimulation eines Serviceagenten wird ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Entladetiefe und den realisierbaren Zyklen benötigt. Die Zyklenfestigkeit hängt sowohl von der Entladetiefe als auch von der Lade- und Entladeleistung ab. In Anlehnung an veröffentlichte Messwerte ist in [69] eine Potentialfunktion entwickelt worden, mit welcher unter Berücksichtigung der Entladetiefe p_{DoD} (engl. Depth of Discharge (DoD)) die zyklisierungsbedingte Batteriealterung abgeschätzt werden kann. Der funktionale Verlauf deckt sich annähernd mit Messwerten von Hochenergie-Lithium-Ionen Batteriesystemen der Firma *Saft Batterien GmbH* [88], bei welcher die Entladetiefe einzeln festgelegt und die Ladeleistung variiert wurde. Laboruntersuchungen zeigen, dass eine Batterie nach Ablauf von 10 Jahren noch 80 % ihrer ursprünglichen Nennkapazität besitzen kann [53].

Für die Zellen der Firma Saft wird das EoL-Kriterium hingegen auf 70 % der initialen Kapazität gesetzt. Als Abschätzung zur sicheren Seite und aufgrund der übereinstimmenden Daten wird dieser Wert für die Modellierung verwendet. Die dem Speicher entnehmbaren Zyklen innerhalb der Nutzungsdauer y_{ND} werden mit Formel 3.1 nach [69] bestimmt. Für aktuelle Lithium-Ionen Batterien werden die Faktoren $f_1 = 1331$ und $f_2 = -1,825$ vorgeschlagen. Mit $f_1 = 2744$ und $f_2 = -1,628$ gehen zukünftig erwartete Batterietechnologien in die Berechnung ein. f_1 stellt bei $p_{DoD} = 100\%$ in beiden Fällen im Modell die minimale realisierbare Zyklenzahl dar. Abbildung 3.7 gibt ein graphisches Abbild des Unterschieds zwischen aktueller und prognostizierter Zyklenfestigkeit.

$$y_{ND} = f_1 p_{DoD}^{f_2} \quad (3.1)$$

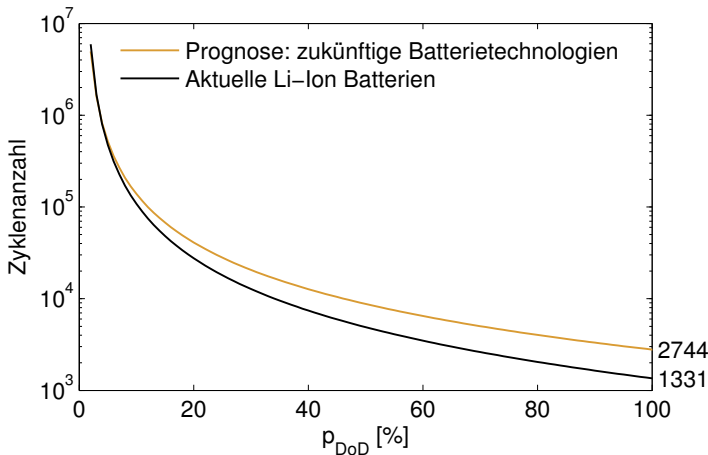


Abbildung 3.7: Zyklenfestigkeit des verwendeten elektrischen Speichers in Abhängigkeit von der Entladetiefe. Quelle: [69].

Für alle simulierten Agenten wird einheitlich eine Lithium-Ionen Batterie heutigen Standards [15] vorgesehen mit $U_{batt} = 360\text{ V}$ Nennspannung. Die-

ser Wert liegt im Normbereich der Spannungsklassen in der Elektromobilität [122]. Die Nominalkapazität beträgt $Q_{batt} = 60 \text{ Ah}$ (entsprechend einem Energieinhalt von 21,6 kWh), mit einer maximalen Entladetiefe von $p_{DoD} = 87\%$. Für die Simulation wird der maximale Durchfluss an Ah über die Lebenszeit der Batterie ermittelt. Für Ladung und Entladung wird dafür der Faktor 2 einkalkuliert. Unter Verwendung der Funktion aus Abbildung 3.7 ergibt sich für die verwendete Batterie eine Vollzyklenzahl von 1716, entsprechend $Q_{life} = 179\,150 \text{ Ah}$ als Maximaldurchsatz durch Ladung und Entladung in der Lebensdauer. Die Vollzyklenzahl ist die Summe der Zyklen bei vollständiger Ladung und Entladung bis zum gewählten p_{DoD} .

Die Anzahl der innerhalb der Nutzungsdauer eines Serviceagenten durchführbaren Ladezyklen bemisst sich anhand der Dauer einer Ladung und Entladung. Bei vorliegender Realkapazität der Traktionsbatterie wird die Ladezeit durch die Ladeleistung gesteuert; die Entladezeit durch den Stromverbrauch beim Abfahren der Wegekette. Der C-Faktor der Ladung c_c (Entladung: c_d) wird nach Formel 3.2 aus dem Ladestrom I_c (Entladestrom: I_d) und der Nominalkapazität Q_{batt} bestimmt. In Abbildung 3.8 sind die wesentlichen Parameter des Ladeprozesses einander zugeordnet.

$$c_{c,d} = \frac{I_{c,d}}{Q_{batt}} \quad (3.2)$$

Aufgrund der für Serviceagenten gewünschten kurzen Stand- und Ladezeiten wird eine hohe Ladeleistung benötigt. Regulär wird die zulässige Ladeleistung durch das Batteriemanagementsystem des Fahrzeugs gesteuert, nach Vorgabe der Lebensdauerplanung durch den Hersteller. Wie aus Formel 3.2 ersichtlich, wird der C-Faktor auf die Nominalkapazität eines elektrischen Speichers bezogen. Als Abschätzung zur sicheren Seite wird in der vorliegenden Arbeit die reale Kapazität für die Berechnung verwendet. Der in der Simulation angenommene C-Faktor der Ladung stellt eine qualifizierte Schätzung dar [96]. Bezogen auf die Nominalkapazität liegt der Faktor bei 4,4, entsprechend $I_c = 261 \text{ A}$ auf 60 Ah. Dies entspricht einer verlust-

freien Leistung zur Ladung von $P_x = 94\text{ kW}$ anstatt 108 kW bei Bezug auf die Nominalkapazität. Es wird angenommen, dass unter Anwendung dieses Faktors dem vorgestellten elektrischen Speicher die ermittelte Zyklenanzahl entnommen werden kann. Für Ladeleistungen, welche über eine dreiphasige Bereitstellung mit 400 V und 63 A (entsprechend $43,6\text{ kVA}$) hinausgehen, sind durch Normung Schnellladesysteme vorgesehen [33]. Für die vollständige Schnellladung eines Serviceagenten mit 60 Ah bei 94 kW wird in etwa eine Viertelstunde benötigt.

Parameter	Einheit	Beschreibung
Nominalkapazität	[Ah]	Reduktion Entladetiefe (DoD) durch Batteriehersteller
Realkapazität	[Ah]	
	[kWh]	Batteriespannung durch Zellverschaltung
DC-Ladestrom	[A]	Batteriemanagementsystem: Zulässiger C-Faktor der Ladung
DC-Ladeleistung	[kW]	Thermische und elektrische Verluste bei der Ladung

Abbildung 3.8: Bestimmung der Ladeleistung des elektrischen Speichers.

Aufgrund der geringen Ladungsverluste durch Gasung und Selbstentladung bei Lithium-Ionen Batterien wird für die Modellierung angenommen, dass der Ladefaktor $LF_{ij} = 1,0$ ist [61]. In Anlehnung an reale Messwerte von im Jahr 2016 erhältlichen, elektrischen Pkw werden die Lade- und Entladeverluste in Abschnitt 3.3.3 gesondert vorgestellt. Tabelle 3.2 stellt die für den Ladeprozess der verwendeten elektrischen Speichers benötigten Werte noch einmal übersichtlich dar. Kehrt ein Agent in der Simulation zu einem Ladepunkt zurück, beginnt unmittelbar der Ladevorgang mit maximaler Leis-

ung. Als zentrales Betriebsziel wird die Verbesserung der zeitlichen Auslastung über einen die Batterie schonenden Ladeprozess gestellt.

Beschreibung	Parameter	Einheit	Wert
Nominalkapazität	Q_{batt}	[Ah]	60
Entladetiefe	p_{DoD}	[%]	87
Vollzyklen in ND*	y_{ND}	[-]	1716
Energiedurchsatz in ND*	Q_{life}	[Ah]	179 150
Batterienennspannung	U_{batt}	[V]	360
C-Rate der Ladung	c_c	[1/h]	4,4
Ladestrom	I_c	[A]	261
Ladefaktor	LF_{li}	[-]	1,0
Wirkleistung	P_x	[kW]	94

Tabelle 3.2: Kennwerte der Ladung eines Agenten. *Nutzungsdauer. Quellen: [15], [96], [61], [97].

Zusammenfassend wurde in diesem Abschnitt das in den Agenten verwendete Lithium-Ionen basierte Speichersystem vorgestellt. Mit den festen elektrischen Parametern, den entnehmbaren Zyklen und den Verlusten bei der Ladung kann das Modell auf eine standardisierte Schnittstelle zum elektrischen Netz zugreifen. Durch die Fahrtmodellierung in Abschnitt 3.3 und die simulierten Tagesabläufe in Kapitel 4 kann ermittelt werden, nach welcher Distanz und Zeit ein Austausch des Speichers benötigt wird. Im folgenden Abschnitt werden die Betriebskosten von Serviceagenten vorgestellt.

3.1.3 Gesamtbetriebskosten

Die Vorstellung des Konzepts der Serviceagenten schließt in diesem Abschnitt mit einer ökonomischen Vorkalkulation. Für die betriebswirtschaftliche Bewertung wird ein Total Cost of Ownership (TCO)-Modell

für die Fahrzeuge aufgebaut. Das TCO-Verfahren ist ein im Jahr 1987 ursprünglich für IT-Produkte entwickeltes Abrechnungsverfahren der Gesamtbetriebskosten. Darin zusammengefasst werden die Anschaffungskosten, die Kosten der Nutzung und der Entsorgung [45]. Zentraler Untersuchungsgegenstand sind die Distanz-bezogenen Kosten des Einsatzes eines Agenten. Im Folgenden wird zunächst der Restwert eines Agenten nach festgelegter Fahrleistung und dem Ausscheiden aus der Flotte ermittelt. Dabei wird angenommen, dass analog zum derzeitigen Fahrzeugmarkt ein Gebrauchtwagenmarkt für Agenten entsteht, um den Verkaufserlös mit dem Neukaufpreis verrechnen zu können.

Relativ zu den Neuzulassungen in die deutsche Flotte im Jahr 2015 mit 3,2 Mio. Pkw sind die Neuzulassungen elektrisch angetriebener Pkw mit 12363 Einheiten gering [66]. Zusätzlich liegen im Speziellen keine Feldversuche von Serviceagenten vor, so dass derzeit kein aussagekräftiger Gebrauchtwagenmarkt existiert. Für die Restwertanalyse wird daher auf Zahlenwerte herkömmlicher Antriebe und üblicher Laufleistungen zurückgegriffen und daran abgeleitet die Entwicklung für Serviceagenten prognostiziert. Die Restwertentwicklung ist dabei fahrzeugspezifisch und hängt neben dem kalendarischen Alter, der Antriebsart und der Laufleistung auch von dem individuellen Fahrzeugzustand und politischen Rahmensetzungen zum Bewertungszeitpunkt ab. Eine detaillierte Analyse der Restwertentwicklung im derzeitigen Fahrzeugmarkt ist daher nicht zielführend. Bedingt durch das höhere Komfortniveau hinsichtlich Motorisierung und Fahrzeuginnenraum wird für die TCO-Abschätzung eines einsitzigen Serviceagenten die Restwertentwicklung im Segment Kompaktklasse herangezogen.

Die Ermittlung erfolgt auf Basis eines vier Jahre und eines ein Jahr alten, konventionell angetriebenen Pkw in gutem Zustand ohne Sonderausstattungsmerkmale. Ein Online-Gebrauchtwagenhändler wird systematisch befragt, wobei ausschließlich die Laufleistung variiert wird. Im Ergebnis in Abbildung A.10.1 im Anhang wird der Wiederverkaufspreis dem ursprünglichen Neukaufpreis prozentual gegenübergestellt. Im Verlauf lässt sich eine

negative logistische Funktion erkennen, aus welcher sich folgende Feststellungen ableiten lassen:

- Die Laufleistung beeinflusst den Fahrzeugwert maßgeblich. Gegenüber der Laufleistung hat die Standzeit wenig Bedeutung. Die Differenz des Fahrzeugwertes zwischen vier- und einjähriger Standzeit ohne Laufleistung beträgt weniger als fünf Prozentpunkte und liegt insgesamt im Bereich von 65 %.
- Pro gefahrene 30000 km entsteht ein zusätzlicher Wertverlust zwischen 4 % und 6 %.
- Für die miteinander verglichenen Fahrzeuge zeigt sich ab einer Fahrleistung von 240000 km eine Wertstabilität bei durchschnittlich 29,4 % des Neukaufpreises.

Für einen einzelnen, elektrisch angetriebenen Serviceagenten wird für alle Komponenten exklusive des elektrischen Speichers eine maximale Laufleistung von 300000 km pro Jahr angenommen. Damit entsteht neben den Betriebskosten ein rechnerischer Wertverlust von 70,6 %. Unter der Annahme, dass die Entwicklung des Restwerts des Batteriesystems der Entwicklung des Gesamtfahrzeugs entspricht, weisen Berechnungen für zukünftige elektrische Pkw den Restwert nach üblichen Fahrleistungen 2,7 % unter dem Wert eines vergleichbaren Modells mit konventionellem Antrieb aus [50].

Zusammenfassend wird für die Analyse von Serviceagenten nach einjähriger Nutzung mit einem Restwert von 26,7 % des Neukaufpreises gerechnet. Die Wertermittlung eines Serviceagenten erfolgt unabhängig vom eingesetzten Batteriesystem. Die Bewertung zu einem beliebigen Zeitpunkt innerhalb der Laufleistung erfolgt prozentual nach der Ausgleichsfunktion der Mittelwerte in Abbildung A.10.1. Die Reichweite eines elektrischen Speichers ist Simulationsresultat in Kapitel 4.7. In Tabelle 3.3 werden ausgewählte Parameter auf Prognosebasis zur Kostenbewertung eines typischen Fahrzeugs der elektrischen Kompaktklasse des Jahres 2018

modifizierten Werten für Serviceagenten gegenübergestellt. Aufgrund der geringen Nutzungsdauern wird dabei zinsfrei gerechnet.

Parameter	Einheit	eKKS* 2018	Serviceagent (Komfort)	Serviceagent (Basis)
Fahrzeugpreis	[€]	31 300	32 100	23 000
<i>davon Speicher</i>	[€]	7 600	15 500	15 500
Nutzungsdauer	[Jahre]	4	1	1
Laufleistung	[km/a]	15 000	300 000	300 000
Betriebskosten	[€]	9 300	46 300	46 300
Restwert	[%]	42,7	26,7	26,7
Gesamtkosten	[€]	27 700	70 200	63 200
Einsatzkosten	[€/km]	0,46	0,23	0,19

Tabelle 3.3: Ausgewählte Bestandteile der Gesamtkostenstruktur der elektrisch angetriebenen Kompaktklasse und von Einsitzer-Serviceagenten für das Jahr 2016 bei einem Strompreis von 0,28€/kWh und einem Fahrverbrauch von 0,22 kWh/km. Zahlen zur besseren Darstellung gerundet.
*eKKS: elektrisches Kompaktklassesegment. Quellen: Berechnung mit Eingangswerten von [12] (Restwerte), [50] (Fahrzeug- und Betriebskosten) und [82] (Batteriekosten).

Für den Viersitzer-Agenten wird der Verkaufspreis der Kompaktklasse inklusive Sonderausstattungsmerkmalen nach [50] mit 31 300€ übernommen. Dieser Fahrzeugpreis beinhaltet die Kosten für eine einzelne Batterie. Es wird der in Abschnitt 3.1.2 vorgestellte elektrische Speicher mit einem Energieinhalt von 21,6 kWh verwendet. Die Batteriesystemkosten werden nach [82] initial mit 350€/kWh angenommen. Daraus resultieren 7 560€ für die Batterie, entsprechend 24 % des Gesamtfahrzeugpreises. Für die Ermittlung der Betriebskosten wird eine Nutzungsdauer von vier Jahren mit einer jährlichen Laufleistung von 15 000 km herangezogen. Die Kosten für Versicherung und Wartung werden aus [50] übernommen; aufgrund der umfas-

senden Rollenprüfstandversuche wird hingegen der Fahrverbrauch von [47] für ein klimatisiertes Durchschnittsfahrzeug mit 0,22 kWh/km herangezogen. Wegen des elektrischen Antriebsstranges wird für alle Agenten eine Befreiung von der Fahrzeugsteuer angenommen. Für die Nutzungsdauer resultieren Betriebskosten von 9300 €. Abzüglich des in [50] ausgewiesenen Restwertes nach vierjähriger Nutzungsdauer verbleiben Einsatzkosten von 0,46 €/km. Dabei wird konservativ angenommen, dass der Restwert eines elektrischen Pkw des Jahres 2018 den Wert für 2015 nicht übersteigt. Vorteile durch den Betrieb als Flotte oder zusätzliche Zuschläge durch Gemeinkosten auf die Einsatzkosten sind nicht enthalten.

Für komfortable Serviceagenten wird die vorgestellte Kostenkalkulation übernommen. Ein komfortabler Agent repräsentiert damit ein höherwertiges Fahrzeug entsprechend einem derzeit gut ausgestatteten Fahrzeug der Kompaktklasse. Für jeden Sitzplatz weniger werden auf den Fahrzeugbasispreis ohne Sonderausstattungen pauschal 2000 € netto abgezogen, damit ist der Einsitzer-Agent 6000 € günstiger als das Vergleichsfahrzeug der Kompaktklasse. Aufgrund der angenommenen hohen Laufleistung und dem begrenzten Energiedurchsatz durch den elektrischen Speicher kann angenommen werden, dass hoch ausgelastete Serviceagenten mehrere Batterien innerhalb eines Jahres benötigen. Werden die 300000 km pro Jahr mit angenommenen 0,22 kWh/km Durchschnittsverbrauch dem energetischen Durchsatz von 179150 Ah (vgl. vorheriger Abschnitt) gegenüber gestellt, werden zwei Batterien innerhalb eines Jahres benötigt. Es entstehen dadurch jährliche Kosten für den elektrischen Speicher von 15500 €. Die Kosten für Versicherung und Werkstatt nach [50] werden über die Laufleistung linear zum Kostensatz des Vergleichsfahrzeugs skaliert. Durch die hohe Laufleistung steigen die Betriebskosten insgesamt auf 46300 €. Als Ergebnis sinken die daraus abgeleiteten Einsatzkosten auf 0,23 €/km.

Für den einfachen, weniger komfortablen Betrieb wird ein Basisagent herangezogen. Dieser entspricht einem Fahrzeug mit reduziertem Komfortumfang und einfacher Fahrgastraumgestaltung, angelehnt an die Transport-

qualität im ÖPNV. Der in Tabelle 3.3 ausgewiesene Verkaufspreis beinhaltet einerseits keine Sonderausstattungen und besteht andererseits zu 50 % aus den Kosten des ersten elektrischen Speichers. Aufgrund der niedrigeren Investitionskosten sinken die Einsatzkosten auf 0,19 €/km. Das Ergebnis der Berechnung zeigt, dass aufgrund der hohen Laufleistung die Einsatzkosten von Serviceagenten deutlich unter dem Wert für das Vergleichsfahrzeug in der Kompaktklasse liegen. Werden innerhalb eines Jahres genau 300 000 km bei einem Strompreis von 0,28 €/kWh gefahren, sinken die Einsatzkosten je nach Komfortstufe auf 50-60 % gegenüber den Kosten für die elektrische Kompaktklasse. Aus diesen Zahlen ist die zentrale Bedeutung der Betriebskosten gegenüber dem Fahrzeugpreis ersichtlich. Im Vergleich mit einem konventionellen Pkw, dessen Neukaufpreis bei geringer Fahrleistung relativ großes Gewicht besitzt, ist für Serviceagenten schon eine geringe Veränderung der Betriebskosten bedeutend. Die herausgestellten Zahlen sind nur für die gewählte Laufleistung folgerichtig. In der Simulation in Kapitel 4 wird daher die Verteilung der Laufleistung innerhalb einer Flotte untersucht.

Der Vergleich der ermittelten Zahlen mit den Ergebnissen anderer Veröffentlichungen zeigt, dass inklusive Wartung, Versicherung und anteiliger Kosten für die Ladeinfrastruktur für ein SAEV Kosten zwischen 0,23 €/km und 0,26 €/km angesetzt werden [25]. Ferner werden von derselben Autorin für ein Personentransportsystem einer Millionenstadt mit einer jährlichen Verkehrsleistung von 2,4 Mrd. Pkm nach Zahlen von [3] für Personal und technische Ausrüstung Gemeinkosten von zusätzlichen 0,10 €/km aufgeführt. Ohne kalkulatorische Betriebsmarge entstehen daher Kosten von maximal 0,36 €/km. Die Nutzung von Schnellladesystemen auf Gleichstrombasis wird mit zusätzlichen 15 % veranschlagt.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit haben die Technologiekomponenten für autonomes Fahren noch nicht den Massenmarkt erreicht, um realistische Kostenschätzungen durchführen zu können. Bisherige Forschungen zu Flotten von autonomen und elektrischen Fahrzeugen identifizieren insbesondere zwei Positionen mit wesentlichem Einfluss auf die

distanzbasierten Einsatzkosten [25]: Einerseits haben die Infrastrukturkosten für flächendeckende Schnellladesysteme im Nahverkehr bedeutenden Einfluss, andererseits führen die noch niedrigen Stückzahlen für die optische Sensorik im Straßenraum zu hohen Stückkosten. Die vorliegende Arbeit zielt daher in Abschnitt 4.7 auf ein positives Restkapital als Residualwert aus bekannten Fahrzeugkosten und den Einnahmen durch den Fahrbetrieb. Aus diesem Restkapital können die maximal zulässigen Kosten für weitere Komponenten abgeleitet werden.

Diesen Abschnitt abschließend, werden die einzelnen Fahrzeuge als Flotte betrachtet. Für die Modellierung dieser Flotte mit X Flottenpositionen in einer Nutzungsdauer erhält jeder Serviceagent eine eigene Agenten-Identifikationsnummer (Agent-ID). Im Rahmen der Ergebnisbildung für die vorliegende Arbeit entspricht die einzelne Flottenposition x der Agent-ID. Für jede Position werden innerhalb einer Nutzungsdauer und abhängig von der Fahrleistung eine unterschiedliche Anzahl a (für Speicher: b) an Fahrzeugen \mathcal{A} und elektrischen Speichern \mathcal{B} benötigt. In der Modellierung werden daher nicht die einzelnen Fahrzeuge oder Speicher, sondern die benötigte Summe NC_x einer Flottenposition betriebswirtschaftlich bilanziert. Formel 3.3 veranschaulicht diesen Sachverhalt.

$$NC_x = a\mathcal{A} + b\mathcal{B} \quad (3.3)$$

Den streckenbasierten Kosten in einer Nutzungsdauer stehen zeitbasierte Einnahmen des Fahrbetriebs gegenüber. Den zeitlichen Aufwand und den Energiekonsum einer einzelnen Fahrt liefert die Fahrtmodellierung in Abschnitt 3.3. Von diesen Werten wird auf die Fahrleistung in der Nutzungsdauer und den gesamten Fahrverbrauch geschlossen. In Kapitel 4 werden für ein Referenzgebiet in einer Nutzungsdauer die Kosten des Flottenbetriebs auf Basis der Erkenntnisse dieses Abschnittes den Einnahmen gegenüber gestellt. Als Ergebnis wird jeder Agent-ID ein Betriebsüberschuss und ein Mindesteinsatzpreis zur Deckung der entstehenden Kosten zugeordnet.

Zusammenfassend wurden in den ersten drei Abschnitten dieses Kapitels zwei wesentliche Elemente des Gesamtkonzepts Serviceagent vorgestellt (vgl. Abbildung 3.2): Einerseits ist die gesteigerte Auslastung als Ziel der Ökonomie des Teilens für Agenten skizziert. Dieser Teil wird in der Modellierung der autonomen Ablauforganisation in Abschnitt 3.4.2 wieder aufgegriffen. Andererseits ist der elektrische Antriebsstrang charakterisiert, welcher in Abschnitt 3.3 Einzug in die Fahrtmodellierung erhält. Im folgenden Abschnitt wird das Untersuchungsgebiet für den Einsatz von Serviceagenten vorgestellt.

3.2 Untersuchungsgebiet: Verkehrszelle

In diesem Abschnitt wird das Untersuchungsgebiet vorgestellt. Um räumliche Strukturmerkmale abzuleiten (z. B. Flächennutzung oder Einwohnerdichte, siehe Abschnitt 3.2.3) und die Bewegung von Agenten innerhalb eines Verkehrsraums anzupassen (siehe Abschnitt 3.3.2), wird aufgrund der städtischen Größe im Folgenden Berlin herangezogen. Um den Anspruch der Arbeit zu unterstreichen, mit dem Modell allgemein Aussagen für städtische Gebiete zu treffen, wird für die Simulation in Kapitel 4 exemplarisch Karlsruhe als eine typische deutsche Großstadt mit mehr als 300000 Einwohnern ausgewählt.

Das systematische Partitionieren eines Verkehrsraums in einzelne Zellen für die Simulation des Einsatzes von Serviceagenten ist an der verkehrsräumlichen Strukturierung von Berlin angelehnt. Basierend auf einem regionalen Bezugssystem schnittfreier Einzeleinheiten kann Berlin in 386 Verkehrszellen eingeteilt werden, welche in 1223 Teilverkehrszellen untergliedert sind. Dabei entsprechen die Teilverkehrszellen Teilflächen, in welchen ein homogenes Verkehrsverhalten angenommen wird [94]. Für die räumliche Verteilung und die Einwohnerzahl existiert in Berlin kein fester Schlüssel. Im Gegensatz zu der gewünschten, gleichförmigen Bewegung in Berlin innerhalb einer Zelle wird für die vorliegende Arbeit eine Zelle als in-

tern heterogene Einheit betrachtet. Eine Verkehrszelle bildet das städtische Verkehrsverhalten hinsichtlich Verkehrsaufkommen und eingesetzter Verkehrsmittel mikroskopisch ab. Im externen Vergleich zu anderen Verkehrszellen des gleichen Verstärterungsgrads besteht jedoch eine Homogenität. Die für die vorliegende Untersuchung relevanten Verkehrsarten einer Zelle sind *ausstrahlender Verkehr* und *Binnenverkehr*. Bei beiden Arten beginnt die Ortsveränderung in der Zelle [91]. Andere Verkehrsarten, bei welchen die Ortsveränderung außerhalb der Zelle beginnt oder bei welchen die Zelle um- oder durchfahren wird, werden nicht berücksichtigt. Der Zuschnitt einer Verkehrszelle erfolgt in erster Näherung anhand der Einwohnerdichte und dem lokalen Wegeprofil der Bevölkerung. In übergeordneter Planung besteht eine Region aus einer diskret zu bestimmenden Anzahl von Verkehrszellen. Die räumliche Dimensionierung und die Schnittstellen mehrerer Verkehrszellen sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Für die vorliegende Arbeit geben die Benutzer von Serviceagenten in einer Verkehrszelle C für ein Betrachtungszeitfenster T das Wegeprofil $w_{C,T}$ vor. Für die Simulation des Betriebsablaufs von Serviceagenten in Verkehrszellen in Kapitel 4 werden dazu die folgenden Informationen benötigt [90]:

1. Das maximale Verkehrsaufkommen und die maximale Verkehrsleistung in einer Verkehrszelle durch Abschätzen der Nachfrage in ganzjähriger Betrachtung.
2. Die prozentuale Verteilung der bisher verwendeten Verkehrsmittel im Tagesverlauf (modale Teilung).
3. Die Verteilung der Weglängen für die einzelnen Modalitäten zu einem bestimmten Zeitpunkt im Tagesverlauf.
4. Die modalitätsspezifische Verteilung benötigter Sitzplätze für eine bestimmte Weglänge zu einem bestimmten Zeitpunkt im Tagesverlauf.

Für den Zuschnitt einer Flotte von Serviceagenten zu einer konkreten Einwohneranzahl wird ein sinnvolles zeitliches Raster für $w_{C,T}$ benötigt. Ein

Teilziel der vorliegenden Arbeit ist es, allgemein für städtische Räume eine Flotte dimensionieren zu können. Feingranulare Anforderungsprofile im Minutenbereich sind daher ungeeignet, da die erforderliche Spezifizierung nach Datum und Ort im Vergleich mit größeren Zeitschritten von einer höheren Varianz und geringeren Reproduzierbarkeit begleitet wird. Aus diesem Grund wird für $w_{C,T}$ ein zeitliches Raster von 15 Minuten gewählt, entsprechend 96 Zeitschritten innerhalb eines Tages. Abbildung 3.9 kombiniert die benötigten Informationen für eine Modalität im verwendeten Zeitraster in distanzbasierter Darstellung.

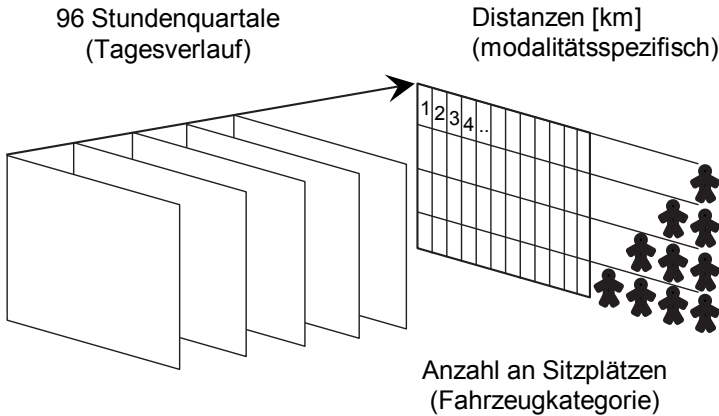


Abbildung 3.9: Distanzbasierte Darstellung der benötigten Informationen zur Substitution eines Verkehrsmittels durch eine Flotte von Serviceagenten in einer Verkehrszelle. Quelle: [90].

Die Systematik der Datenaufbereitung für eine einzelne Distanz wird durch Abbildung 3.10 veranschaulicht; in jeder Zelle des Würfels steht die Anzahl an benötigten Serviceagenten für 15 Minuten. In den folgenden Abschnitten werden diese Informationen zusammengestellt, um abschließend eine Referenzverkehrszelle zu konstruieren, welche als exemplarisches Untersuchungsgebiet den modularisierten Einsatz von Serviceagenten ermöglicht.

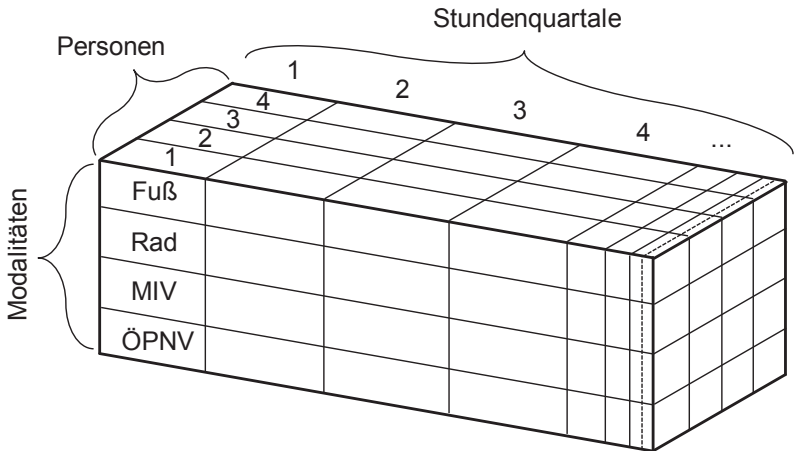


Abbildung 3.10: Systematik der Werteerfassung einer einzelnen Distanz in einer Verkehrszelle zur Konstruktion des Einsatzanforderungsprofils.

3.2.1 Konstruktion des Wegeprofils der Verkehrszelle

Ein Vorteil des MIV gegenüber dem ÖV ist es, nicht an Fahrpläne gebunden zu sein. Mit Fahrplänen wird versucht, das erwartete lokale Verkehrsaufkommen im Tagesverlauf abzubilden. Heutzutage treffen auf der Straßenverkehrsfläche daher Fahrten nach Plan und einmalige oder ungetaktete Fahrten aufeinander. Nach Vorstellung des Autors sind in einem idealen Straßenverkehrssystem die Trajektorien aller Verkehrsteilnehmer a priori bekannt, damit durch chronologische Belegungsalgorithmen die Verkehrsflächen optimal ausgelastet werden können. In Ermangelung eines vollständig prädizierten Datensatzes an Wegen wird vorliegend ein Übergangsszenario verwendet. In diesem wird auf Basis statistisch verteilter Wege des Datensatzes der Studie „Mobilität in Deutschland 2008“ (MID) die Mobilitätsnachfrage für eine Referenzeinwohnerzahl konstruiert und das Verkehrsaufkommen im Tagesverlauf zur Erstellung von $w_{C,T}$ top-down aufgeschlüsselt [58]. Für die Datenaufnahme der Stichprobe der MID

wurden 270 repräsentative Gemeinden in den Bundesländern ausgewählt, die Befragung erfolgte ausschließlich telefonisch [56]. Um bei Entnahme von Teilen des Datensatzes Asymmetrien in den Verteilungsfunktionen auszugleichen, sind für die einzelnen Daten der MID Gewichtungsfaktoren und Hochrechnungsfaktoren vergeben. Durch diese werden der Wochentag und die Kalenderwoche der einzelnen Datensätze angepasst, um ein repräsentatives Abbild des Verkehrsgeschehens in Verkehrszellen zu erhalten. Für die Ausgangsdaten ist die Einwohnerzahl in Deutschland vom 31.12.2007 mit 82,2 Mio. Einwohnern heranzuziehen. In dem Ausgangsdatsatz sind 193290 Wege erfasst, welche hochgerechnet einen Durchschnittstag mit 281 Mio. Wege und 3214 Mio. Pkm abbilden [57].

Im Folgenden wird der Umfang der Daten und die gesetzten Filter im Zuschnitt für den Bedarf der vorliegenden Arbeit vorgestellt. Der Schwerpunkt der Bearbeitung liegt in der Startzeitverteilung und der nachgefragten Länge von Wegen in einem Zeitintervall. Ferner ist von Interesse, mit welchem Hauptverkehrsmittel der Weg verrichtet wurde. Nicht berücksichtigt werden hingegen der Wegezweck und jegliche personenbezogene Informationen wie beispielsweise die Zuordnung des Ausgangspunktes des Weges oder haushaltsorientierte Befragungsergebnisse. Auch werden verwendete Nebenverkehrsmittel und die Zugehörigkeit zu einer Personengruppe für die Leistungsauslegung einer MOZ nicht benötigt. Als eine große Gruppe von Wegen sind regelmäßige berufliche Wege im Datensatz der MID enthalten. Da für die einzelnen Daten dieser Wegegruppe jedoch keine Startzeit oder Dauer angegeben wird, werden diese Einträge für die Einsatzplanung nicht berücksichtigt. Zusammenfassend werden von 121 Variablen eines Wegedatums 24 für die vorliegende Arbeit verwendet. Von dieser Auswahl haben vier Variablen Auswirkung auf die Grundgesamtheit; der Zuschnitt und die Filterung der anderen 20 ist nicht sensitiv auf die Einwohnerzahl. Eine Übersicht der verwendeten Variablen gibt Tabelle A.5 im Anhang.

Die räumliche Zuordnung der Wege des Ausgangsdatsatzes beruht auf den festgelegten Regionsgrundtypen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt-

und Raumforschung [22]. Eine Übersicht der Differenzierungen der Regionsgrundtypen gibt Abbildung A.6.1 im Anhang. Für den zu erzielenden Datenzuschnitt werden nur Daten des Typs *Agglomerationsräume* verwendet, von welchem es in Deutschland zehn großflächige Regionen gibt. Dieser Typ beinhaltet die beiden Strukturtypen *hochverdichtet* (z.B. Großraum Düsseldorf) und *mit herausragenden Zentren* (z.B. Berlin in Brandenburg), entsprechend der Mindestagglomeration eines Oberzentrums mit über 100 000 Einwohnern. Allgemein ist ein Oberzentrum ein „zentraler Ort (...) zur Deckung des spezialisierten höheren Bedarfs der Privathaushalte“ [73].

Neben den Regionsgrundtypen werden ferner nur Daten des nach Raumordnungsbericht 2005 ausgewiesenen Kreistyps *Kernstädte* in die Auswahl mit einbezogen. Durch den Filter auf die beiden Strukturtypen wird der Basisdatensatz auf 101 797 Wege reduziert. Die weitere Präzisierung auf den Kreistyp führt schließlich zu einer Grundgesamtheit von 42 781 Wegen, welche als Rohdaten für die Einsatzplanung der Agenten verwendet werden können. Die fünf Bundesländer Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt und Thüringen sind nicht mehr in der Datenauswahl vertreten. Die Siedlungsstrukturen dieser Bundesländer entsprechen nicht den Bedürfnissen dieser Analyse. Mit eingeschalteter Gewichtung führen die Filter zu einer Reduktion auf 18,2 Mio. Einwohner, für welche der reduzierte Datensatz repräsentative Aussagen ermöglicht. Dies entspricht 22,1 % der deutschen Bevölkerung in Kernstädten in agglomerierten Räumen. Resultierend sind die Aussagen, welche auf dieser statistischen Datenbasis getroffen werden können, nur für eine Vereinheitlichung der deutschen Stadt in einem Agglomerationsraum gültig und berücksichtigen keine individuellen Ausgangssituationen.

Ein Ergebnis der MID-Erhebung ist, dass der Zeitpunkt des höchsten Verkehrsaufkommens im Jahr nicht mit dem Zeitpunkt der höchsten Verkehrsleistung übereinstimmt. So tritt das höchste Verkehrsaufkommen im Frühjahr auf, währenddessen die höchste Verkehrsleistung – bei gleichzeitig geringerem Verkehrsaufkommen aber längeren Freizeitwegen – in den

Sommermonaten erreicht wird [56]. Im Folgenden werden Verkehrsaufkommen und -leistung in Deutschland mit deutschen Kernstädten verglichen. Einerseits soll dadurch der Anteil von Kernstädten an der deutschen Personenverkehrsnachfrage herausgestellt werden, andererseits wird der Tag mit der höchsten Mobilitätsanforderung als Referenztag zur Untersuchung von Serviceagenten ermittelt. In Abbildung 3.11 ist die durchschnittliche Wegeanzahl für Gesamtdeutschland der durchschnittlichen Wegeanzahl in Kernstädten in Agglomerationsräumen gegenüber gestellt.

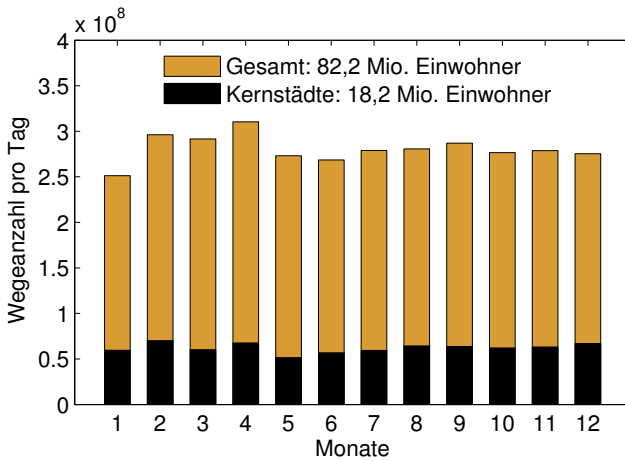


Abbildung 3.11: Durchschnittliches Verkehrsaufkommen innerhalb eines Jahres in Deutschland. Quelle: Auswertung von [58].

Es ist ersichtlich, dass dieses Verhältnis über die Monate zwischen 19 % und 24 % schwankt. Ebenso ist erkennbar, dass das Verkehrsaufkommen im Frühjahr besonders hoch ist. Für die Simulation in Kapitel 4 wird der Tag im Jahr gesucht, an welchem die größte Verkehrsleistungsnachfrage entsteht. Die zu Abbildung 3.11 analoge Darstellung der durchschnittlichen Verkehrsleistung im Verlauf der Monate eines Jahres gibt Abbildung 3.12. Es ist erkennbar, dass auch bei der Verkehrsleistung der städtische Zuschnitt dem allgemeinen Datensatz im Verlauf folgt. Mit einem Intervall zwischen

16 % und 24 % werden die 22,1 % Bevölkerungszuschnitt erneut umfasst. Erkennbar ist zudem, dass die Jahresspitze im Ausgangsdatensatz mit nahezu 4000 Mio. Pkm im August liegt. Im städtischen Zuschnitt führt dies zu einer Differenz der durchschnittlichen, täglichen Verkehrsleistung von + 80 % gegenüber dem Jahresminimum von 534 Mio. Pkm im Januar.

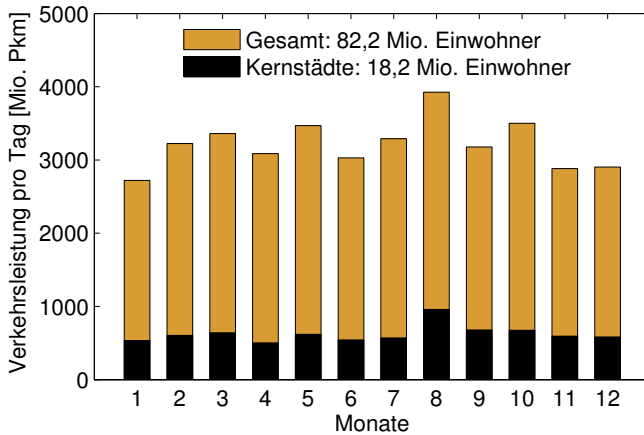


Abbildung 3.12: Durchschnittliche Verkehrsleistung innerhalb eines Jahres in Deutschland. Quelle: Auswertung von [58].

Im Vergleich der Wochentage untereinander ist Freitag der Tag, an welchem gleichzeitig in absoluten Zahlen das höchste Verkehrsaufkommen mit 308 Mio. Wegen als auch die höchste Verkehrsleistung mit 3803 Mio. Pkm auftreten [56]. Die Abbildungen 3.11 und 3.12 zusammenführend, ist das Verkehrsaufkommen in städtischen Verkehrszellen im Frühjahr höher als im Restjahr und die Verkehrsleistung erreicht den Maximalwert an einem Freitag im August. Für die folgenden Betrachtungen wird daher ein Freitag als Referenztag ausgewählt. Um die Datenbasis nicht unnötig zu verjüngen, werden für die präzise Ermittlung der Anzahl und Verteilung von Verkehrsaufkommen und -leistung alle Freitage des Jahres in der Auswahl behalten.

Die Filterkategorie *Distanz* entnimmt dem Datensatz abschließend Wege, welche nicht in den Untersuchungsschwerpunkt einer Verkehrszelle passen. Dazu wird eine Stufung vorgenommen: Zuerst werden dem Datensatz in diesem Abschnitt alle Wege über 100 km Länge und Ausreißer, deren Startzeit nicht zugeordnet werden kann, entnommen. Damit wird die Verkehrszelle als generisches Untersuchungsgebiet allgemein auch mit längeren Distanzen beschrieben. Serviceagenten sind hingegen für die Substitution des Nahverkehrs vorgesehen, so dass die zulässigen Transportanfragen im zweiten Schritt nur noch Distanzen bis 50 km umfassen (vgl. dazu Abschnitt 3.3.2). Diese Stufung erlaubt es einerseits, die Substitution des Nahverkehrs in den großräumigen Personenverkehr einzuordnen. Andererseits verkleinern kürzere Distanzen das theoretische Einsatzgebiet und erhöhen damit die Wahrscheinlichkeit der lokalen Verfügbarkeit eines Agenten.

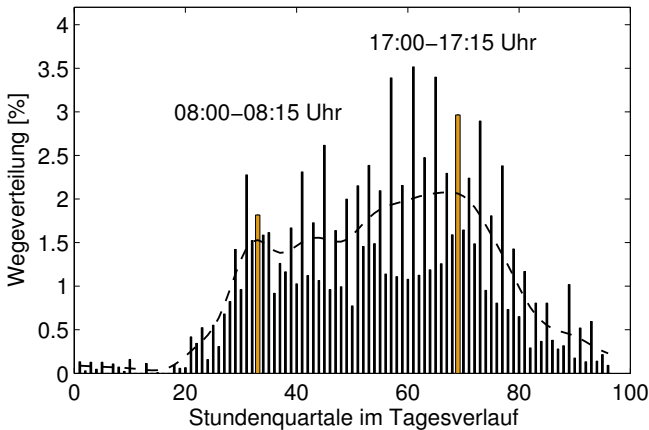


Abbildung 3.13: Verteilung der Startzeiten der Wege an einem Freitag inklusive Regressionsgraph zum Ausgleich der Befragungsunschärfe. Quelle: Auswertung von [58].

Als gewichtete Grundgesamtheit für repräsentative statistische Auswertungen verbleiben in der ersten Stufe 5967 Wege. Abbildung 3.13 gibt eine Übersicht der typischen Verteilung der Startzeiten dieser Wege an einem

Freitag auf Basis der Rohdaten. Ein Balken repräsentiert dabei ein Stundenquartal mit 900 s. Die in den Eingangsdaten vorliegende starke Schwankung der Startzeiten innerhalb einer Stunde wird auf die Befragungsmethodik zurückgeführt. Es wird angenommen, dass durch die Befragten ganze- und halbe Stunden häufiger als Zeiten dazwischen genannt werden. Diese Annahme wird durch die Theorie der sensorischen Adaption und das *Weber'sche Gesetz* der Psychophysik zur Wahrnehmung unterschiedlicher Reize gestützt [91]. Das Abschätzen des tatsächlichen, stetigen Verlaufs erfolgt durch eine Kerndichteschätzung nach Nadaraya-Watson ([77]), das Ergebnis ist mit der gestrichelten Linie veranschaulicht. Gegenüber einer linearen Regression ermöglicht das Verfahren der Kerndichteschätzung (Kernel-Regression) einen verbesserten Rückschluss auf nicht-lineare Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Hervorgehoben sind die beiden Zeitpunkte des höchsten Verkehrsaufkommens nach Durchführung der Regression.

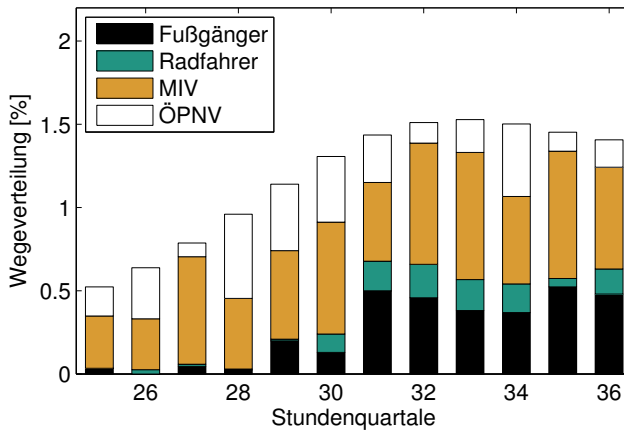


Abbildung 3.14: Einsatz der Verkehrsmittel in der Verkehrszelle für einen Freitag zwischen 06:00 Uhr und 09:00 Uhr. Quelle: [90] als Auswertung von [58].

Mit Abbildung 3.13 wird deutlich, dass innerhalb eines Stundenquartals im Tagesverlauf zwischen 06:00 Uhr und 22:00 Uhr zwischen 1 % und 2 % der

Wege des gesamten Tages anfallen. Wird die modale Teilung des Gesamtwegeaufkommens in einem Stundenquartal in diesem Zeitfenster betrachtet, ergeben sich für die Fußgänger 0,42 %, für die Radfahrer 0,12 %, für den Pkw 0,71 % und für den ÖPNV 0,23 %. In der Summe entspricht dies 1,48 % durchschnittlichem Wegeaufkommen pro Stundenquartal. Die Anwendung der Kerndichteschätzung führt zu der modalitätsspezifischen Verteilung in Abbildung 3.14. Der Darstellung kann entnommen werden, dass sich der Einsatz der Verkehrsmittel schon im viertelstündigen Raster deutlich ändert und die Durchschnittswerte des Tages nicht herangezogen werden können. Daraus abgeleitet ist diese Auflösung mindestens erforderlich, um die Einsätze von Serviceagenten zu planen. In die Simulation werden die prozentualen Verteilungen in einem Stundenquartal auf das Ergebnis der Kernel-Regression für dieses Stundenquartal aus Abbildung 3.13 skaliert.

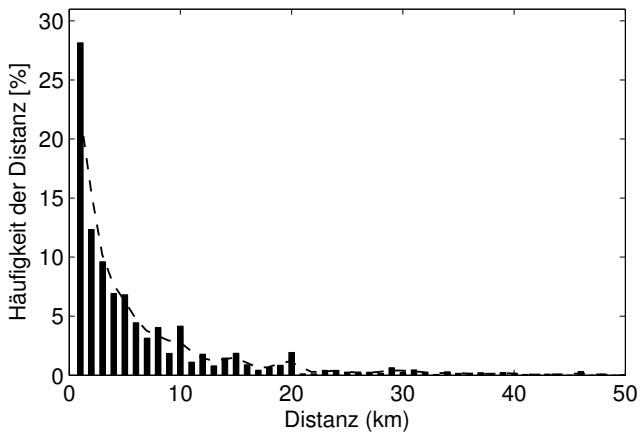


Abbildung 3.15: Distanzen der nachgefragten Wege in Städten an einem Freitag.
Quelle: Auswertung von [58].

In Abbildung 3.15 ist die allgemeine Verteilungsfunktion der nachgefragten Distanzen für den gewählten Tag gegeben. Zur Bildung der Ausgleichskurve wurde erneut auf die Kerndichteschätzung zurück gegriffen. In der Simula-

tion wird nicht diese übergeordnete Verteilung verwendet, sondern für jede Modalität und das angewählte Stundenquartal das typische Distanzverteilungsprofil erstellt. Zur Vollständigkeit gibt Anhang A.7 die Verteilungsfunktion über die typische Dauer von Wegen in Städten.

	07:00 Uhr			08:00 Uhr
	15	30	45	
Fuß	[25 %] 01761ua 01761uv	[16 %] 01762ua 01762uv	[62 %] 01763ua 01763uv	[56 %] 01764ua 01764uv
	[03 %] 01761aa 01761av	[34 %] 01762aa 01762av	[55 %] 01763aa 01763av	[61 %] 01764aa 01764av
MIV	[24 %] 01761ia 01761iv	[40 %] 01762ia 01762iv	[27 %] 01763ia 01763iv	[48 %] 01764ia 01764iv
	[79 %] 01761oa 01761ov	[78 %] 01762oa 01762ov	[56 %] 01763oa 01763ov	[24 %] 01764oa 01764ov

Abbildung 3.16: Indizierung der Wegedaten aus Sicht der begonnen Wege für eine Viertelstunde. Quelle: Vorgestellt in [90], Werte nach [56].

Für einen präzisen Zugriff innerhalb des Modalitätsmodells auf die zugeschnittenen Daten wird das mit [90] vorgestellte und in Abbildung 3.16 aufgezeigte Indizierungssystem verwendet. Abgebildet ist die 176. Stunde des Jahres 2016, der Zeitraum von 07:00 Uhr bis 08:00 Uhr am Freitag den 08. Januar. Exemplarisch ist in den eckigen Klammern der prozentuale Anteil vom Tagesspitzenwert der betreffenden Modalität für diese 15 Minuten angegeben. Im MID-Datensatz sind Pkw-Fahrer und Pkw-Mitfahrer separat ausgewiesen. Für die Planung der benötigten Sitzplätze sind beide Kategorien als MIV zusammengefasst. Ferner existiert durch Serviceagenten keine Multimodalität: Von einem einzelnen Datum wird nur die Modalität mit der längsten Strecke als Hauptverkehrsmittel herangezogen.

Die Kodierung der Wege weist mit den ersten vier Ziffern die Stunde des Jahres aus (Maximalwert: 8760) und an fünfter Stelle das kalkulierte Quartal. Der erste Buchstabe repräsentiert die Modalität (u: Fuß, a: Fahrrad, i: MIV, o: ÖPNV). Hinter einem (a) als letzten Buchstaben liegt die Anzahl der Wege als skalarer Wert. Das (v) weist auf eine Verteilungsfunktion hin, mit welcher Häufigkeit welche Distanz in diesem Quartal benötigt wird [90]. Zusammenfassend kann auf das Wegeprofil eines typischen Freitags in Kernstädten mit 96 Stundenquartalen und in den vier wesentlichen Modalitäten des Personennahverkehrs zugegriffen werden. Im folgenden Abschnitt wird die prozentuale Verteilung durch einen Gebietszuschnitt in absolute Zahlen umgesetzt. Dadurch kann in letzter Verfeinerung für eine Modalität zu einem Zeitpunkt und für eine Distanz auch die Verteilung der Sitzanzahl der benötigten Agenten als diskreter Wert ermittelt werden.

3.2.2 Zuschnitt der Referenzverkehrszelle

Nach der Vorstellung der Muster der Abläufe und Erfordernisse eines typischen Freitags in Kernstädten und Agglomerationsräumen wird in diesem Abschnitt eine Referenzverkehrszelle C_{ref} in absoluten Zahlen berechnet. Als Einwohnerzahl wird für die Referenzverkehrszelle 20000 gewählt und das korrigierte Verteilungsprofil aus Abbildung 3.13 als Berechnungsgrundlage übernommen. Bei einer gleichmäßigen Verteilung von Verkehrszellen in Städten entsprechen 20000 Einwohner 170 Verkehrszellen in Berlin oder 15 Verkehrszellen in Karlsruhe. Für die Skalierung zeigt Tabelle 3.4 das Ergebnis des Datenzuschnitts durch die drei Hauptfiltergruppen hinsichtlich Verkehrsaufkommen und Verkehrsleistung zahlenmäßig auf.

Anhand der Zahlen für Verkehrsaufkommen und -leistung kann die Bedeutung der Filterkategorie *Distanzen* abgelesen werden. Von den an einem typischen Freitag in Kernstädten in Deutschland begonnenen 70 Mio. Wegen, kommen 61 Mio. für einen Betrieb durch Serviceagenten in Frage, entsprechend 87 %. Da die Referenzverkehrszelle städtischen

Personenverkehr abbildet, kann als Vergleichsmaßstab die Dichte von Pkw in den Deutschen Stadtstaaten verwendet werden. In diesen existieren durchschnittlich 399 Pkw pro 1000 Einwohner (vgl. Abschnitt 2). Auf die Referenzzelle bezogen und ohne Substitution durch Serviceagenten entspricht das 7980 Pkw.

Filter	Wege	E* [Mio.]	VA** [Wege]	VL*** [Pkm]
Standard	193290	82,2	281	3214
- Regionstyp	42781	18,2	62	625
- Wochentag	6933	18,2	70	809
- Distanzen	5967	18,2	61	408

Tabelle 3.4: Ausgangsdatensatz und Zielzuschnitt am Referenztag (jeweils gewichtet). *E: Einwohner (Mio.), **Verkehrsaufkommen (Mio.), ***Verkehrsleistung (Mio.). Quellen: [58] und [90].

Um dieselbe Mobilitätsnachfrage decken zu können, muss zu den einzelnen Zeitscheiben in den MOZ eine bestimmte Anzahl an Agenten vorgehalten werden. Mit der Simulation wird der existierenden Pkw-Flotte die benötigte Anzahl an Serviceagenten gegenübergestellt, welche modalitätsspezifisch die Betriebsituationen des Tages decken kann.

Typ	Datensätze	Einwohner	VA* [Wege]	VL** [Pkm]
C_{ref}	5967	20000	66662	448285

Tabelle 3.5: Werte der Referenzverkehrszelle. *Verkehrsaufkommen, **Verkehrsleistung. Quellen: Zuschnitt von [58], vorgestellt in [90].

Für einen durchschnittlichen Freitag als Tag der wöchentlichen Spitzenlast im Straßenverkehr ergeben sich skaliert auf die gewählte Bevölkerungsgröße die in Tabelle 3.5 dargestellten Werte. Verkehrsaufkommen und

Verkehrsleistung sind das Ergebnis der Rückrechnung von der gesamten Bevölkerung in Deutschland nach Anwendung der Filter. Für die Modellierung werden diese Zahlen als Referenzwerte verstanden und bilden das verkehrstechnische Eingangsprofil für die Dimensionierung der Flotte von Serviceagenten in Kapitel 4. Für die Referenzverkehrszelle und die einzelnen Stundenquartale im Tagesverlauf ergibt sich mit dem Zuschnitt der Wege des vorherigen Abschnitts das in Abbildung 3.17 gezeigte Wegeprofil.

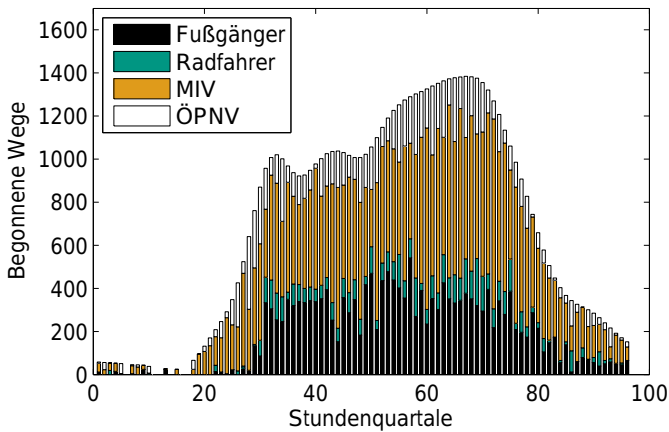


Abbildung 3.17: Wegeprofil der Referenzverkehrszelle in absoluten Werten. Quellen: Auswertung von [58], vorgestellt in [90].

Mit je über 1000 begonnenen Wegen ist der Nachmittag zwischen den Quartalen 50 und 75 die charakteristische Spitzenlast des Tages. Im Zeitfenster zwischen den Quartalen 83 und 26 werden auf der anderen Seite deutlich unter 500 Wege begonnen. Diese Größenordnung für Agglomerationsräume und Kernstädte kann durch Veröffentlichungen von Resultaten mit der Simulationssoftware MATSim ([76]) auf Basis von räumlich verteilten Eingangsdaten der BVG in Berlin verifiziert werden. Von 4,4 Mio. Einwohnern und Touristen („synthetic persons“ nach [78]) im städtischen Großraum verbleiben für die Analyse einer innerstädtischen

Taxiflotte noch 3,2 Mio. Einwohner in [19]. In dem dort aufgestellten Szenario fahren zu der nachmittäglichen Lastspitze in einem Stundenquartal etwa 65000 Pkw in das Berliner Verkehrsnetz ab. Das entspricht etwa 2 % der Einwohner, welche Teil des MIV werden. In der vorgestellten Referenzverkehrszelle mit 20000 Einwohnern starten in einem Quartal zur Lastspitze etwa 670 Pkw. Dies entspricht 3 % der betrachteten Einwohner. Es muss dabei berücksichtigt werden, dass auch im städtischen Vergleich innerhalb Deutschlands die Dichte an Pkw in Berlin den geringsten Wert aufweist (vgl. Abschnitt 2.5.2). Die Referenzverkehrszelle bildet damit eine durchschnittliche deutsche Stadt ab, welche gegenüber Berlin eine leicht erhöhte Nachfrage im MIV aufweist.

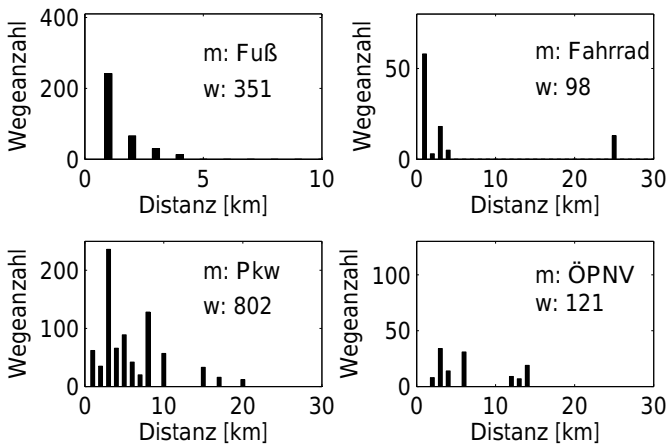


Abbildung 3.18: Vergleich der Distanzverteilungen innerhalb der Modalitäten für das Zeitfenster 15:45–16:00 Uhr. m: Modalität, w: Anzahl der Wege. Quelle: Auswertung von [58].

Die beiden Abbildungen 3.18 und 3.19 zeigen für die Referenzzelle die unterschiedlichen Verteilungen innerhalb eines Quartals im Vergleich der Modalitäten und die Unterschiede in den Verteilungen innerhalb einer Modalität bei variierenden Stundenquartalen. Zur Erhöhung der Lesbarkeit ist

die Abszisse auf 10 km bzw. 30 km verkürzt. Die ausgewählten Quartale für den Pkw repräsentieren die morgendliche Lastspitze (08:00–08:15 Uhr, Quartal 33), die Mittagsstunde (12:00–12:15 Uhr, Quartal 49), die abendliche Lastspitze (16:30–16:45 Uhr, Quartal 67) und einen Zeitpunkt am späteren Abend (21:45–22:00 Uhr, Quartal 84). Es ist ersichtlich, dass zu dem generellen Verteilungsprofil aus Abbildung 3.15 deutliche Abweichungen existieren. Auf dieser feingranularen Darstellung kann eine präzise Einsatzplanung von Agenten erfolgen, da auch Spitzenwerte erfasst werden.

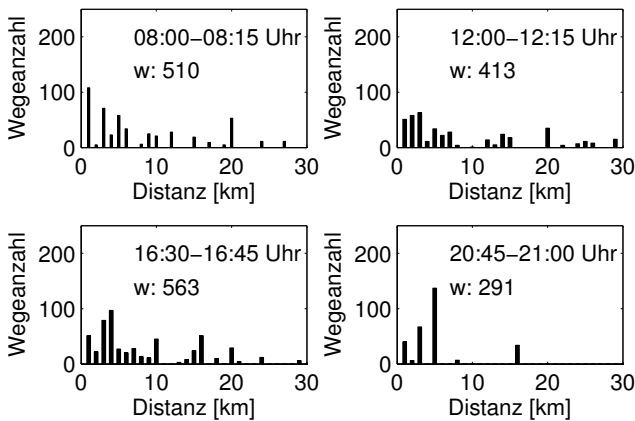


Abbildung 3.19: Vergleich der Distanzverteilungen innerhalb der Modalität MIV zu unterschiedlichen Tageszeitpunkten. w: Anzahl der Wege.
Quelle: Auswertung von [58].

In Ergänzung zu dem Verkehrsaufkommen für die ausgewählten Quartale ist in Tabelle 3.6 die Verkehrsleistung in der Referenzverkehrszelle herausgestellt. Zum Vergleich der Zahlen wird die gemittelte Einsatzdistanz ED_M ohne Personengruppenschlüssel herangezogen. Es ist ersichtlich, dass die durchschnittliche Länge städtischer Wege pro Person zu Fuß bei etwa 1,6 km liegt, während beim Fahrrad 4,4 km anfallen. Bei MIV und ÖPNV liegen die Distanzen einer durchschnittlichen Fahrt bei etwa 9,0 km. Gegenüber unspezifischen Literaturwerten aus Verkehrserhebungen liegen

die Zahlen für Fuß und Rad leicht über dem deutschen Durchschnitt (Fuß: 1,1 km, Rad: 3,4 km, MIV: 9,6 km und ÖPNV: 9,3 km) [91].

Modalität	Fuß	Rad	MIV	ÖPNV
<i>Quartal: 33</i>				
Verkehrsaufkommen	254	124	510	132
Verkehrsleistung [Pkm]	465	879	5071	1318
<i>Quartal: 49</i>				
Verkehrsaufkommen	417	38	413	154
Verkehrsleistung [Pkm]	683	89	3539	1110
<i>Quartal: 67</i>				
Verkehrsaufkommen	377	160	563	284
Verkehrsleistung [Pkm]	499	435	4790	2632
ED_M [Pkm]	1,6	4,4	9,0	8,9

Tabelle 3.6: Verkehrsaufkommen, Verkehrsleistung und gemittelte Einsatzdistanzen ED_M in der Referenzverkehrszelle für Distanzen bis 100 km in ausgewählten Quartalen. Quelle: Berechnung nach [58].

Die für die Abbildungen 3.18 und 3.19 ermittelte Wegezanzahl entspricht nicht der Anzahl an benötigten Agenten, da die Anzahl an Sitzplätzen die Fahrzeuganzahl reduziert. Im folgenden Schritt wird daher die für die modularisierte Einsatzplanung der Agenten erforderliche Sitzplatzanzahl vorgestellt. Im Rahmen des Wegedatensatzes der MID ist die Anzahl an Begleitpersonen eines Weges ausgewiesen; diese ist jedoch nicht sensitiv auf die Verkehrsleistung. Wird innerhalb des Modells ein Weg mit mehr als einer Person gezogen, wird diese Anzahl innerhalb der betreffenden Modalität dem abzufahrenden Pool an Wegen des Stundenquartals entnommen. Nach Auswertung der Daten werden insgesamt nur 1,5 % der Wege mit fünf oder mehr Personen durchgeführt. Diese Kategorien werden daher im

Folgenden vernachlässigt und die Sitzanzahl in der Modellierung auf vier Sitze als maximale Sitzplatzanzahl des größten Serviceagenten beschränkt. Eine Übersicht der Häufigkeitsverteilung der benötigten Sitzplätze für alle Stunden quartale gibt Abbildung 3.20.

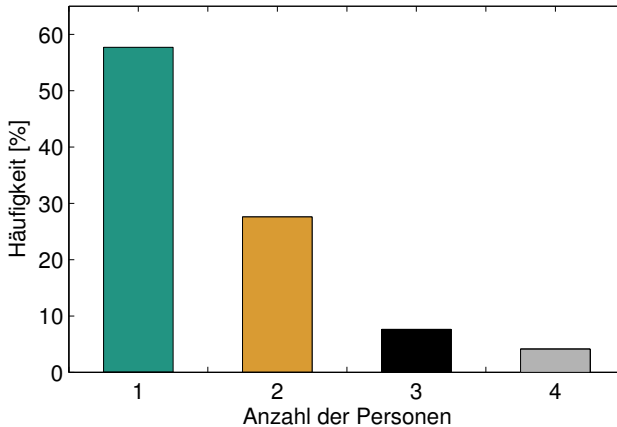


Abbildung 3.20: Verteilung der Wege nach Sitzplätzen in Serviceagenten. Quelle: Auswertung von [58].

Technisch betrachtet könnten alle angeforderten Wege in Ein- und Zweisitzer aufgespalten werden. Damit könnte der Einsatz von Drei- und Viersitzern vollständig vermieden werden. Dies würde jedoch nicht den Wunsch der Passagiere in den Vordergrund stellen, auch in kleineren Gruppen Wege gemeinsam zurück zu legen. Vielmehr könnte eine derartige betriebliche Perspektive die Nachfrage einschränken. Aufgrund des Anspruches, modularisierten aber am Wunsch des Passagiers orientierten Nahverkehr für die Mehrheit der Bevölkerung anbieten zu können, werden folgend alle vier Fahrzeugkategorien gemeinsam untersucht. Dabei wird vorausgesetzt, dass ein angefragter Einsatz von einem Agenten mit der exakt erforderlichen Sitzplatzanzahl abgefahren wird. Beispielsweise erhält eine Gruppe von drei Personen immer einen Dreisitzer. Die Anwahl eines zu großen Agenten

als produktpolitische Maßnahme wird nicht untersucht. Mit dem einsitzigen Basisagenten und vier komfortableren Agenten mit ein- bis vier Sitzplätzen existieren damit fünf verschiedene Typen von Fahrzeugen für den Personentransport im Nahverkehr. Die Verteilung der Sitzplatzanzahl in den Stundenquartalen für die beiden Modalitäten Pkw und ÖPNV unterliegt keiner erkennbaren Funktion. Das Modalitätsmodell ermittelt diese Werte für jedes Quartal neu, so dass die benötigten Sitzplatzkapazitäten in der MOZ vorgehalten werden können.

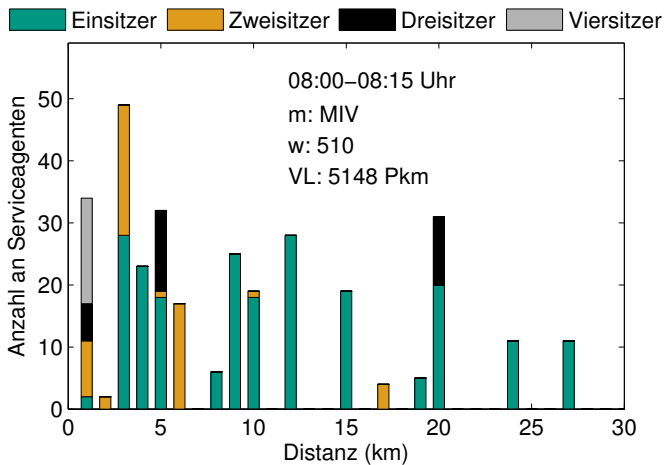


Abbildung 3.21: Einsatzanforderungsprofil zur Vollsubstitution des MIV am Morgen. m: Modalität, w: Wege, VL: Verkehrsleistung. Quellen: Auswertung von [58], vorgestellt in [90].

Die Datenanalyse abschließend, liegen die in Abbildung 3.9 geforderten Informationen für jedes Verkehrsmittel vor. Jeder Weg ist nach Zeit, Distanz, benötigten Sitzplätzen und bisher eingesetztem Verkehrsmittel beschrieben. Abbildung 3.21 gibt exemplarisch für die morgendliche Lastspitze des MIV (08:00–08:15 Uhr, Quartal 33) einen Überblick über die benötigten Serviceagenten. Der Abbildung kann entnommen werden, dass in diesem Quartal 510 Wege verteilt auf 16 verschiedene Distanzen angefordert

werden. Werden alle Fahrten verrichtet, wird eine Verkehrsleistung von 5 148 Pkm umgesetzt. Gut ersichtlich ist, dass die einzelnen Distanzen eine unterschiedliche Anzahl an Sitzplätzen erfordern.

Nach Zuschnitt und Analyse der Daten wird der Fehler berechnet, welcher gegenüber den Ausgangswerten entsteht. Neben dem systematischen Fehler durch Entnahme von Gruppen mit mehr als vier Personen, entsteht zusätzlich ein Fehler durch Auf- und Abrundung nicht ganzzahlig teilbarer Sitzplatzanforderungen zur Substitution einer Modalität. Eine detaillierte Untersuchung dieses Sachverhaltes für alle untersuchten Modalitäten findet sich in Anhang A.8. Im Resultat führt die Zerlegung in Sitzplatzkategorien für den MIV zu einer Reduktion des Verkehrsaufkommens auf 98 % des Eingangswertes aus der MID. Dadurch resultiert ebenso eine verminderte Verkehrsleistung in der Referenzverkehrszelle. Werden die nach Städten in Agglomerationsräumen gefilterten Daten ohne Verteilung nach Sitzplätzen zu Grunde gelegt, liegt die Verkehrsleistung bei 462 806 Pkm. Gegenüber dem *top-down* ermittelten Wert in Tabelle 3.5 entspricht das *bottom-up* einem Fehler durch Regression der Distanzverteilung und Rundung von 3,2 %. Die geringen Fehler in den Sitzplatzverteilungen der Modalitäten reduzieren die Verkehrsleistung im Modell auf 446 774 Pkm. Durch das geringfügig kleinere Verkehrsaufkommen wird damit nahezu der Zielwert von 448 285 Pkm erreicht. Zusammengefasst ist weder der Fehler zur Berechnung des Verkehrsaufkommens, noch der Fehler zur Berechnung der Verkehrsleistung als kritisch für die Simulationsresultate einzustufen.

3.2.3 Räumliche Struktur der Referenzverkehrszelle

Im letzten Abschnitt dieses Kapitels wird die Referenzverkehrszelle räumlich vorgestellt. Um das Potential zu ermitteln, ruhenden Verkehr durch Einsatz von Serviceagenten zu vermeiden, wird die derzeitige Flächeninanspruchnahme durch stillstehende Pkw benötigt. Aufgrund der guten Datenverfügbarkeit werden für die räumliche Dimensionierung die Berliner

Bezirke als Maßstab herangezogen, folgende Zahlenwerte basieren auf der Flächenerhebung in [4]. Da in Berlin allein Wald- und Wasserflächen 25 % der gesamten Bodenfläche ausmachen, wird für die Flächenvergleiche nur die Siedlungs- und Verkehrsfläche (SuV) herangezogen. Mit dieser Subkategorie werden neben der gesamten Verkehrsfläche ebenso Gebäude- und Freiflächen, Betriebsflächen ohne Abbauland, Erholungsflächen und Friedhöfe insgesamt zusammengefasst. Der Anteil der Straßenfläche an der SuV schwankt zwischen 12 % und 23 %, mit einem Durchschnittswert von 16 %. Nur auf die SuV bezogen, schwankt die Einwohnerdichte Berlins zwischen 3800 Einwohnern/km² (Spandau) und 13800 Einwohnern/km² (Friedrichshain-Kreuzberg). In Anlehnung an diese Einwohnerdichten entspricht die Fläche der Referenzverkehrszelle mit 20000 Einwohnern zwischen 1,5 km² und 5,2 km². Die Bewohner dieser Fläche fragen $w_{C,T}$ nach. Je nach Bezirk kommen auf einen Quadratkilometer Straßenfläche zwischen 22500 Einwohner und 59000 Einwohner, im Berliner Durchschnitt sind es 34700 Einwohner. Wird die Straßenfläche über die Einwohneranzahl auf die Bevölkerungsgröße der Referenzverkehrszelle skaliert, existiert in einer Referenzzelle eine Straßenfläche von durchschnittlich 0,58 km², entsprechend 16 % der gesamten SuV.

Ergänzend kann die Straßenlänge der Bezirke nach [93] herangezogen werden. Nach Umrechnung liegen je nach Bezirk zwischen 22 km und 55 km in einer (Berliner) Referenzverkehrszelle. Die resultierende durchschnittliche Straßenbreite mit 16 m bis 25 m wird als Verifikation der Umrechnung verstanden. Wird nach [39] auf die ermittelte Straßenbreite das festgeschriebene Raummaß einer Fahrspur für zweistreifige Hauptverkehrsstraßen mit hoher Begegnungswahrscheinlichkeit großer Verkehrsteilnehmer mit 3,5 m angesetzt, kann die Länge einer theoretischen, einzelnen Fahrspur für die Referenzzelle berechnet werden. Diese Länge variiert zwischen 89 km und 222 km. Zusammenfassend gibt Tabelle 3.7 eine Übersicht über die räumliche Struktur der Referenzverkehrszelle. *Bezirk 1* charakterisiert einen städtischen Bezirk mit geringer Einwohnerdichte (Spandau),

Bezirk 2 hingegen einen extrem urbanen Bezirk mit auch im bundesdeutschen Vergleich hoher Einwohnerdichte (Friedrichshain-Kreuzberg). Der Durchschnittswert repräsentiert die Mittelwerte von Berlin. Insgesamt ist zu berücksichtigen, dass die Ableitung der Größen systematisch geographische Merkmale von Berlin aufweist. Die Zahlen für andere urbane Ballungsräume können davon abweichen.

Parameter	Einheit	Bezirk 1	Berlin	Bezirk 2
SuV an Bezirksfläche	[%]	63	70	93
Einwohnerdichte	[E/km ²]	3 812	5 419	13 751
Fläche von C_{ref}	[km ²]	5,7	3,2	1,5
Straßenfläche	[km ²]	0,63	0,58	0,34
Anteil Straßenfläche	[%]	12	16	23
Straßenlänge	[km]	41	32	14
Spez. Straßenlänge	[km/km ²]	7,7	8,6	9,4
Theoretische Fahrspur	[km]	163	158	96

Tabelle 3.7: Räumliche Struktur einer Referenzverkehrszelle in Anlehnung an geographische Merkmale der Stadt Berlin. Bezirk 1 repräsentiert eine Zelle in Berlin-Spandau, Bezirk 2 eine Zelle in Friedrichshain-Kreuzberg. Quellen: Berechnung nach [39], [4] und [93].

Zusammengefasst wurde in diesem Abschnitt unter Verwendung des Bewegungsmusters des Personenverkehrs kernstädtischer Bevölkerung in Deutschland der Referenzverkehrszelle ein Wegeprofil in absoluten Zahlen zugeschnitten. Dieses dient als Anforderungsprofil für die Einsatzplanung von Serviceagenten. Für die Ermittlung des Potentials, durch vermiedenen ruhenden Verkehr städtischen Raum wieder freizugeben, wurde die Referenzverkehrszelle flächenmäßig untersucht.

3.3 Fahrtmodellierung

3.3.1 Phasenmodell

In diesem Abschnitt wird die Fahrtmodellierung vorgestellt, welche den einzelnen Transportprozess eines Serviceagenten in der Verkehrszelle abbildet. Schwerpunkt dabei ist das Ermitteln von Dauer und Stromkonsum einer konkreten Streckenanfrage. Als erster Schritt erfolgt die Zerlegung einer Anfrage in Phasen. Allgemein ist jedem Einsatz eines Agenten eine Einsatznummer zugeordnet. Mehrere Einsätze zusammen ergeben eine Wegekette, welche durch einen Agenten abgefahren wird, bis eine Rückkehr zur MOZ erfolgt. Ein einzelner Einsatz zu einem Zeitpunkt im Tagesverlauf t wird im Folgenden Kettenelement k genannt und umfasst die Gesamtstrecke $s(k, t)$. Bevor ein einzelnes Kettenelement beginnt, hat ein Passagier m eine Anfrage mit Zieleingabe, Sitzplatzanzahl, Komfortniveau und weiteren persönlichen Präferenzen an den Mobilitätsdienstleister gestellt. Der Zeiteinsatz $d(k, t)$ und der Energieverbrauch $e(k, t)$ sind damit vor Fahrtantritt bekannt (vgl. Abschnitt 3.4.4). Für die Modellierung wird die gestellte Beförderungsaufgabe als vollständiges Kettenelement des Betriebs eines Agenten mit der konkreten Distanzanfrage s_m in Anlehnung an den Taxibetrieb in [74] in vier Phasen unterteilt:

- *Phase I: Transfer*

Nachdem der Passagier mit einer Zieleingabe einen Agenten angefordert hat, erfolgt in diesem Zeitfenster die Anfahrt. Dabei wird ein Transferstreckenstück abgefahren. Der Mobilitätsdienstleister finanziert diese Leerzeit d_I , welche in der Modellierung pauschal mit zwei Minuten angenommen wird. Dieser Wert wird als annehmbare Wartebereitschaft durch die Kunden verstanden und deckt sich zudem mit dem Medianwert von Simulationsresultaten mit zu Grunde liegendem Verkehrsnetz [19].

- *Phase II: Personalisierung*

Der Passagier räumt persönliche Gegenstände in das Fahrzeug, steigt ein und legt das Ziel fest. Auch dieses Zeitfenster d_{II} wird in der Modellierung mit zwei Minuten abgebildet, wobei gegenüber d_I vereinfachend angenommen wird, dass keine Energie konsumiert wird.

- *Phase III: Beförderung des Passagiers*

Der Passagier wird über das von ihm angeforderte Streckenstück s_m zum Zielort transportiert. Die für die Modellierung verwendete Methodik zur vorgelagerten Ermittlung des Zeit- und Energieeinsatzes der Phase III ist zentraler Bestandteil dieses Abschnittes.

- *Phase IV: Beendigung des Transports*

Am Zielort entnimmt der Passagier transportierte Gegenstände und verlässt das Fahrzeug. Für diese Phase wird eine Minute Zeitaufwand d_{IV} und kein Energiekonsum angenommen.

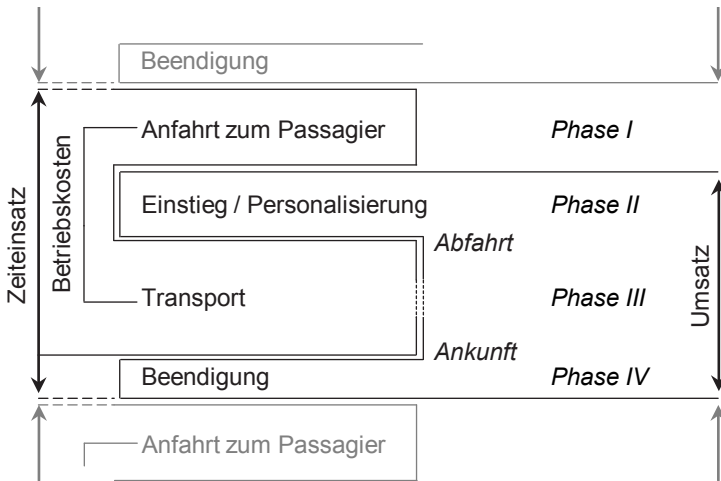


Abbildung 3.22: Schematischer Ablauf des Einsatzes eines Serviceagenten.

Je nach Größe des elektrischen Speichers und der angeforderten s_m erfolgt eine bestimmte Anzahl an Kettenelementen mit den vorgestellten vier Phasen bevor zu einer MOZ zurückgekehrt wird. Eine graphische Darstellung des Ablaufs zur Grundlage der ökonomischen Berechnung gibt Abbildung 3.22. Es ist ersichtlich, dass der Passagier nur für die drei letzten Phasen bezahlt und bei der Kostenkalkulation die Zeitverluste der Anfahrt zum nächsten Passagier berücksichtigt werden müssen. Die Nomenklatur des Ablaufs wird durch Abbildung 3.23 verdeutlicht. Während s_m das Resultat der Ziehung eines nachgefragten Weges im Stundenquartal darstellt, sind die mit „Wert“ gekennzeichneten Felder die für jeden Einsatz gesuchten Größen, welche im folgenden Abschnitt bestimmt werden.

	k_{m-1}	k_m				k_{m+1}
Phase		I	II	III	IV	
Name		Transfer	Einstieg	Einsatz	Ausstieg	
Strecke [m]		s_I [Wert]	s_{II} 0	s_{III} [s_m]	s_{IV} 0	
Dauer [s]		d_I 120	d_{II} 120	d_{III} [Wert]	d_{IV} 60	
Energie [kWh]		e_I [Wert]	e_{II} 0	e_{III} [Wert]	e_{IV} 0	

Abbildung 3.23: Nomenklatur des Phasenmodells, hervorgehoben die zentrale Phase III.

Für die Berechnungen wird davon ausgegangen, dass die Fahrbahnen der Verkehrsflächen hochpräzise georeferenziert sind und in einem digitalen Raster der MOZ als Verkehrskordinator zur Verfügung stehen. Des Weiteren wird angenommen, dass für die einzelnen Streckenstücke von der Tageszeit abhängig zulässige Maximalgeschwindigkeiten bekannt sind. Für die

Simulation wird die seitens m in k nachgefragte Strecke s_m in n äquidistante Blöcke p_n der normierten Länge $s(p_n) = 100\text{m}$ unterteilt. Abbildung 3.24 veranschaulicht diese Partionierung. Wird eine Strecke von 1000m gezogen, werden $n = 10$ Teilblöcke berechnet.

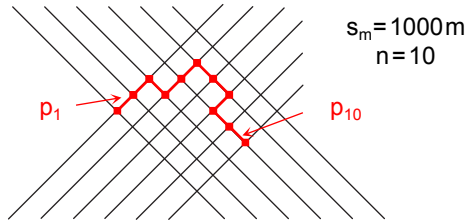


Abbildung 3.24: Partitionierung der nachgefragten Distanz im Verkehrsrastraster.

Nur im idealen Fall ist die exakte Auslastung der Streckenstücke der angeforderten Fahrt für zukünftige Zeitschritte durch Prädiktion aller einzelner Teilnehmer bekannt und damit die Fahrt verzögerungsfrei. Für das Modell wird der realitätsnähere Fall mit Formel 3.4 verwendet, in welchem die Flussgeschwindigkeit $v(p_n, t)$ des Verkehrs zum Zeitpunkt t auf einem Streckenstück p_n mit $l_{ext}(p_n, t)$ durch externe Verzögerungen verlustbehaftet ist.

$$v(p, t) = v_{max}(p, t)(1 - l_{ext_s}(p))(1 - l_{ext_q}(p, t)) \quad (3.4)$$

Einerseits hat die gewählte Route, andererseits die Dichte des Verkehrs einen Einfluss auf die tatsächliche Dauer einer Fahrt. Die erste Verlustgruppe umfasst wegspezifische Verlangsamungen durch Krümmungen, Kreuzungen und Anstiege und wird durch den Verlustfaktor $l_{ext_s}(p)$ repräsentiert. Die mit $l_{ext_q}(p, t)$ berücksichtigten Verluste umfassen Änderungen der Verkehrsdichte auf dem Streckenstück, wie beispielsweise Stau oder temporäre und lokale Einschränkungen. Im Grenzfall $l_{ext_s}(p) = l_{ext_q}(p, t) = 0$ könnten alle Teilnehmer mit der maximal zulässigen Geschwindigkeit $v_{max}(p_n, t)$ auf diesem Streckenstück fahren. Vor Befahren eines Streckenstücks erhält jeder Serviceagent die Information über die für den Moment des Befahrens

gültige $v(p_n, t)$. Die in der Simulation verwendeten $l_{ext_s}(p)$ und $l_{ext_q}(p, t)$ werden im folgenden Abschnitt vorgestellt. Die Dauer $d(p_n, t)$ für das Befahren von p_n ergibt sich nach Formel 3.5; die Dauer der gesamten Strecke einer Phase III (d_{III}) nach Formel 3.6.

$$d(p_n, t) = \frac{s(p_n)}{v(p_n, t)} \quad (3.5)$$

$$d_{III}(t) = \sum_{p=1}^n d(p_n, t) \quad (3.6)$$

Damit ergibt sich die Gesamtzeit $d(k, t)$ für einen Passagier über die Phasen I-IV eines Kettenelements nach Formel 3.7.

$$d(k, t) = d_I(t) + d_{II} + d_{III}(k, t) + d_{IV} \quad (3.7)$$

Für die graphische Darstellung der Fahrtmodellierung in Abbildung 3.25 wird der ideale Betrieb eines Serviceagenten unter konservativer Annahme der Geschwindigkeitsstufen des heutigen Straßenverkehrs angenommen. Eine Fahrt wird dazu in mehrere Konstantfahrblöcke aufgeteilt. Gegenüber dieser idealen Darstellung verlängern die beiden Faktoren $l_{ext_s}(p)$ und $l_{ext_q}(p, t)$ die Transportdauer. Die exemplarisch ausgewiesenen Zeiten der einzelnen Phasen stellen Minimalwerte dar. Das Fahrtprofil in Phase III mit drei Konstantfahrblöcken ($n = 170$) entspricht der Ausfahrt aus einem Verteilungsgebiet mit 30 km/h auf eine Schnellstraße, auf welcher mit 70 km/h gefahren wird. Anschließend wird der Passagier vor Ankunft an seinem Bestimmungsort durch ein weiteres Verteilungsgebiet gefahren, in welchem erneut nur 30 km/h zulässig sind. In dem dargestellten Beispiel fragt der Passagier zu t einen Weg mit 17 km an. Als angemessene Wartezeit nach einer Buchungsanfrage bis zur Ankunft des Serviceagenten werden zwei Minuten angesetzt. Ferner wird angenommen, dass die vorgelagerte Transferstrecke verlustfrei mit 50 km/h zurückgelegt werden kann. Daraus resultiert eine maximale Entfernung des Agenten vom Passagier vor Buchungsbeginn

von $s_I = 1656$ m. Für die Modellierung wird dieser Wert pauschal verwendet. In Summe legt der Agent damit 18,6 km zurück, für welche aus Sicht des Flottenbetreibers 22 min und 56 s benötigt werden. Der Passagier selbst verwendet den Agenten 120 s weniger.

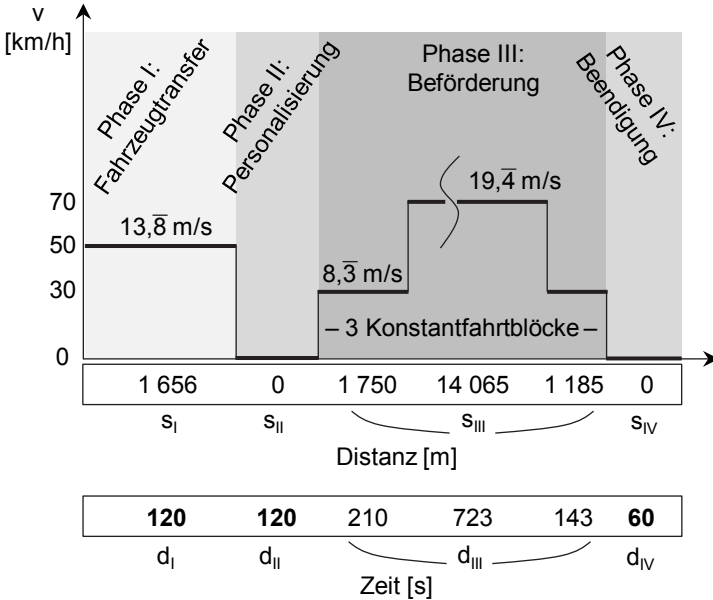


Abbildung 3.25: Phasenmodell des idealen Betriebs eines Serviceagenten mit exemplarischer Beförderungsanfrage von $s_m = 17$ km. Fett: Standardisierte Werte der einzelnen Phasen.

3.3.2 Fahrt und Verzögerung im Verkehrssystem

Innerhalb der Fahrtmodellierung hat das im vorherigen Abschnitt vorgestellte Phasenmodell als Kernroutine eine entscheidende Rolle für die Qualität der Simulationsergebnisse der vorliegenden Arbeit. Ziel dieses Abschnittes ist es daher, das Phasenmodell derart anzupassen, dass es den Straßenverkehr in europäischen Städten abbilden kann.

Serviceagenten sind als Nahverkehrsmittel mit variablem Einsatzbereich bis 50 km konzipiert und haben je nach lokal zu Grunde liegendem Straßenverkehrssystem und angeforderter Distanz eine unterschiedliche Geschwindigkeitsverteilung auf der Strecke. Für eine detaillierte Analyse dieser Bewegung nach Dauer und Stromkonsum ist es nicht ausreichend, eine angeforderte Strecke mit einem durchschnittlichen Stromkonsum zu belegen. Daher scheidet die Verwendung herkömmlicher Fahrzyklen, welche zur Ermittlung streckenunabhängiger Durchschnittsverbräuche herangezogen werden, für die Bewegungsmodellierung aus.

Im Folgenden werden daher zuerst realitätsnahe Werte für die Verluste $l_{ext_s}(p)$ und $l_{ext_q}(p,t)$ herausgestellt und anschließend Verteilungsfunktionen der Konstantfahrtblöcke für konkrete Streckenanfragen erstellt. Die mit $l_{ext_s}(p)$ zusammengefassten, routenspezifischen Verzögerungen berücksichtigen gegenüber der idealen Aneinanderreihung konstanter Fahrtblöcke die Beschleunigungen und Abbremsungen, welche durch Kreuzungen oder Richtungsänderungen entstehen. Da im Rahmen dieser Arbeit keine Georeferenzierung der Wege existiert, wird für jedes p_n pauschal ein zufälliger Wert zwischen 5 % und 10 % berücksichtigt. Für die Bestimmung von $l_{ext_q}(p,t)$ als Minderung des Verkehrsflusses durch ein tageszeitabhängiges Verkehrsdichteprofil wird auf die Daten des *TomTom European Traffic Index* zurückgegriffen. Dieser Index auf Basis der Daten aus 60 Städten vergleicht die tatsächliche Fahrtzeit mit der Fahrtzeit des freien Flusses zur Nachtstunde und drückt den Grad des reduzierten Flusses in einem durchschnittlichen Prozentwert aus. Der Index ist spezifisch für Städte mit mehr als 800000 Einwohnern und weist neben dem Tagesdurchschnitt auch die morgendliche- und abendliche Lastspitze aus. In Abbildung 3.26 ist die verwendete Funktion zur Fahrtzeitverlängerung aufgezeigt.

Für die untersuchten, europäischen Städte liegt die prozentuale Abweichung des benötigten Zeitbedarfs zwischen 14 % (Malmö) und 74 % (Moskau), der europäische Durchschnittswert wird mit 26 % ausgewiesen [109]. Um die Übernahme von Ausreißerwerten zu vermeiden, wird für das Mo-

dell jeweils der Median für die drei Einzelwerte *Tagesdurchschnitt*, *morgendliche Lastspitze* und *abendliche Lastspitze* gewählt. Damit liegt die Erhöhung der Fahrzeit durch Verkehrsdichte gegenüber freier Fahrt in der Nacht ganztägig bei 24,5 % und in den Lastspitzen bei 44 % (morgens zwischen 07:00 Uhr und 09:00 Uhr) und 48,5 % (abends zwischen 17:00 Uhr und 19:00 Uhr). In den Nachtstunden zwischen 22:00 Uhr und 06:00 Uhr wird ein vollständig freier Verkehrsfluss angenommen, welcher ausschließlich durch die Wahl der Route verzögert wird.

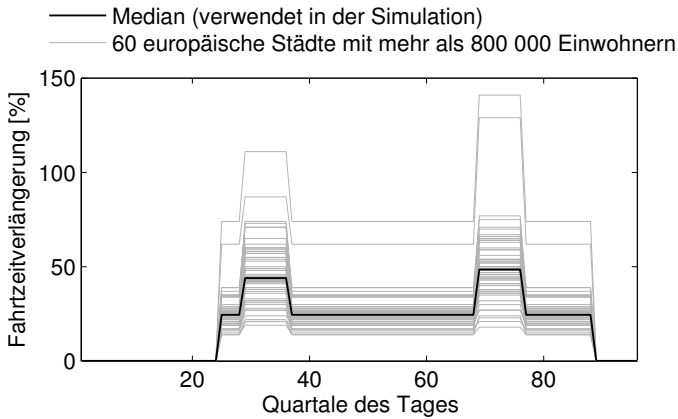


Abbildung 3.26: Fahrzeitverlängerung durch Verkehrsdichte im Tagesverlauf in europäischen Städten. Quelle: In Anlehnung an [109].

Die Zuordnung der Blöcke konstanter Fahrt zu einer nachgefragten Distanz erfolgt unter Berücksichtigung der Verteilung der Geschwindigkeiten bei freier Fahrt nach Abbildung 3.27. Die Ermittlung der in dieser Abbildung verwendeten Graphen basiert dabei auf der Durchschnittsgeschwindigkeit des Berliner Straßenverkehrs für den MIV. Aufgrund der Größe dieser Stadt wird die größte Vielfalt an städtischen Wegen und Distanzen innerhalb Deutschlands angenommen. Als Datengrundlage wird ein Online-Kartendienst [48] systematisch zur Hauptverkehrszeit am Vorabend an unterschiedlichen Wochentagen abgefragt. Kürzere Distanzen kennzeichnen

dabei Wege zwischen zwei Stadtteilen (Exemplarisch: von *Lankwitz* nach *Karlshorst* um 17:45 Uhr). Distanzen über 25 km entsprechen Fahrten von der Stadtmitte radial zu Orten am Stadtrand Berlins oder in Brandenburg (Exemplarisch: vom *Brandenburger Tor* nach *Wannsee* zur gleichen Zeit). Kann zwischen alternativen Routenvorschlägen gewählt werden, wird jeweils die schnellste Route verwendet. Die aus den einzelnen Distanzen und Fahrdauern ermittelten Durchschnittsgeschwindigkeiten werden in Blöcke konstanter Fahrt unterteilt. Dazu werden die in [47] verwendeten Geschwindigkeitsstufen übernommen. Für den Erhalt eines funktionalen Zusammenhangs wird aus den Einzelwerten mittels Kerndichteschätzung (vgl. Abschnitt 3.2.1) eine Ausgleichsfunktion gebildet.

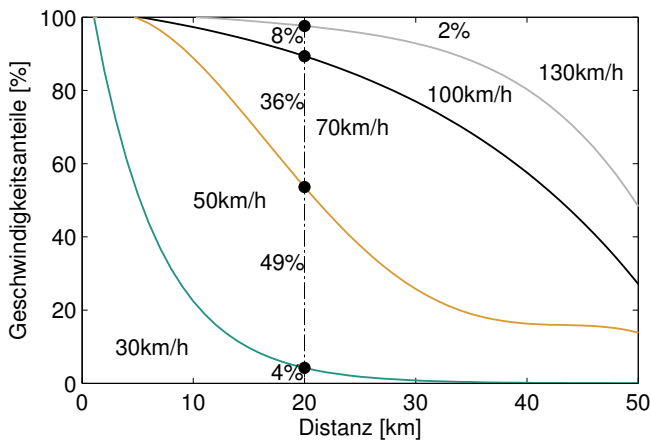


Abbildung 3.27: Zuordnung einer Geschwindigkeitsverteilung bei freier Fahrt für eine Distanz. Markierte Werte für das Beispiel 20 km.

Abbildung 3.28 gibt einen Vergleich der Durchschnittsgeschwindigkeit in Berlin mit den im Modell verwendeten Geschwindigkeitsprofilen. Es ist ersichtlich, dass das erstellte Modell und die gewählten Geschwindigkeitsprofile insbesondere für Distanzen bis 28 km in der Hauptverkehrszeit reale Fahrten sehr gut abbilden. Ebenso ist ersichtlich, dass die Spreizung zwi-

schen freier Fahrt und einer Fahrt zur Hauptverkehrszeit in Berlin relativ klein ist im Vergleich zu den im Modell verwendeten Median-Werten für europäische Städte. Dies kann einerseits darauf zurück geführt werden, dass die zum Erhalt der Referenzdaten ermittelten Werte von Berlin systematisch nicht die in [109] ausgewiesenen 49 % Zeitverlust in der vorabendlichen Hauptverkehrszeit aufweisen. Andererseits kann die Repräsentativität der verwendeten Referenzwerte von Berlin trotz systematischer Abfrage nicht sichergestellt werden.

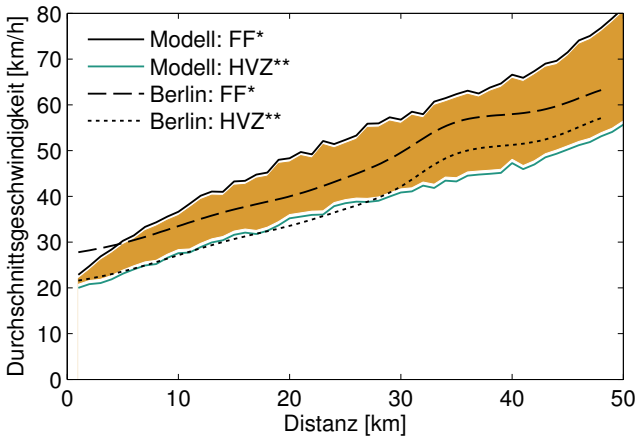


Abbildung 3.28: Durchschnittsgeschwindigkeit von Serviceagenten unter Anwendung des Fahrtmodells im Vergleich mit realen Werten für Berlin. *FF: Freie Fahrt in der Nacht, **HVZ: Hauptverkehrszeit. Quelle: Erstellung nach Abfrage eines Online-Kartendienstes [48].

Zusammengefasst liefert die Fahrtmodellierung für den Belastungsfall für die besonders relevanten, kürzeren Distanzen sehr gute Ergebnisse, die Flussgeschwindigkeit für den Fall freier Fahrt in der Nacht übersteigt das Referenzsystem von Berlin jedoch teils deutlich. Nach der Bestimmung der Verteilung der Geschwindigkeitsanteile nach Abbildung 3.27 für die freie Fahrt erfolgt im Modell die Beaufschlagung durch die beiden Faktoren $l_{ext_s}(p)$ und $l_{ext_q}(p,t)$ zur Fahrtverlängerung. Eine Diskussion des vorge-

stellten Vorgehens zur Ermittlung des Geschwindigkeitsprofils findet sich in Abschnitt 6.2. Abschließend wird im nächsten Abschnitt aus den durch das Phasenmodell ermittelten Streckenteilen der Stromkonsum eines Weges zusammengesetzt.

3.3.3 Stromkonsum

In diesem letzten Abschnitt der Fahrmodellierung wird nach der Vorstellung des mit Verzögerungen angepassten Phasenmodells der Stromkonsum einer Fahrt ermittelt. Dazu erfolgt für die n Streckenstücke konstanter Fahrt der Phase III eines Kettenelements die Zuordnung eines spezifischen Verbrauchs. Beschleunigungen und Bremsvorgänge werden nicht berücksichtigt. Zur Ermittlung eines realitätsnahen Energiebedarfs bei Konstantfahrten wurden die Fahrzeuge *Mitsubishi iMiEV*, *Mercedes Benz A-Klasse E-Cell*, *Smart Fortwo Electric Drive* und *Nissan Leaf* auf einem Rollenprüfstand untersucht [47]. Die Werte wurden mit einem Fahrer mit der Masse von 75 kg und einer Zuladung von 25 kg gemessen. Obwohl die Verbrauchswerte zwischen den Fahrzeugen zum Teil deutliche Abweichungen aufzeigen, lassen sich qualitativ Trends des Stromverbrauchs erkennen. Tabelle 3.8 gibt eine Übersicht der für den Zweck dieser Arbeit aufbereiteten Resultate der Studie. Da nur Punktwerte und keine stetige Datenbasis vorliegen, ist eine graphische Darstellung nicht möglich.

Die Werte stellen jeweils das arithmetische Mittel ohne Gewichtung der vier getesteten Fahrzeugtypen für eine Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit, ohne Steigung und Gefälle und zu einer festen Umgebungstemperatur dar. Die Temperierung des Innenraums auf 22 °C durch Heizen oder Klimatisieren ist berücksichtigt. Aufgrund der geringeren Höchstgeschwindigkeit liegen für den *Smart ED* keine Werte über 100 km/h vor, so dass die abgebildeten Werte dieser Spalte nur drei Ausgangswerte beinhalten. Vor allem bei tiefen Temperaturen ist der Einfluss der benötigten Energie zur Innenraumtemperierung auf den Gesamtenergieverbrauch gut erkennbar. Beträgt

der auf die Distanz bezogene Heizenergiebedarf bei 30 km/h bei $-20\text{ }^\circ\text{C}$ mehr als 0,15 kWh/km (260 % der Traktionsenergie bei $20\text{ }^\circ\text{C}$), sinkt dieser Anteil mit steigender Geschwindigkeit gegenüber der zur Überwindung des Luftwiderstands benötigten Energie auf 23 %. Dies kann damit begründet werden, dass die Heizenergie abhängig von der Zeit, die Traktionsenergie jedoch abhängig vom Weg ist.

T_U [$^\circ\text{C}$]	$e(v_{T_U})$ [kWh/100 km]				
	$30 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	$50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	$70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	$100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$	$130 \frac{\text{km}}{\text{h}}$
+30	12,6	13,0	14,1	19,0	26,1
+20	9,2	11,1	12,8	18,1	25,6
+10	12,5	13,2	14,2	19,2	26,8
0	16,9	15,8	16,2	20,8	28,3
-10	20,6	18,2	18,1	22,3	29,6
-20	24,5	20,7	20,0	24,0	31,4

Tabelle 3.8: Mittelwert des Energiekonsums $e(v_{T_U})$ eines durchschnittlichen elektrischen Pkw in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur T_U bei Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit ohne Lade- und Entladeverluste. Kursiv jeweils der geringste Wert. Quelle: Berechnung nach [47].

Nicht in Tabelle 3.8 enthalten sind die Lade- und Entladeverluste, welche angeben, wie viel des tatsächlich dem Stromnetz entnommenen Stroms auch in der Hochvoltbatterie zur Traktion umgesetzt werden kann. Je nach Geschwindigkeit und Umgebungstemperatur der Konstantfahrt variieren diese Werte für das Durchschnittsfahrzeug zwischen 25 % ($T_U = 10\text{ }^\circ\text{C}$, 130 km/h) und 42 % ($T_U = -20\text{ }^\circ\text{C}$, 30 km/h), mit 31 % als arithmetisches Mittel. Die Auswirkung dieser Verluste auf die Dimensionierung der elektrischen Infrastruktur für Serviceagenten wird in Abschnitt 4.5 vorgestellt. Für die Modellierung der einzelnen Fahrten werden die Zahlen nach Tabelle 3.8 herangezogen. Dabei ist ersichtlich, dass aus einer höheren

Geschwindigkeit auch ein höherer Stromkonsum folgt. Je nach Fahrzeugtyp schwankt die Zunahme je 10 km/h um 3 % bis 13 % gegenüber der Fahrt mit konstant 30 km/h. Für das Fahren mit konstant 100 km/h benötigt das Durchschnittsfahrzeug bei $T_U = 20^\circ\text{C}$ 96 % mehr Energie als für das Fahren mit 30 km/h. Ein weiteres, wesentliches Merkmal ist der Anteil des Stromkonsums durch Temperierung des Innenraums. Exemplarisch zeigt Tabelle 3.9 die prozentuale Abweichung von 130 km/h zu 30 km/h je nach Umgebungstemperatur für den *Nissan Leaf* (alle vorgestellten Prozentwerte nach eigenen Berechnungen des Datensatzes von [47]).

30 °C	20 °C	10 °C	0 °C	-10 °C	-20 °C
178 %	250 %	162 %	103 %	72 %	51 %

Tabelle 3.9: Mehrenergiebedarf eines elektrischen Pkw der Kompaktklasse bei Fahrt mit konstant 130 km/h gegenüber 30 km/h inklusive der Temperierung des Fahrzeuginnenraums. Quelle: Berechnung auf Basis der Daten von [47].

Die Werte stimmen qualitativ mit denen der anderen drei Fahrzeuge überein. Der Anteil der Heizleistung am gesamten Fahrverbrauch erreicht dabei im ungünstigsten Fall (-20°C , 30 km/h) 55 %. Vor allem für Umgebungstemperaturen zwischen 0°C und 20°C und freie Fahrt im städtischen Nahverkehr bei Flussgeschwindigkeiten zwischen 30 km/h und 50 km/h liegen die Anteile für Temperierung zwischen 20 % und 40 %. Zusammenfassend werden für den Stromkonsum von Serviceagenten zwei Schlüsse gezogen:

- Für heutige Fahrzeuge ist 20°C die effizienteste Betriebstemperatur.
- Da die thermische Isolation der derzeit am Markt erhältlichen Fahrzeuge prinzipiell auf VKM-betriebene Pkw zugeschnitten ist, wird für den effizienten Betrieb von Serviceagenten bei verschiedenen Umgebungstemperaturen eine verbesserte Isolation der Fahrzeuge benötigt.

Es wird angenommen, dass vor allem Einsitzer-Serviceagenten von der Konstruktion leichter als die in der Studie [47] getesteten Fahrzeuge sind. Andererseits erhöht sich die Masse heutiger Fahrzeuge besonders durch Komponenten für die Fahrzeugsicherheit und Komfort. Unter der Annahme, dass Serviceagenten sowohl komfortabel als auch sicher sind, werden im Modell konservativ die $e(v_{TU})$ aus Tabelle 3.8 verwendet.

Für Serviceagenten mit zwei, drei oder vier Sitzplätzen muss der Stromkonsum korrigiert werden. Bei fehlendem Längsdynamikmodell wird für konventionell angetriebene Pkw in der Literatur in erster Näherung ein Kraftstoffverbrauchsbeiwert von 0,51/100km je zusätzliche 100 kg angenommen [30], [116]. Unter der Annahme eines ähnlichen längsdynamischen Verhaltens für Serviceagenten resultieren für vollbesetzte Zweisitzer 5 % mehr Stromkonsum. Analog dazu steigt der Stromkonsum für Dreisitzer um 11 % und für Viersitzer um 16 % gegenüber einem Einsitzer.

Hinsichtlich der Reichweite zeigen die Ergebnisse von [47], dass eine Absenkung der Temperatur von 20 °C (entsprechend 100 % Reichweite) auf 0 °C zu einer gemittelten Reduktion auf 72 % der Reichweite führt und eine weitere Absenkung auf -10 °C eine Reduktion auf nur noch 63 % des Ausgangswertes nach sich zieht [47]. Die Zwischenstufen der Reichweitenreduktion werden interpoliert: Für die Umgebungstemperatur 10 °C wird eine Reduktion der Reichweite auf 85 % angenommen und für -20 °C eine Verringerung auf 50 %. Da die Verbrauchswerte für 10 °C und 30 °C nahezu identisch sind, findet bei 30 °C ebenso eine Reichweitenkorrektur auf 85 % gegenüber dem Ausgangswert statt. Im Gegensatz zu den Rollenprüfstandsversuchen, bei welchen jeweils eine Reservereichweite von 25 km angenommen wurde, wird in der vorliegenden Ausarbeitung die Reservereichweite auf ein logistisches Minimum reduziert (vgl. Tabelle 3.10), so dass annähernd die volle Batterienutzkapazität als Reichweite verwendet wird.

Aufgrund des maßgeblichen Einflusses der Umgebungstemperatur auf die Reichweite und damit den Betrieb von Serviceagenten, fließen der Längen- und Breitengrad des Standortes der Verkehrszelle als Basisparameter in die

Modellierung ein. Für die Bestimmung des Temperaturprofils werden Datensätze der *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* verwendet. Der Zugriff erfolgt über das *Surface meteorological and Solar Energy (SSE)*-Programm, welches unterstützt wird durch das *Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER)*-Projekt [11]. Die weltweite Datenbasis aus kontinuierlicher Messung durch Satelliten liefert die Mittelwerte der Umgebungstemperatur in 10 m Höhe des Zeitraumes 1983 bis 2005. Die Auflösung beträgt $1^\circ \times 1^\circ$ (entsprechend einem Quadrat der Kantenlänge 111 km) und seitens der NASA SSE wird ein mittlerer quadratischer Fehler für die Temperaturwerte auf Monatsbasis von ca. 3 % ausgewiesen [10]. Die zu Grunde liegende Fläche hat den Vorteil, dass für jede Verkehrszelle ein homogenes Temperaturprofil angenommen werden kann. Als Beispiel gibt Abbildung 3.29 eine Übersicht für Karlsruhe, dargestellt als Band zwischen minimalem und maximalem Monatsdurchschnittswert.

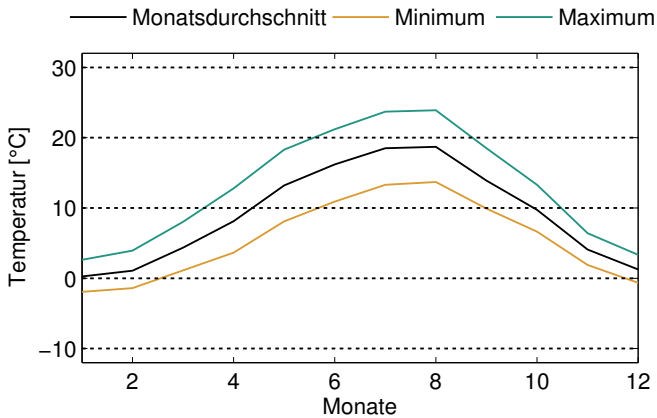


Abbildung 3.29: Temperaturprofil für Karlsruhe zwischen minimalem und maximalem Monatsdurchschnittswert aus 22 aufeinander folgenden Jahren. Quelle: [11].

Im Modell wird der Monat nach folgendem Schema in Intervallen von 10°C berücksichtigt: Liegt die durchschnittliche Monatstemperatur des 22-Jahre-

Profils zwischen 35 °C und 25 °C, werden 30 °C für diesen Monat kalkuliert. Dieses Schema wird systematisch bis –25 °C fortgesetzt. Zusammengefasst werden durch die vorgestellte Routine zur Fahrtmodellierung, mit Bezugnahme auf die in Abbildung 3.23 vorgestellte Nomenklatur, für jedes Ketenelement eines Serviceagenten zu einem beliebigen Jahreszeitpunkt und einem Ort in Europa die drei Werte $s(k,t)$, $d(k,t)$ und $e(k,t)$ bestimmt.

3.4 Elektrische Infrastruktur und Betriebsmodellierung

3.4.1 Energieversorgung aus Mobilitätszentralen

In diesem Abschnitt wird die Mobilitätszentrale als infrastruktureller Ausgangspunkt von Serviceagenten im elektrischen Netz vorgestellt. Als zentrale Ladehäfen mit festgelegter Stellplatzanzahl entsprechen die MOZ den Betriebshöfen des heutigen Bus- und Bahnsystems und bilden die Schnittstelle zwischen dem Abfahren des Einsatzprofils und der energietechnischen Planung. Es wird davon ausgegangen, dass die MOZ in die Nähe des Ortes des größten Verkehrsaufkommens in einer Verkehrszelle platziert werden. Gegenüber privat gehaltenen Pkw, welche angelehnt an die räumliche Verteilung der Einwohner verteilt Ladeinfrastruktur benötigen, wird durch den Flottenbetrieb die elektrische Leistungsanforderung in der MOZ aggregiert. Abbildung 3.30 verdeutlicht das Wechselspiel der Serviceagenten zwischen elektrischem Netz und Verkehrsnetz. Agenten sind dabei entweder durch ihre bidirektionale Leistungsschnittstelle Teil des elektrischen Netzes oder fahren Wegekettens im Straßenverkehrsnetz ab.

Für die Bearbeitung des Einsatzprofils der Agenten einer Verkehrszelle im Tagesverlauf wird in den MOZ Energie zur Ladung benötigt. Durch die systematische Einzelfahrtmodellierung und die Abfolge von Einsätzen und Ladezeiträumen wird $w_{C,T}$ für eine Modalität M in ein Leistungsprofil $P_{C,M}(t)$ überführt. Der Betrieb von Serviceagenten und deren zentrale Versorgung durch MOZ kann damit aufgrund der Aggregation und Fähig-

keit zur Rückspeisung von Energie je nach Tageszeitpunkt im elektrischen Netz sowohl größerer Verbraucher als auch Erzeuger sein. Einerseits steht die Quantifizierung der im Tagesverlauf benötigten elektrischen Energie zur Deckung der Mobilitätsnachfrage im Vordergrund dieser Arbeit. Andererseits kann aus der Lastgangsimulation das Potential zur Planbarkeit dieser Last abgeleitet werden. Je genauer der Lastgang bekannt ist, desto effizienter kann die Leistungsbereitstellung erfolgen. Ziel ist es, durch die Planbarkeit den Nahverkehr nur mit erneuerbarer Energie zu versorgen.

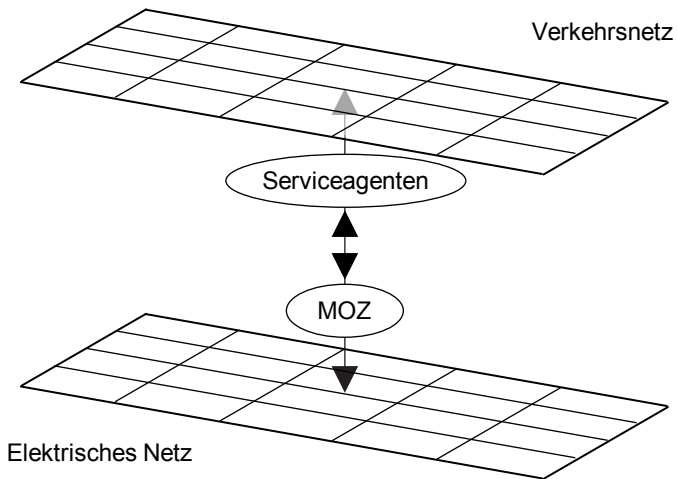


Abbildung 3.30: Serviceagenten und Mobilitätszentralen an der Schnittstelle zwischen elektrischem Netz und Verkehrsnetz.

In Abschnitt 3.3.3 sind die hohen Energieverluste derzeitiger elektrischer Fahrzeuge vorgestellt, welche durch den Bedarf der Innenraumtemperierung und zu geringer thermischer Isolation entstehen. Der Betrieb aus stationären MOZ reduziert diese thermischen Verluste gegenüber FFCS. Da nicht von der Außen- sondern nur von einer vorkonditionierten Temperatur in der MOZ auf das seitens des Passagiers geforderte Maß geheizt oder klimatisiert werden muss, ist der Energieverlust der Serviceagenten geringer.

3.4.2 Autonome Betriebsführung verketteter Einsätze

In den folgenden drei Abschnitten wird der autonome Betrieb von Serviceagenten im Verkehrsnetz vorgestellt. Grundsätzlich ist der Rechtsrahmen für Verkehrsregeln durch das *Wiener Übereinkommen über den Straßenverkehr* in der Fassung vom 08. November 1968 festgelegt und weltweit durch 73 Staaten ratifiziert. Insbesondere Artikel 8 und 13 verhindern zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch die Zulässigkeit fahrerlosen Fahrens: Artikel 8 legt fest, dass „Jedes Fahrzeug und miteinander verbundene Fahrzeuge (...), wenn sie in Bewegung sind, einen Führer haben“ [müssen]. Artikel 13 führt weiter: „Jeder Fahrzeugführer muss unter allen Umständen sein Fahrzeug beherrschen (...)“ [114]. Erst durch eine Überarbeitung dieses Abkommens durch die Vereinten Nationen im März 2014 wurde hinzugefügt, dass „Vehicle systems which influence the way vehicles are driven (...), shall be deemed to be in conformity (...), when such systems can be overridden or switched off by the driver“ [120]. Die Abänderung des Wiener Übereinkommens gesteht dem Fahrer damit jedoch nicht ein, sich für die Dauer des Transports vollständig anderen Tätigkeiten zuzuwenden. Der Fahrer bleibt mit dieser Formulierung weiterhin in der Verantwortung, wenn benötigt, korrektive Eingriffe vorzunehmen. Für die vorliegende Arbeit wird angenommen, dass die wirtschaftlichen Interessen und erwarteten neuen Stufen der Wertschöpfung im Straßenverkehrssystem durch autonomes Fahren die erforderlichen legislativen Erweiterungen hervorrufen und vollständig fahrerloses Fahren zukünftig möglich ist.

Die Modellierung des Einsatzes von Agenten sieht vor, dass zwischen einzelnen Einsätzen keine Unterbrechung oder Stillstand mehr existieren. Vielmehr werden die Einsätze so koordiniert, dass innerhalb einer Verkehrszelle die Agenten Wegekettens autonom abfahren, deren einzelne Kettenelemente logistisch sinnvoll miteinander verknüpft sind. Damit gliedert sich der Betriebsprozess in drei Abschnitte: Nach der Freigabe des Fahrzeugs aus dem elektrischen Netz in einer MOZ werden einzelne Fahrten in zu-

sammengesetzter Wegekette durchgeführt. Werden im FFCS die Fahrzeuge noch nach Kundenwunsch abgestellt, fahren die Serviceagenten das kurze Streckenstück zum nächsten Einsatz autonom. Bei Erreichen eines festgelegten Schwellwertes der Batteriekapazität wird der Agent abschließend an einer MOZ wieder angenommen und schließt sich an das elektrische Netz wieder an. Eine Übersicht dieser Abschnitte gibt Abbildung 3.31.

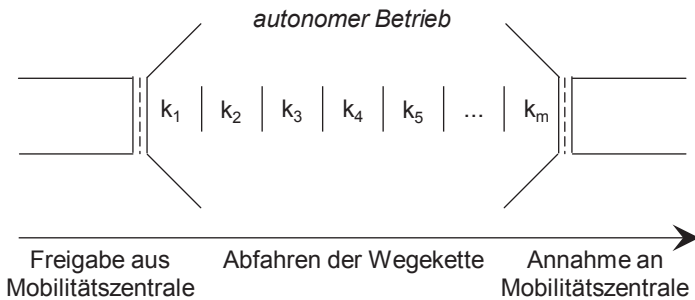


Abbildung 3.31: Gliederung des autonomen Betriebsprozesses eines Serviceagenten zwischen Freigabe und Annahme an einer Mobilitätszentrale.

Für die Abbildung wurde schematisch eine Gleichverteilung der Distanzen der Kettenelemente gewählt. Vorteile des autonomen Betriebs gegenüber herkömmlichen Taxis sind dabei die technisch einfachere Handhabbarkeit einer großen Flotte, die höhere Sitzplatzkapazität und die Reduktion der Personalkosten durch Wegfall des Fahrers. Perspektivisch könnte durch eine den gesamten Verkehrsraum umfassende Kontrolle der Trajektorien des autonomen Verkehrssystems die durchschnittliche Flussgeschwindigkeit des Straßenverkehrs gesteigert werden.

In Abbildung 3.32 ist exemplarisch ein kreisförmiges Einsatzgebiet skizziert. Ausgehend von einer Verkehrszelle verrichtet ein Serviceagent acht Kettenelemente bis zur Rückkehr in die MOZ. Zur verbesserten Darstellung befindet sich in der markierten Verkehrszelle nur eine einzige MOZ; grund-

sätzlich kann die Route auch an unterschiedlichen MOZ begonnen und beendet werden. In den Transferzeiten ohne Personenbeförderung von einem zum nächsten Einsatz erwirtschaftet ein Serviceagent keine Einnahmen (vgl. Abbildung 3.22). Aufgrund der Distanzverteilung der nachgefragten Wege nach Abbildung 3.15 und der ermittelten, geringen räumlichen Ausdehnung der Referenzverkehrszelle (vgl. Abschnitt 3.2.3) ist es anzunehmen, dass in einem realen Betriebsablauf nahezu jedes Kettenelement in einer anderen Verkehrszelle beginnen würde. Damit fahren Serviceagenten in einem Netz aus zusammenhängenden Verkehrszellen, in welchen unterschiedliche $w_{C,T}$ vorliegen. Die räumliche Zuordnung einer vollständig vom Geschäftsgebiet umschlossenen Verkehrszelle in Abbildung 3.32 ist daher ebenso zur Veranschaulichung des Sachverhaltes in dieser Arbeit gewählt: Den statistischen Daten der MID kann nur eine Referenzverkehrszelle für Kernstädte entnommen werden. Damit entspringen in der Simulation alle nacheinander gesetzten Kettenelemente dem gleichen $w_{C,T}$.

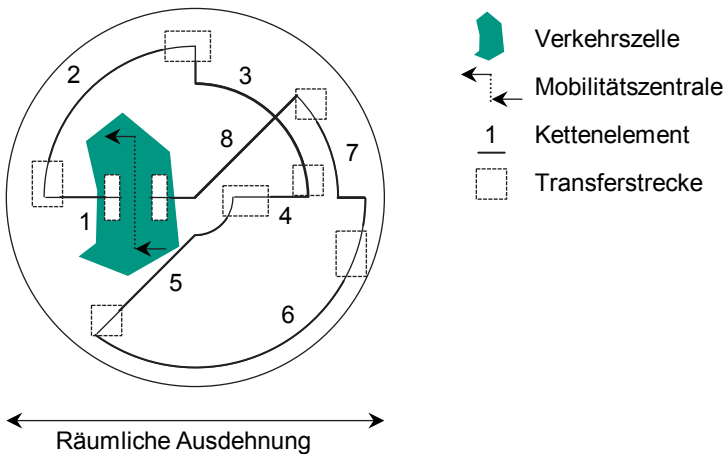


Abbildung 3.32: Exemplarische Darstellung der Wegekette eines Serviceagenten in einem Einsatzgebiet. Start und Ziel sind die gleiche MOZ.

3.4.3 Analyse der Betriebszustände von Serviceagenten

Für die Ermittlung der Auslastung von Serviceagenten wird die Verteilung der momentanen Zustände benötigt. Aus der Verteilung können Aussagen zu den Punkten der Systemplattform getroffen werden. Die betrachtete Betriebszeit T des Agenten x setzt sich aus den vier Bausteinen (i) Ladung \mathcal{F}_x , (ii) Entladung mit Passagier \mathcal{H}_x , (iii) Entladung ohne Passagier \mathcal{L}_x und (iv) Stillstand ohne Ladung oder Entladung \mathcal{I}_x (z.B. warten auf einen neuen Auftrag) nach Formel 3.8 zusammen. Die Entladung ohne Passagier ist dabei aufgeteilt in Zeitverluste durch Transferfahrten $\mathcal{L}_{I,x}$ und Zeitverluste durch Rückkehr zu MOZ $\mathcal{L}_{II,x}$. Das Wegeanforderungsprofil bestimmt das zeitliche Verhältnis der Zustände zueinander. \mathcal{R} ist die Anzahl an Freigaben r aus Mobilitätszentralen, \mathcal{K} die Summe der einzelnen Kettenelemente k , welche erfolgreich verrichtet wurden und \mathcal{U} die Anzahl an Zeitpunkten u , zu welchen der Agent keinen zu verrichtenden Weg vorgefunden hat.

$$T_x = \sum_{r=1}^{\mathcal{R}} \mathcal{F}_x(r) + \sum_{k=1}^{\mathcal{K}} \mathcal{H}_x(k) + \sum_{k=1}^{\mathcal{K}} \mathcal{L}_{I,x}(k) + \sum_{r=1}^{\mathcal{R}} \mathcal{L}_{II,x}(r) + \sum_{u=1}^{\mathcal{U}} \mathcal{I}_x(u) \quad (3.8)$$

Die beförderungsbezogene Fahrleistung innerhalb des Betrachtungszeitraumes $V_m(T, x)$ für einen einzelnen Agenten ermittelt sich nach Formel 3.9. Mit dem Ziel, die in der Referenzverkehrszelle benötigte Agentenanzahl X so gering wie möglich zu halten, muss $V_m(T, x)$ maximal werden. Die Gesamtfahrleistung $V(T, x)$ im Betrachtungszeitraum T ermittelt sich nach Formel 3.10. Die Transferfahrten sind dabei in $s(k)$ enthalten.

$$V_m(T, x) = \sum_{m=1}^{\mathcal{K}} s_m \quad (3.9)$$

$$V(T, x) = \sum_{k=1}^{\mathcal{K}} s(k) + \sum_{r=1}^{\mathcal{R}} s_V(r) \quad (3.10)$$

In den direkt von Passagieren angefragten Strecken s_m sind nicht die Leerfahrten von einem zum nächsten Passagier enthalten. Für $V(T, x)$ werden daher die Kettenelemente als Gesamteinheit herangezogen. Die Distanz, welche ein Agent mit positivem Abbruchkriterium nach einer Reihe von Kettenelementen bis zum Erreichen einer freien Ladestation in einer MOZ zurücklegen muss, wird mit $s_V(r)$ bezeichnet.

Der Quotient nach Formel 3.11 beziffert die distanzbasierte Auslastung des Einsatzes $f_s(T, x)$ eines Agenten innerhalb des Betrachtungszeitraumes. Dieser Wert ist damit vergleichbar mit den Besetztkilometern im Taxibetrieb (vgl. Abschnitt 2.5.1) und gibt das Verhältnis der Fahrleistung mit Passagieren gegenüber der Gesamtfahrleistung an. Analog dazu gibt Formel 3.12 die zeitbasierte Auslastung des Einsatzes des Agenten $f_d(T, x)$ an. Letztere ist das Gegenstück zur den in Abschnitt 2.5.1 vorgestellten Auslastungen von Pkw und Taxi. Der Unterschied ist, dass die Auslastung eines Serviceagenten ausschließlich die Zeit mit einem Passagier im Fahrzeug berücksichtigt, hingegen die Auslastung im Taxibetrieb auch die Leerfahrt des Taxifahrers zum Passagier beinhaltet.

$$f_s(T, x) = \frac{V_m(T, x)}{V(T, x)} \quad (3.11)$$

$$f_d(T, x) = \frac{\mathcal{H}_x}{T_x} \quad (3.12)$$

Die Betriebsstrategie einer MOZ ist maßgeblich für die Auslastung der ihr zugeordneten Serviceagenten. Für die vorliegende Arbeit wird davon ausgegangen, dass in der vorgestellten Referenzverkehrszelle eine einzelne MOZ existiert, aus welcher die Einsatzplanung erfolgt. Es wird eine Wartungsstrategie angenommen, bei welcher die Fahrzeuge in der Nacht überprüft, repariert und gereinigt werden. Dadurch entstehen keine Einschränkungen im Tagesverlauf, und es wird in der Simulation die bestmögliche Auslastung als theoretischer Maximalwert erreicht.

3.4.4 Ablauforganisation eines Betriebstages

Das Betriebsmodell übersetzt das Einsatzprofil der Serviceagenten in einen elektrischen Lastgang. Die Wegeanforderungen an die einzelnen Agenten in den betreffenden Sitzplatzkategorien liegen durch das Modalitätsmodell als diskrete Einsätze im Viertelstundenraster vor. Durch die Fahrtmodellierung und die unterschiedlich großen Distanzen wird das Einsatzprofil in abzuarbeitende Energiepakete partitioniert. Das zu substituierende Verkehrsmittel ist damit nur einseitig relevant, ausgangsseitig stehen Anzahl und Einsatzhäufigkeit von Serviceagenten im Untersuchungsgebiet im Vordergrund. Ziel ist es, die existierende Mobilitätsaufgabe in der Referenzverkehrszelle mit so wenig Agenten wie möglich zu erledigen. Jeder Agent transportiert so viele Passagiere wie möglich und lastet dadurch die eingesetzten Fahrzeuge bestmöglich aus. Abbildung 3.33 zeigt die Prozessroutine zwischen Freigabe und Rückkehr zu einer MOZ.

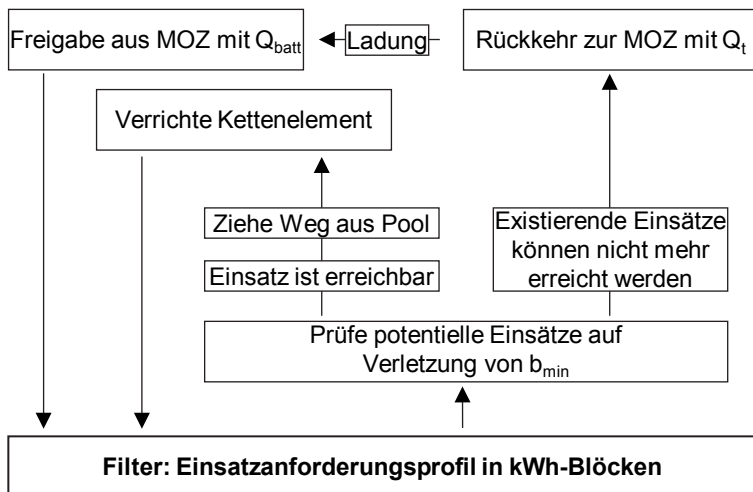


Abbildung 3.33: Routine des Betriebsmodells zur Freigabe von Agenten.

Beginnend um 00:00 Uhr eines Tages und im vollgeladenen Zustand prüft der Agent vorab, für welche der vorliegenden Wege in der zugewiesenen Substitutionskategorie die Batteriekapazität ausreichend ist. Aus dem Wegepool wird der längstmögliche Weg gewählt. Nach Abschluss des Einsatzes wird unter Berücksichtigung der aktuellen Uhrzeit und dem dementsprechenden Stundenquartal aus dem momentanen Pool an Wegen erneut der längstmögliche Weg ausgewählt und abgefahren.

Für die Agenten ist eine Mindestkapazität der Batterie b_{min} als Schwellenwert festgelegt. Bei der Ermittlung des Pools an möglichen Wegen in einem Stundenquartal wird b_{min} im Vorhinein berücksichtigt. Der Agent kann damit nur Kettenelemente beginnen, nach deren Beendigung der Ladezustand nicht unter dem Schwellenwert liegt. Mit diesem Verfahren sinkt der Ladezustand eines Agenten kontinuierlich mit jedem Einsatz, nähert sich aber gleichzeitig dem Schwellenwert nur asymptotisch und kann diesen nicht erreichen. Liegen in einem Quartal grundsätzlich Einsätze vor, welche der Agent jedoch durch einen zu niedrigen Ladezustand nicht mehr erreichen kann, wird die Routine für diesen Agenten unterbrochen und es erfolgt eine Rückkehr zur MOZ. Die Distanz der Rückkehr zur MOZ $s_V(r)$ ist in der Modellierung vereinheitlicht.

Unmittelbar nach positivem Abbruchkriterium einer Wegekette und Rückkehr zur MOZ beginnt dort die Ladung mit einer C-Rate von 4,4 (vgl. Abschnitt 3.1.2), um die Standzeit so gering wie möglich zu halten. Die Ladung wird vollständig durchgeführt, so dass der Agent seinen ursprünglichen Startladezustand zurück erhält. Anschließend beginnt erneut die stufenweise Entladung durch sukzessive Wahl der Wege nach vorgestelltem Muster. Liegen zu einem Zeitpunkt der Beendigung des vorhergehenden Kettenelementes keine Wege vor, wartet der Agent auf der Straße den Beginn des nächsten Quartals ab, um wieder aus dem Pool der möglichen Einsätze auszuwählen. Gleiches gilt wenn der Pool an Wegen in einem Stundenquartal leer ist. Auch in diesem Fall wartet der Agent im Straßenraum den Beginn des nächsten Stundenquartals ab.

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Abschnitt 3.2.1 wird für die Simulation ein Freitag im Januar in Karlsruhe gewählt, welcher als regulärer Betriebstag hinsichtlich Temperatur und Auslastung der Betriebsmittel die höchsten Anforderungen im Jahresvergleich aufweist. Tabelle 3.10 zeigt die wesentlichen Eingangswerte für die Simulation.

Parameter	Wert
b_{min}	2 kWh
$s_V(r)$	2000 m
Einsatzort	Karlsruhe
Wochentag	Freitag
T	86400 s (24 h)

Tabelle 3.10: Festgelegte Parameter für die Simulation des Betriebsablaufs von Serviceagenten aus einer Verkehrszelle.

Es wird nacheinander für jeden Agenten T vollständig simuliert und die Routine erst beendet, wenn kein erreichbarer Weg durch einen zusätzlichen Agenten umgesetzt werden kann. Für jede einzelne Fahrt übergibt das Betriebsmodell die Parameter Startzeit, angefragte Distanz und Ladezustand. Nach Kalkulation erhält das Betriebsmodell die Endzeit und den neuen Ladezustand zurück. Die Flottengröße als Simulationsresultat bemisst sich nach der Anzahl an benötigten Agenten zur vollständigen Substitution aller Wege der simulierten Modalität. Bis auf die bevorzugte Entnahme des größtmöglichen Weges aus dem Pool der zulässigen Einsatzalternativen existiert innerhalb des Betriebsmodells keine definierte Betriebsstrategie oder Optimierungsfunktion für einzelne Parameter.

Das Ziel ist es, sukzessive alle Wege für alle Modalitäten zu bearbeiten und den sich einstellenden Betrieb unter den vorgestellten Randbedingungen zu simulieren. Die Simulationsergebnisse sollen damit als Basis interpretiert werden. Zusätzliche Potentiale durch Betriebsstrategien sind nicht

Teil dieser Arbeit. Eine Übersicht der Skripte und Funktionen der in diesem Kapitel vorgestellten Bausteine und Zusammenhänge zwischen den Modellteilen gibt Anhang A.2 (Fahrtmodellierung), Anhang A.3 (Modalitätsmodellierung) und A.4 (Betriebsmodellierung).

4 Simulation des Betriebs von Serviceagenten

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Simulation von Serviceagenten in einer städtischen Referenzverkehrszelle vorgestellt. Durch die ineinander greifenden Modellteile können die Anforderungen der Systemplattform (vgl. Kapitel 1.1) in einer geschlossenen Darstellung erarbeitet und die Zielerreichung überprüft werden. Als Matrizen-basierte Simulationssoftware wird MATLAB® der Firma Mathworks, Inc. angewendet [75].

In Abschnitt 4.1 werden Anzahl und Verteilung der Einsätze vorgestellt. Anschließend erfolgt in Abschnitt 4.2 die Analyse einzelner Tagesabläufe von Agenten, um in Abschnitt 4.3 die benötigte Größe der gesamten Flotte in der Referenzverkehrszelle zu bestimmen. Diese drei Abschnitte beantworten damit die Frage hinsichtlich der *Erfüllung der Transportaufgabe*. Anschließend wird im Abschnitt 4.4 aus der Transportaufgabe der Energiebedarf der Flotte abgeleitet. Das wesentliche Ergebnis dieser Arbeit, die Planbarkeit des elektrischen Lastganges der MOZ aufzuzeigen, um eine ausschließliche *Leistungsbereitstellung durch erneuerbare Energie* zu ermöglichen, wird in Abschnitt 4.5 erreicht. Danach werden in Abschnitt 4.6 das Einsparungspotential von CO₂-Emissionen und die Reaktivierung von städtischer Verkehrsfläche durch Vermeidung von Flottenstillstand berechnet. Die aus der Anzahl an Agenten resultierende *Gesamtkostenbetrachtung des Flottenbetriebs* und ergänzende betriebswirtschaftliche Bedingungen werden in Abschnitt 4.7 diskutiert. Das Kapitel abschließend, werden einzelne Parameter auf ihre Sensitivität hin untersucht.

4.1 Einsatzplanung in der Referenzverkehrszelle

Auf Basis der in Kapitel 3 herausgestellten Wege, welche innerhalb der Referenzverkehrszelle auftreten, wird die Anzahl an Einsätzen über alle Sitzplatzkategorien bestimmt, welche im Tagesverlauf benötigt werden. In Tabelle 4.1 ist das Einsatzprofil N_{max} in der Referenzverkehrszelle bis 100 km der Einsatzanzahl zur Vollsubstitution der vier Verkehrsmittel im Nahbereich bis 50 km gegenübergestellt.

$N_{max}(C,T)$	Fuß	Rad	MIV	ÖPNV	Gesamt
Einsatzbereich: 0-50 km					
Einsitzer	11 297	4 063	15 783	6 938	38 081
Zweisitzer	2 153	375	5 290	1 111	8 929
Dreisitzer	373	59	1 114	107	1 653
Viersitzer	114	9	423	75	621
Gesamt	13 937	4 506	22 610	8 231	49 284
Einsatzbereich: 50-100 km					
Alle Fahrzeuge	0	2	391	137	530
Summe	13 937	4 508	23 001	8 368	49 814

Tabelle 4.1: Einsatzanforderungsprofil N_{max} an Serviceagenten in der Referenzverkehrszelle an einem Freitag im Januar. Quellen: Auswertung von [58], teilweise vorgestellt in [90].

Exemplarisch bedeuten neun Viersitzer in der Kategorie *Rad*, dass in 36 Datensätzen der MID neben der befragten Person drei weitere Wegbegleiter angegeben sind. Daraus resultiert, dass neun Agenten mit jeweils vier Sitzplätzen benötigt werden. Die in Serviceagenten mit zwei, drei und vier Sitzen zusammengefassten Personengruppen stellen freiwillige Zusammenschlüsse dar und sind damit nicht das Ergebnis von Zusammenführungen durch betriebliche Vorteile. Es ist ersichtlich, dass für 20 000 Einwohner

in städtischen Gebieten zur Vollsubstitution aller Wege bis 50 km etwa 49300 Einsätze durch Serviceagenten unterschiedlicher Sitzplatzanzahl benötigt werden. Auf die beiden ersten Sitzplatzkategorien kommen gemeinsam mehr als 95 % der Einsätze zu (MIV und ÖPNV: 94 %). Ebenso ist ersichtlich, dass mit 530 aus 49814 Einsätzen 1,1 % der Wege durch den Distanzzuschnitt nicht erreicht werden.

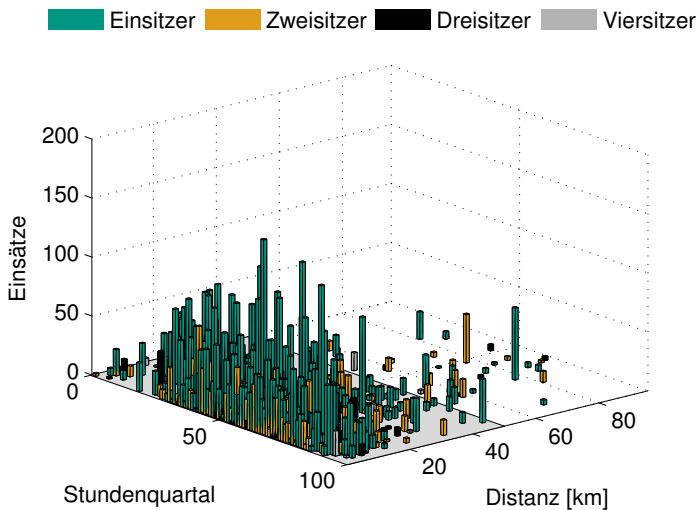


Abbildung 4.1: Anforderungsprofil zur Substitution des MIV in der Referenzverkehrszelle. Grau unterlegt der Nahverkehr als Einsatzgebiet von Serviceagenten.

Von 23001 möglichen Einsätzen für die besonders relevante Modalität MIV werden über alle Sitzplatzkategorien 391 Einsätze nicht erreicht. Damit werden für diese Modalität über 98 % der Gesamtwege unter 100 km Länge im Tagesverlauf umgesetzt. Aufgrund der kürzeren Einsatzdistanzen könnte für Fußgänger eine Vollsubstitution durch Serviceagenten erzielt werden. Eine graphische Aufschlüsselung des Anforderungsprofils nach Anzahl und Distanzverteilung zur vollständigen Substitution des MIV gibt Abbildung 4.1. Auf grauem Grund befinden sich die durch Serviceagenten zu substituieren-

den Distanzen des Nahverkehrs. In Abbildung 4.2 ist die Summe der angeforderten Einsätze über alle Sitzplatzkategorien als Lastgang dargestellt. Gegenüber der vollständigen Substitution der vier betrachteten Modalitäten wird separat nur die Summe der Einsätze für die Substitution der Modalität MIV durch Serviceagenten ausgewiesen.

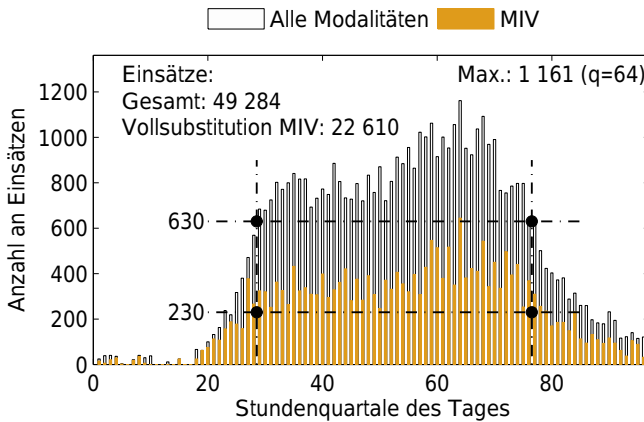


Abbildung 4.2: Anzahl der zu den einzelnen Stundenquartalen benötigten Einsätze bis 50 km als Summe über alle Sitzplatzkategorien. Quelle: Berechnung auf Basis der Daten von [58].

Für das Zeitfenster 07:00 Uhr bis 19:00 Uhr und den MIV werden zu keinem Zeitpunkt weniger als 230 Einsätze in einem Quartal angefordert. Unter der Annahme einer Gleichverteilung der Anfragen in den betreffenden Stundenquartalen entspricht dies einem Neubeginn eines Einsatzes in der Referenzverkehrszelle alle vier Sekunden. Für die theoretische Vollsubstitution werden mindestens 630 Einsätze pro Quartal benötigt, dies entspricht für die Gesamtflotte einer Einsatzfolge von unter zwei Sekunden.

Der Schluss von der Einsatzzahl in Abbildung 4.2 auf die benötigte Anzahl an Agenten besitzt nur unter der Voraussetzung Gültigkeit, dass alle Wege weniger als 15 Minuten Zeit beanspruchen. Würden in diesem

Fall alle Wege durch Serviceagenten verrichtet werden, entspräche dies einer maximalen Anzahl von 1161 Agenten, welche zu dem Zeitpunkt der größten Verkehrsnachfrage im Einsatz wären. Wird nur die Modalität MIV vollständig substituiert, sinkt dieser Wert auf 644 Serviceagenten. Werden die Distanzen aus Abbildung 4.1 herangezogen, ist die aus Abbildung 4.2 entnehmbare Anzahl an Agenten jedoch zu gering. Die in der Fahrmodellierung berücksichtigten Geschwindigkeitsprofile für die Agenten repräsentieren den aktuell üblichen Zeiteinsatz für Distanzen im MIV. Mit Durchschnittsgeschwindigkeiten zwischen 20 km/h und 40 km/h können in linearer Rechnung Distanzen zwischen 5 km und 9 km innerhalb von 15 min zurückgelegt werden. Im Nahverkehr bis 50 km sind aber mehr als 33 % gleich oder länger als 9 km (vgl. Abbildung 3.15). Demgegenüber stehen 52 % der Wege, welche maximal 5 km lang sind und damit mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb von 15 min beendet werden. Durch die Festlegung des Rasters von 15 min und der gewählten Betriebsroutine sind maximal vier Wege pro Stunde durchführbar.

Die für die Transportaufgabe kleinstmögliche, im Rahmen einer Simulation *reale* Agentenanzahl ergibt sich durch die Verkettung der einzelnen Wege im Tagesverlauf. Die Übersicht in Abbildung 4.2 stellt in den Stundenquartalen damit die Minimalanzahl an Agenten dar und bildet gleichzeitig die untere Modellschranke durch die Festlegung des Rasters. Resultierend müssten zum Zeitpunkt der höchsten Nachfrage (Abbildung 4.2: 15:45 – 16:00 Uhr) für den MIV mindestens 644 Agenten mit ausreichender Ladekapazität verfügbar sein, um die angeforderten Wege abzudecken. Es ist erkennbar, dass diese Anzahl den aktuellen Bestand an vorgehaltenen Pkw für die gleiche Beförderungsaufgabe deutlich unterschreitet. Für die Substitution des MIV in der Referenzverkehrszelle entspricht diese Mindestanzahl 8,1 % des heute vorgehaltenen Fahrzeugbestandes von 7980 Pkw (vgl. Abschnitt 3.2.2). Durch die Anwendung des Betriebsmodells soll in den folgenden Abschnitten die tatsächlich benötigte Anzahl an Serviceagenten unter Berücksichtigung verketteter Wege bestimmt werden.

4.2 Tagesablauf der Serviceagenten

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse der Tagesabläufe einzelner Agenten nach dem Muster aus Abschnitt 3.4.4 vorgestellt. In Abbildung 4.3 ist der Tagesablauf des ersten einsitzigen Agenten bei der Substitution der Wege des MIV für den exemplarischen Freitag dargestellt. Mit der Zustandsbeschreibung *Entladung* wird das Fahren im Straßenverkehr und das Verrichten von Kettenelementen bezeichnet. Das Ergebnis der Simulation sind die Datenpunkte des Ladezustands im Tagesverlauf. Die graphische Darstellung ist eine Rekonstruktion und Verstetigung aus diesen Punkten, bei welcher zur Veranschaulichung die Ladung und die Entladung als lineare Vorgänge angenommen werden.

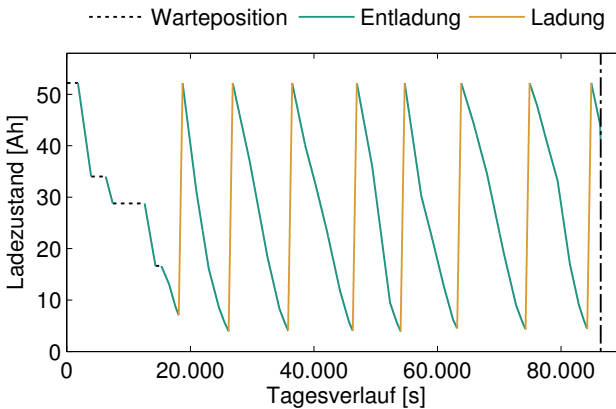


Abbildung 4.3: Tagesablauf des Referenzagenten bei der Substitution des MIV an einem Freitag im Januar in Karlsruhe.

Da die Simulation auf $T = 24\text{h}$ (entsprechend 86400s) beschränkt ist, wird der Ladezustandswert nach Abschluss des letzten Kettenelementes auf 00:00 Uhr des Folgetages gesetzt. Durch die horizontalen Abschnitte in Abbildung 4.3 ist erkennbar, dass insbesondere in den Nachtstunden teilweise keine Wege vorliegen und der Agent still steht. In diesem Fall

wird nach Beendigung einer Fahrt bis zum Anbruch des folgenden Quartals abgewartet und anschließend erneut nach möglichen Wegen gesucht.

Während des Durchlaufs des ersten Agenten werden die abgefahrenen kWh-Blöcke der Datenbank entnommen und der Prozess für den folgenden Agenten mit reduzierter Datenbank gestartet. Aus der Modellroutine ergeben sich als sukzessives Resultat die Anforderungsprofile an alle Agenten, bis jeder Weg vergeben ist. Mit jedem weiteren Agenten sinkt damit die Verfügbarkeit an Wegen. Aus diesem Grund sinkt die Auslastung des einzelnen Agenten über den Tag bei jedem weiteren Flottenteilnehmer für das gleiche Anforderungsprofil. In Abbildung 4.3 kann der erste Agent noch auf den vollständigen Pool an Einsätzen aus dem Anforderungsprofil für die zu substituierende Modalität zugreifen. Ergänzend stellen die Einsitzer die am stärksten nachgefragte Sitzplatzkategorie dar, und der MIV ist die Modalität mit der höchsten Nachfrage in absoluten Zahlen. Der vorgestellte Ablauf und die resultierende Auslastung stellen damit unter den getroffenen Annahmen den Idealwert dar. Aus diesem Grund wird der erste Einsitzer-Agent zur Substitution des MIV im Folgenden als *Referenzagent* bezeichnet. Der Ablauf zeigt, dass der Referenzagent innerhalb von 24 Stunden mehr als acht vollständige Entladungen durchgeführt.

Als weiterer Flottenteilnehmer ist in Abbildung 4.4 der Tagesablauf des 300. Einsitzers für den MIV vorgestellt. Für diesen Agenten fallen in T drei Freigaben aus einer MOZ an mit einer längeren Wartezeit zur Tagesmitte und einem Stillstand ab 19:00 Uhr. Insgesamt befördert jedoch auch der Agent 300 noch 36 Passagiere im Tagesverlauf. In Tabelle 4.2 sind weitere Parameter des Tagesablaufs des Referenzagenten und von Agent 300 vorgestellt. Für die Agenten fallen in jedem Kettenelement in Phase 1 mit $d_I = 120\text{s}$ Zeitverluste durch Transferfahrten an, in welchen kein Passagier befördert wird. Diese Dauer und die einzelnen Rückfahrten zur MOZ werden mit \mathcal{L}_x subsumiert. Die Verkettungsfolge zeigt die Anzahl der Kettenelemente innerhalb einer vollständigen Wegekette zwischen Freigabe und Rückkehr zu einer MOZ an. Gegenüber den ganzzahligen Werten der Pas-

sagierfahrleistung ist die Gesamtfahrleistung inklusive der Transferfahrten gerundet. Für die Betrachtung der von einem Agenten in T benötigten Energiemenge $W_{x,w}$ ist bedeutend, dass der Agent vor Betriebsbeginn zur Startzeit um 00:00 Uhr vollgeladen zur Verfügung steht. Die erste Ladung zum Erreichen des Startzustandes ist nicht ausgewiesen und erfordert zusätzlich 18,8 kWh. Die aufgeführten Energiemengen beinhalten die Transferfahrten.

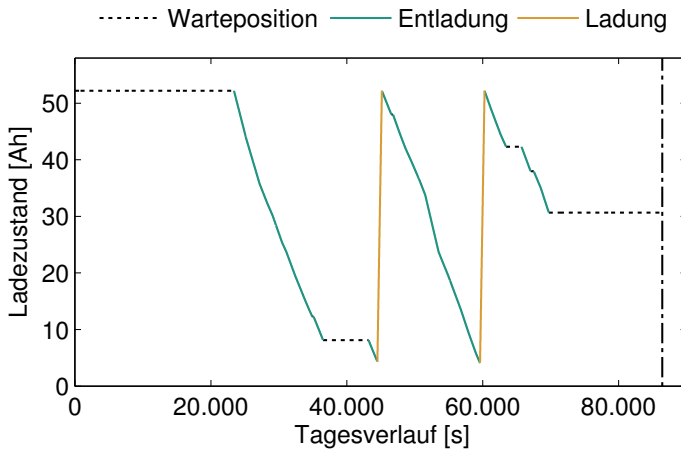


Abbildung 4.4: Tagesablauf des 300. Einsitzer-Agenten bei der Substitution des MIV an einem Freitag im Januar in Karlsruhe.

Es ist erkennbar, dass sich der Agent 300 am Tag mehrheitlich in Warteposition befindet und zu den Randzeiten des Tages die Wegenachfrage der Bevölkerung der Referenzverkehrszelle im Nahbereich bereits durch vorhergehende Agenten bearbeitet wurde. Zusätzlich kann Tabelle 4.2 entnommen werden, dass die durchschnittliche Einsatzdistanz des Referenzagenten auf Basis der Passagierfahrleistung bei 17,9 km liegt, hingegen Agent 300 durchschnittlich jeden Passagier nur 5,5 km transportiert. Die Tagesabläufe der einsitzigen Agenten 50, 100, 200 und des letzten zur Vollsubstitution im Nahverkehr benötigten Einsitzers 598 sind im Anhang A.9 dargestellt.

Beschreibung	Variable	Einheit	Referenz	Agent 300
Flottenposition	x	[-]	1	300
Betriebszeit	T_x	[s]	86400	86400
Kettenelemente	\mathcal{K}	[-]	40	35
Freigaben aus MOZ	\mathcal{R}	[-]	9	3
Verkettungsfolge	k	[-]	[7 4 4 5 3 4 5 6 2]	[14 16 6]
Misserfolge	\mathcal{U}	[-]	13	59
Ladedauer	\mathcal{F}_x	[s]	5264	1324
Ertragszeit	\mathcal{H}_x	[s]	61373	29658
Zeitverluste	\mathcal{L}_x	[s]	9498	5487
Stillstand	\mathcal{I}_x	[s]	10266	49932
Passagierfahrleistung	$V_m(T, x)$	[km]	715	193
Gesamtfahrleistung	$V(T, x)$	[km]	808	258
Auslastung (Distanz)	$f_s(T, x)$	[%]	88,5	74,9
Auslastung (Zeit)	$f_d(T, x)$	[%]	71,0	34,3
Energie (Traktion)	$W_{x,w}$	[kWh]	141,2	42,3

Tabelle 4.2: Ergebnis des Tagesablaufs des Referenzagenten und von Agent 300 an einem Freitag in Karlsruhe.

4.3 Dimensionierung einer Flotte

Die fortgesetzte Entnahme von Wegen führt zu einer deutlichen Reduktion der abgefahrenen Kettenelemente je zusätzlichem Agenten als Flottenteilnehmer. In Abbildung 4.5 ist die sukzessive Abnahme in der gesamten Flotte für die MIV-Substitution dargestellt. Die Aufspaltung in die Sitzplatzkategorien und die Anzahl der benötigten Agenten zeigen erneut die Bedeutung der Einsitzer für die Dimensionierung der Flotte. Insgesamt werden für den

MIV in der Referenzverkehrszelle mit 20000 Einwohnern 933 Agenten benötigt. Diese Zahl ist um 45 % größer als das Ergebnis der statischen Vorkalkulation (vgl. Spitzenwert in Abbildung 4.2). Gegenüber dem Einsatz von 7980 Pkw wird eine Reduktion auf 11,7 % erzielt. Die Abweichung dieses Resultates im Vergleich mit Ergebnissen auf Basis der Vollsimulation in einem realen Verkehrsraum beträgt weniger als 2 % [19]. Für den MIV ist ablesbar, dass mehr als 350 Einsitzer mehr als 30 Kettenelemente im Tagesverlauf verrichten. Insgesamt werden für die ersten Agenten in allen vier Sitzplatzkategorien über 35 Kettenelemente erreicht.

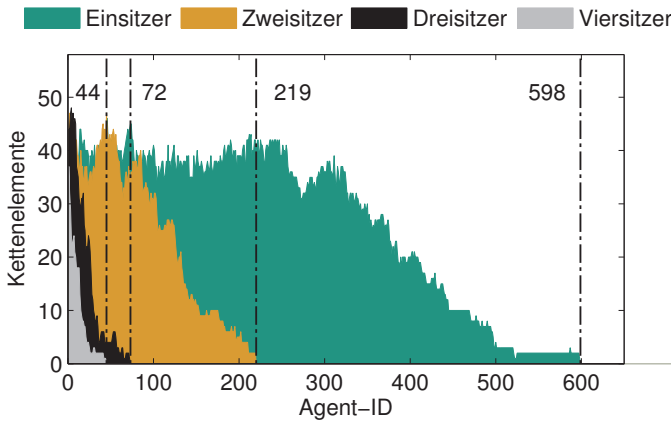


Abbildung 4.5: Flottengröße und Anzahl der Kettenelemente der einzelnen Flottenteilnehmer in T für einen Freitag in der Referenzverkehrszelle in Karlsruhe bei Substitution des MIV-Nahverkehrs. Quelle: [90].

Im direkten Vergleich werden für die Substitution des ÖPNV nur 437 Agenten benötigt. Eine Darstellung der Abnahme der Kettenelemente für diese Modalität findet sich im Anhang A.11. Hinsichtlich der Anzahl der Kettenelemente stellt die Substitution der Wege von Fußgängern das Maximum dar. Aufgrund sehr vieler, aber kurzer Wege können in der Referenzverkehrszelle in T mehr als 70 Einsitzer jeweils mehr als 80 Kettenelemente verrichten. Die zur Vollsubstitution für alle Modalitäten benötigten Agenten

X sind in Tabelle 4.3 aufgelistet. Sollen alle vier Modalitäten für Distanzen bis 50 km durch Serviceagenten ersetzt werden, entspricht das 1 884 Agenten in der Referenzverkehrszelle. Werden nur MIV und ÖPNV vollständig substituiert, sind 1 370 Agenten erforderlich.

$X(C,T)$	Fuß	Rad	MIV	ÖPNV	Gesamt
Einsitzer	220	156	598	340	1 314
Zweisitzer	58	26	219	69	372
Dreisitzer	21	23	72	19	135
Viersitzer	8	2	44	9	63
Gesamt	307	207	933	437	1 884

Tabelle 4.3: Anzahl X der in der Referenzverkehrszelle benötigten Agenten zur Vollsubstitution der vier Modalitäten.

4.4 Energiebedarf in der Referenzverkehrszelle

Auf Basis der in Tabelle 4.1 ermittelten Einsatzanzahl in Kombination mit dem Fahrtmodell können die Energiebedarfe $W_{X,w}$ für die Substitution der einzelnen Modalitäten berechnet werden. Abbildung 4.6 stellt das Ergebnis der Bottom-Up-Kalkulation vor, mit einer Distanzbegrenzung auf 50 km. Da für jeden Weg und jede Modalität inklusive Transferfahrten die Fahrtmodellierung einen korrespondierenden Energiewert ermittelt, bilden die Zahlen vollständig den Energiebedarf für die Beförderung ab. In diesem sind Wartung oder sonstige Services in der MOZ noch nicht berücksichtigt.

Zusammengefasst werden für die Vollsubstitution der Verkehrsleistung aller Modalitäten in der Referenzverkehrszelle an einem Freitag als Spitzentag 66 MWh benötigt. Im Folgenden wird der Jahresenergiebedarf inklusive standardisierter Transferfahrten für die beiden Modalitäten MIV und ÖPNV abgeschätzt. Für die Berechnung wird angenommen, dass die Wegevertei-

lung auf die Verkehrsmittel über die Woche den Werten vom Freitag gleicht. Unter Berücksichtigung der prozentualen Abweichung der Verkehrsleistung der anderen Wochentage zu Freitag nach [57], summiert sich die zur Substitution benötigte, wöchentliche, elektrische Traktionsenergie für MIV und ÖPNV ohne Lade- und Entladeverluste in der Referenzverkehrszelle zu 321 MWh. Dies entspricht 16,7 GWh im gesamten Jahr. Auf die Agenten zur Substitution des MIV entfallen davon 12,2 GWh.

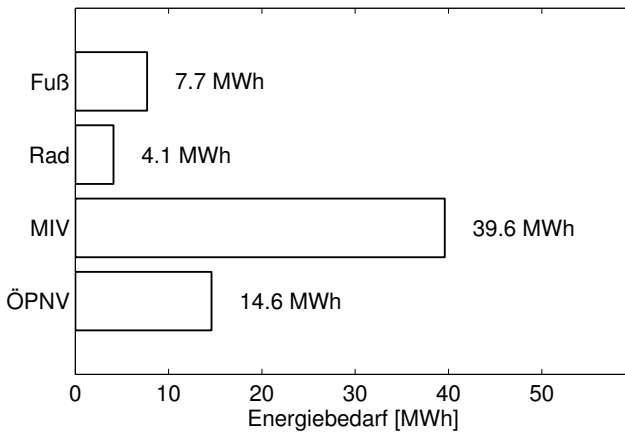


Abbildung 4.6: Täglicher Energiebedarf zur Traktion der Agenten an einem Freitag bei Substitution der bisher verwendeten Verkehrsmittel in der Referenzverkehrszelle inklusive Transferfahrten ohne Lade- und Entladeverluste.

Tabelle 4.4 gibt eine Übersicht über die prozentuale Verteilung des vollständigen Energiekonsums der Modalitäten in der Referenzzelle im Betrachtungszeitfenster, wenn die Wege durch Serviceagenten substituiert werden. Die Verteilung dieser Werte, insbesondere auf MIV und ÖPNV, zeigen die energietechnische Relevanz der Einsätze auf und sind Eingangsgröße für die elektrische Dimensionierung der MOZ in Abschnitt 4.5. Es ist erkennbar, dass der relative Anteil der ersten beiden Sitzplatzkategorien mit 94,5 % die zentrale Größe für die Tagesplanung darstellt. Entfallen nach Tabelle 4.1

nur 46 % der Einsätze auf den MIV, werden durch diese Modalität 60 % der täglich benötigten Energie konsumiert. In absoluten Zahlen entfallen von 66 MWh für Distanzen unter 50 km Länge 28,5 MWh auf Einsitzer der Kategorie MIV. Wird nur der Tagesenergiebedarf der Kategorien MIV und ÖPNV zusammen betrachtet, entsprechen die Einsitzer des MIV 53 % dieses Bedarfs. Dies unterstreicht die Bedeutung dieser Flotte für die Flottenplanung insgesamt.

W_T [%]	Fuß	Rad	MIV	ÖPNV	Gesamt
Einsitzer	9,0	5,5	43,2	18,8	76,5
Zweisitzer	2,2	0,6	12,5	2,7	18,0
Dreisitzer	0,3	0,1	3,0	0,3	3,8
Viersitzer	0,1	0,0	1,3	0,3	1,7
Gesamt	11,6	6,3	60,0	22,1	100,0

Tabelle 4.4: Verteilung des Energiebedarfs von 66 MWh zur Traktion in der Referenzverkehrszelle bei Vollsubstitution inklusive Transferfahrten ohne Lade- und Entladeverluste an einem Freitag im Januar in Karlsruhe.

4.5 Leistungsauslegung einer Mobilitätszentrale

Aus dem Gesamtenergiebedarf der Referenzverkehrszelle wird im Folgenden die von der MOZ bereitzustellende Leistung P_X für eine Flotte von Agenten berechnet. Mit vier Sitzplatzkategorien und vier Modalitäten können 16 verschiedene Flotten untersucht werden. Aufgrund der großen Bedeutung werden nur der MIV und der ÖPNV in diesem Abschnitt gemeinsam untersucht. Zur Substitution der konventionell motorisierten Verkehrsleistung wird die MOZ für beide Modalitäten zusammen ausgelegt. Zur Ermittlung des elektrischen Lastgangs wird eine Verteilung

der momentanen Zustände benötigt. Exemplarisch sind diese für die 598 Agenten der Einsitzer-Flotte für den MIV in Abbildung 4.7 aufgezeigt.

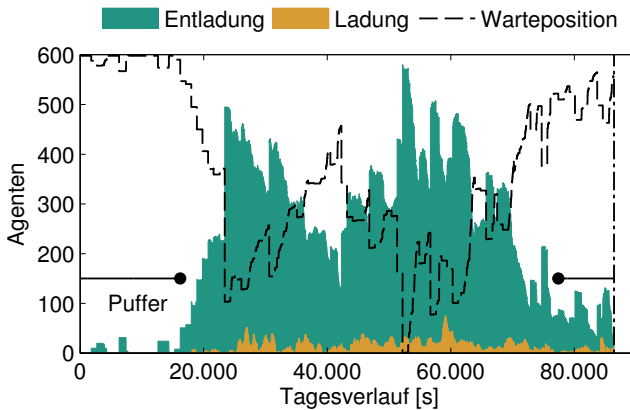


Abbildung 4.7: Zustandsverteilung der Einsitzer-Flotte zur Substitution des MIV. Puffer im Nachtzeitfenster von 25 % der Flottengröße.

Der Abbildung kann entnommen werden, zu welchem Zeitpunkt sich welcher Agent in Warteposition, bei der Ladung oder im Einsatz befindet. Es ist ersichtlich, dass sich nahezu alle Agenten etwa 20 % des Tages im Stillstand befinden. Dies zeigt eine grundsätzliche Ineffizienz durch das Ziel der Vollsubstitution des MIV, welche durch betriebliche Strategien verringert werden könnte. Der Agent 598 wird nur ein einziges Mal zur nachmittäglichen Lastspitze benötigt. Deutlich wird ebenso der sehr schnelle Anstieg am Morgen: Im Quartal 27 (nach 23400 s), welches um 06:30 Uhr beginnt, werden mehr als 275 Einsitzer-Agenten aus der MOZ herausgelöst. Bei einer Gleichverteilung der Wegestartzeit innerhalb dieses Quartals entspricht das einer angeforderten Einsatzfolge von unter vier Sekunden. Die zweite Tageshälfte weist eine etwas höhere Auslastung der Flotte aus. Ab 19:00 Uhr werden mehr als zwei Drittel der Einsitzer nicht mehr bewegt. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl an Sitzplatzkategorien ist ein Vergleich mit der statischen Analyse aus Abbildung 4.2 nicht möglich. Deutlich sichtbar ist

jedoch, dass das Einsatzprofil stärkeren Schwankungen im Tagesverlauf unterliegt. Es ist erkennbar, dass ab 07:00 Uhr bis zum Tageswechsel beständig eine zweistellige Anzahl an Agenten nachlädt. Da die Agenten vollgeladen in den Betriebstag starten, wird davon ausgegangen, dass im Tagesverlauf jederzeit eine zweistellige Anzahl an Ladepunkten von dieser einen Flotte belegt ist. Zum Spitzenzeitpunkt gegen 16:30 Uhr steigt der Wert auf 75 Einsitzer-Agenten, welche gleichzeitig laden.

Aus dieser Betrachtung kann insgesamt der Bedarf an Ladeplätzen in der MOZ abgeleitet werden. Dazu wird die Anzahl der belegten Ladeplätze von allen acht zur Vollsubstitution von MIV und ÖPNV benötigten Flotten summiert. Die Ladespitzen der einzelnen Flotten treten nicht zum gleichen Zeitpunkt auf. Im Ergebnis laden maximal 96 Serviceagenten unterschiedlicher Sitzplatzkategorien gleichzeitig gegen 16:30 Uhr. Es existieren damit zwei flankierende Szenarien zur räumlichen Dimensionierung einer einzelnen MOZ für 20000 Einwohner: Im Maximalansatz hält die MOZ Stellplätze für alle Agenten der Verkehrszelle vor, dies entspricht nach Tabelle 4.3 1370 Agenten für MIV und ÖPNV. Im Minimalansatz ruhen die Agenten im Verkehrsraum und kehren nur zur Ladung und Wartung zu der MOZ zurück. In diesem Fall werden 96 Abstellstände mit elektrischer Ladeeinrichtung benötigt. Aufgrund der geringen Auslastung in der Nacht reicht diese Anzahl ebenso aus, um die nächtliche Vollladung zu gewährleisten.

In Anlehnung an die Verteilung der Zustände der Einsitzer-Flotte aus Abbildung 4.7 wird im Folgenden das Ladeprofil für die gesamte Flotte zur Substitution des MIV genauer untersucht. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass alle Fahrzeuge zu Betriebsbeginn um 00:00 Uhr vollgeladen und verfügbar sind. Die einmalig benötigte Energiemenge (*Initialladung*) zum Erreichen dieses Startladezustandes der 933 Agenten entspricht 17,5 MWh. Für Lade- und Entladeverluste werden zusätzlich 31 % angenommen (vgl. Abschnitt 3.3.3), so dass insgesamt 23,0 MWh erforderlich sind für den Startzustand der Flotte. Diese Initialladung wird für die Analyse des Ladeleistungsprofils der MOZ im Folgenden nicht berücksichtigt.

In Tabelle 4.5 ist der elektrische Energiebedarf in T für die Substitution des MIV zusammengefasst. Dabei sind die aufgeführten Verluste mit einbezogen. Der ÖPNV ist zum Vergleich mit ausgewiesen.

Flotte	Initial	Nachladung	Konsum (T)	Rest
	$W_{X,i}$ [MWh]	$W_{X,c}$ [MWh]	$W_{X,w}$ [MWh]	$W_{X,res}$ [MWh]
MIV, $X = 933$	23,0	44,5	51,9	15,6
ÖPNV, $X = 437$	10,8	15,5	19,1	7,0

Tabelle 4.5: Bilanzierung der vorzuhaltenden Energiemengen einer MOZ in der Referenzverkehrszelle für die Substitution von MIV und ÖPNV in T inklusive Lade- und Entladeverluste.

Zunächst ist ersichtlich, dass die Agentenflotte des MIV im Tagesverlauf nahezu das Doppelte der Energie der initialen Ladung zum Nachladen benötigt. Für das Nachladen dieser Flotte müssen durch die MOZ 44,5 MWh bereitgestellt werden. Die 39,6 MWh für die Traktion aus Abbildung 4.6 entsprechen einer Ladeenergie durch die MOZ von 51,9 MWh. Für die Summe der Ladungen in der Kategorie MIV werden 67,5 MWh benötigt. Das Nachladen der Agenten für beide Modalitäten benötigt 60,0 MWh. Durch Abbruch der Simulation mit Beginn des Folgetages verbleibt nach Verrichtung von $w_{C,T}$ eine Restladung in den elektrischen Speichern. Aufgrund der geringen Flottennutzung in den Abendstunden und dem unmittelbaren Ladebeginn nach Rückkehr zur MOZ liegt die Restladung der MIV-Agenten inklusive kalkulatorischer Verluste mit 15,6 MWh bei 68 % der Initialladung, respektive 66 % für den ÖPNV. Für das vollständige Wiederherstellen des initialen Betriebszustands der MIV-orientierten Flotte werden nach Ablauf von T noch 7,4 MWh benötigt, respektive 3,6 MWh für den ÖPNV. Die vorgestellten Energiemengen decken vollständig den Bedarf für den Nahverkehr für Distanzen bis 50 km in der Referenzzelle.

Eine Übersicht über die Verteilung der Leistung zur Deckung des Ladebedarfs im Tagesverlauf gibt Abbildung 4.8. Aufgrund der maßgeblichen Bedeutung für den Umsatz elektrischer Energie in der Referenzverkehrszone sind für die Darstellung von $P_{C,M}(t)$ die beiden Modalitäten MIV und ÖPNV in den vier Sitzplatzkategorien zusammengefasst. Der Abbildung kann entnommen werden, dass durch die festgelegte Ladestrategie an mehr als zehn Zeitpunkten des Tages mehr als 5 MW verfügbar sein müssen. Grundsätzlich können diese Lastspitzen auf die einfache Betriebsstrategie des sofortigen Ladebeginns mit maximaler Ladeleistung bei Ankunft an der MOZ und das Abfahrtsraster im Viertelstundenrhythmus zurückgeführt werden. Daraus abgeleitet liegt das Potential, Lastspitzen zu verschieben, bei 15 Minuten. Der Autor nimmt daher an, dass insbesondere sehr schmale Lastspitzen (z.B. $t = 30000\text{s}$ oder $t = 38000\text{s}$) schon mit geringer betrieblicher Veränderung vermeidbar sind. Für die Beurteilung und Korrektur des Ladeleistungsprofils ist ebenso wichtig, dass keine Teilladungen vorgesehen sind. Ein zur MOZ zurückkehrender Agent wird in jedem Fall vollgeladen.

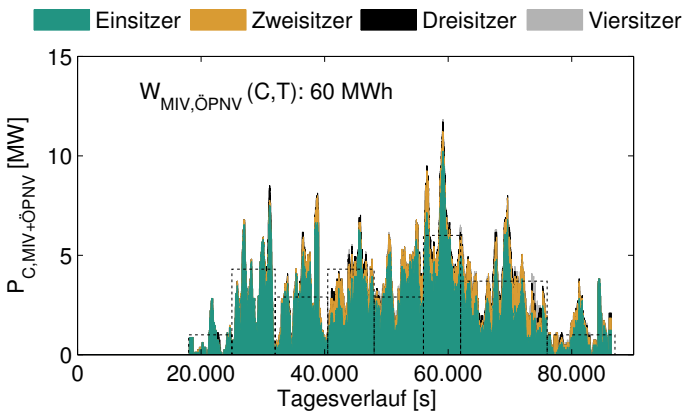


Abbildung 4.8: Anschlussleistungsprofil der einzigen MOZ in der Referenzverkehrszone bei vollständiger Substitution der Modalitäten MIV und ÖPNV im Nahverkehr ohne Initialladung der Flotten.

Zur besseren Planbarkeit der bereitzustellenden Energiemengen im Tagesverlauf ist das Lastprofil der MOZ in Abbildung 4.8 zusätzlich mit konstanten Blöcken abstrahiert dargestellt. Die Fläche unter den Rechtecken gleicht mit 60,0 MWh der Summe der Energiemenge des Lastprofils. Durch diese Blöcke wird demonstriert, dass mit Rückkehr der ersten Agenten ab 06:45 Uhr bis zum Tagesende beständig zwischen 1,0 MW und 6,0 MW Leistung bezogen wird. Durch eine Bereitstellung dieser Höhe könnten mehr als 98 % der Wege bis 100 km des bisher über MIV und ÖPNV abgebildeten Nahverkehrs von 20 000 Einwohnern angeboten werden.

Bisher wurde die Planung der elektrischen Last einer MOZ mit dem Ziel verfolgt, diese ausschließlich aus erneuerbarer Energie zu speisen. Im Folgenden wird das Potential zur Rückspeisung in das Energienetz untersucht. Ein Vorteil dafür ist, dass durch die Zusammenführung der Abstellstände der ladenden Agenten in der MOZ die Leistung aggregiert zurückgespeist werden kann. Aus Abbildung 4.7 ist entnehmbar, dass größere Teile der Flotte über längere Zeiträume still stehen. Wird für einen vollgeladenen Agenten auf die reale Batteriekapazität ein C-Faktor von 1 für die Entladung angenommen, folgt mit $I_d = 52,2 \text{ A}$ eine konstante Entladeleistung von 18,8 kW über 60 min. Wird der in 4.7 ausgewiesene Puffer von 25 % der Flottengröße zur Sicherung der Verfügbarkeit für ungeplante Einsatzanforderungen verwendet, könnten von dieser Flotte zwischen 21:30 Uhr und 04:30 Uhr etwa 450 Serviceagenten zeitgleich Leistung bereitstellen. Bei einer Gleichverteilung auf diese sieben Nachtstunden entspricht das einer Rückspeiseleistung von konstant 1,2 MW oder 8,5 MW als Spitzenwert, welcher bis zur vollständigen Entladung etwa eine Stunde gehalten werden kann.

Demgegenüber steht die zur Wiederherstellung des initialen Ladezustandes benötigte Energie nach Ablauf von T . Von den 7,4 MWh für die Kategorie MIV entfallen 5,1 MWh auf die Einsitzer. Wird eine Rückspeisung erst nach Wiederherstellung des initialen Ladezustands zulässig, ist trotz des großen Anteils still stehender Agenten das Potential zur Rückspeisung relativ gering. Diese Feststellung kann mit dem angewendeten Betriebsmo-

dell begründet werden. Hoch ausgelastete Agenten auf den vorderen Flottenpositionen erreichen das Abbruchkriterium b_{min} mehrmals am Tag und fahren nach kurzer Ladezeit erneut Einsätze. Geringer ausgelastete Agenten auf den mittleren und hinteren Flottenpositionen hingegen erreichen diesen Schwellenwert nicht und warten mit deutlich reduziertem Ladezustand im Straßenraum auf weitere Einsätze. Der ineffiziente Betrieb dieser Agenten führt zu der aufgeführten Differenzenergie nach Ablauf von T . Könnte dieser Umstand durch Anpassungen des Betriebsmodells vermieden werden, besteht für das Nachtzeitfenster ein Potential zur Rückspeisung in etwa in der gleichen Höhe, in welcher am Tag elektrische Energie zur Ladung nachgefragt wird (vgl. Abbildung 4.8). Diesen Punkt ergänzend, erfolgt in Abschnitt 6.2 eine kritische Würdigung des Betriebsmodells.

Abschließend wird der elektrische Energiebedarf überschlägig für den Nahverkehr in Kernstädten in ganz Deutschland berechnet, wenn MIV und ÖPNV durch Serviceagenten ersetzt werden. Aufgrund der Vorfilterung des Datensatzes der MID auf Agglomerationsräume und Kernstädte, ist eine Hochrechnung von der Referenzverkehrszelle auf Deutschland inklusive ländlicher Gebiete nicht möglich. Die Verkehrszelle besitzt Repräsentativität für Kernstädte in agglomerierten Räumen. In diesen Räumen leben 18,2 Mio. Menschen in Deutschland (vgl. Tabelle 3.4). In vereinfachter Darstellung entspricht das 910 Verkehrszellen nach vorgestelltem Muster, mit einem jeweiligen Tagesenergiekonsum von 71 MWh für die beiden Modalitäten MIV und ÖPNV. Anstatt des analysierten Freitags als Tag mit der höchsten Auslastung der Betriebsmittel wird für die Hochrechnung die Abweichung der Verkehrsleistung zu den anderen Wochentagen berücksichtigt. Damit ergibt sich ein Jahresenergiebedarf in der Referenzverkehrszelle von 23,7 GWh und für Kernstädte von 21,6 TWh. Dieser Wert entspricht über 3 % des Bruttostromverbrauchs in Deutschland (vgl. Abschnitt 2.3) und berücksichtigt nur den Nahverkehr für Distanzen bis 50 km von 22 % der deutschen Einwohner in Städten.

Zusammenfassend wurden in diesem Abschnitt die Verteilung der Zustände innerhalb einer Flotte von Serviceagenten analysiert und daraus die bereitzustellende elektrische Leistung für den Betrieb abgeleitet. Ergänzend wurde das Potential zur Rückspeisung in das elektrische Energieversorgungsnetz in der Referenzverkehrszelle untersucht. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der ökologischen und räumlichen Auswirkung des Agentenbetriebs im städtischen Einsatzgebiet aufgezeigt.

4.6 Auswirkungen des Betriebs auf Städte

In diesem Abschnitt wird die Auswirkung des Agentenbetriebs auf das städtische Umfeld vorgestellt. Durch den Abgleich der erfolgreich verrichteten Kettenelemente mit den nicht erfüllten Einsätzen erfolgt zunächst eine Qualifizierung des Betriebsmodells. Anschließend werden für die einzelnen Flotten von Serviceagenten die Fahrleistungen und Verkehrsleistungen ermittelt und das Potential bestimmt, lokale CO₂-Emissionen zu vermeiden. Zuletzt wird die Auswirkung auf den öffentlichen Raum untersucht und abgeschätzt, in welchem Umfang passive Verkehrsflächen durch die Entnahme des ruhenden Verkehrs wieder reaktiviert werden können.

Die Eingangsdaten der MID sind mit einer Stufung zugeschnitten. Zunächst wurden alle Distanzen über 100 km herausgefiltert. Für Serviceagenten als Nahverkehrsmittel sind die Geschwindigkeitsprofile für eine maximale Einsatzdistanz von 50 km festgelegt (vgl. Abbildung 3.27). Eine graphische Aufschlüsselung der nicht erfüllten Wege des MIV findet sich in Abbildung 4.9. Im Vergleich mit Abbildung 4.1 ist ersichtlich, dass im Distanzbereich des Nahverkehrs (grau markierte Fläche) 100 % der Wege mit der in Abbildung 4.5 aufgezeigten Agentenanzahl entnommen worden sind. Damit wird das Betriebsmodell zur Dimensionierung der Agentenflotte im Nahverkehr vom Autor als verlässlich angesehen.

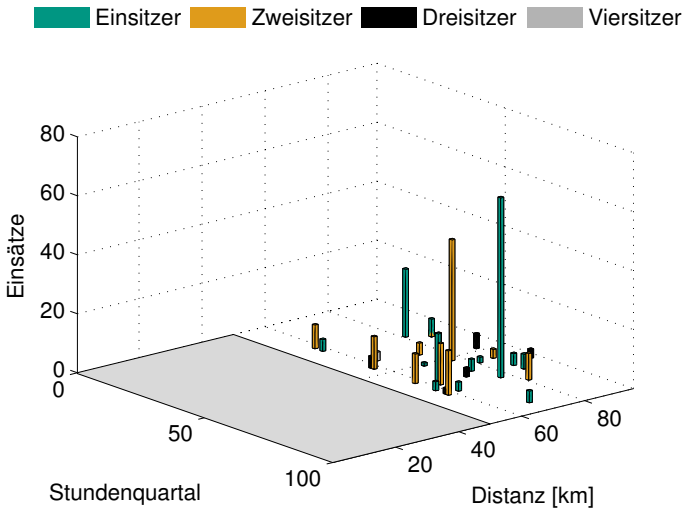


Abbildung 4.9: Verteilung und Anzahl der nicht erfüllten Einsätze bei der Substitution des MIV in der Referenzverkehrszelle.

4.6.1 Reduktion von Treibhausgasemissionen

In diesem Abschnitt wird zunächst die Verkehrsleistung der Serviceagenten in der Referenzverkehrszelle berechnet, um anschließend das Potential herauszuarbeiten, lokale CO₂-Emissionen zu vermeiden.

In Tabelle 4.6 ist der zur Vollsubstitution im Nahverkehr benötigten Anzahl an Agenteneinsätzen die entstehende Verkehrsleistung gegenübergestellt. Ist das Verkehrsaufkommen ein zu erfüllendes Einsatzanforderungsprofil, stellt die Verkehrsleistung ein Simulationsergebnis dar. Diese entsteht aus der Fahrleistung der Agenten, verrechnet mit der jeweiligen Sitzplatzanzahl. Auf den gesamten Personenverkehr der Referenzzone bezogen, wird durch die Fokussierung auf Distanzen bis 50 km Länge eine Verkehrsleistung von 396 116 Pkm erreicht. Dies entspricht 88,7 % des Sollwertes in *T*. Bezogen auf den MIV entfallen 13,7 % der Verkehrsleistung auf Distanzen zwischen 50 km und 100 km. Diese Distanzen werden vom

Modell nicht erfasst. Dies ist ein bedeutendes Ergebnis, da diese Verkehrsleistung aus weniger als 2 % der Wege resultiert, jedoch großen Einfluss auf das Potential zur Vermeidung von CO₂-Emissionen in der Referenzverkehrszelle hat. Eine Diskussion dieses Resultates erfolgt in Kapitel 6.2.5. Zur Vergleichbarkeit der Verkehrsmittel in Tabelle 4.6 ist die gemittelte Einsatzdistanz ED_M bezogen auf die Strecken bis 50 km ausgewiesen. Gegenüber den ausgewählten Werten für die Quartale der Lastspitzen in Abschnitt 3.2.2 ist ED_M jedoch für alle vier Modalitäten erhöht.

M	0-100 km		0-50 km		ED_M [Pkm]
	Einsätze	VL [Pkm]	Einsätze	VL [Pkm]	
Fuß	13937	29867	13937	29867	2,1
Rad	4508	20208	4506	20086	4,5
MIV	23001	302315	22610	260808	11,5
ÖPNV	8368	94384	8231	85355	10,4
Gesamt	49814	446774	49284	396116	8,0

Tabelle 4.6: Einsatzanzahl und Verkehrsleistung von Serviceagenten pro Tag in der Referenzverkehrszelle. VL: Verkehrsleistung, ED_M : gemittelte Einsatzdistanz (bis 50 km). Quelle: Auswertung von [58].

Ergänzend sind in Abbildung 4.10 die Fahrleistungen von allen 16 analysierten Flotten von Serviceagenten zusammengestellt und die entsprechenden Verkehrsleistungen berechnet. Die unbesetzten Transferfahrten sind mit der Kennung *Leer* ausgewiesen. Insbesondere bei den Einsitzer-Agenten für die Fußgänger sind diese für mehr als 50 % der Fahrleistung verantwortlich. Es ist erkennbar, dass mit steigender Sitzanzahl das Verhältnis zwischen Leerfahrten und Verkehrsleistung vorteilhafter wird. Aufgrund der geringen Einsatzdistanzen ist die benötigte Verkehrsleistung zur Substitution von Fuß und Rad mit 12,6 % gegenüber 87,4 % für MIV und ÖPNV gering. Mit der Verteilung der Verkehrsleistung auf die Wochentage nach [57] kön-

nen die ermittelten Zahlen auf ein vollständiges Jahr hochgerechnet werden. Durch die Kategorie MIV werden in der Referenzverkehrszelle etwa 80,2 Mio. Pkm umgesetzt, davon 43,8 Mio. Pkm durch Einsitzer (entsprechend 53,2 Mio. km inklusive Transferfahrten).

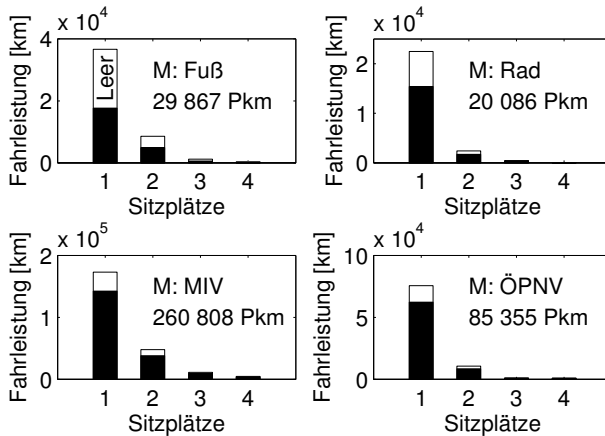


Abbildung 4.10: Fahrleistung und Verkehrsleistung von 16 Serviceagenten-Flotten für den Nahverkehr in der Referenzverkehrszelle.

Aufbauend auf den vorgestellten Verkehrsleistungen wird im Folgenden das Potential zur Vermeidung lokaler, energiebedingter CO₂-Emissionen durch Serviceagenten bestimmt. In Abschnitt 2.4 wurde für die gesamte, derzeitige jährliche CO₂-Emission der deutschen Individualverkehrsflotte 111 Mio. t als Rahmenwert abgeleitet. Nach der für die vorliegende Ausarbeitung verwendeten Definition des MIV-Nahverkehrs trägt dieser dazu einen Anteil von 106 Mio. t bei. Könnte dieser Nahverkehr für Kernstädte auf Basis erneuerbarer Energie bereitgestellt werden, und wird damit die Verkehrsleistung lokal emissionsfrei erbracht, führt das zu einer Emissionsvermeidung von jährlich 20,5 Mio. t CO₂. Dieser Wert wird im Folgenden als Zielwert verwendet, um den Nahverkehr von 18,2 Mio. Einwohnern in Deutschland vollständig emissionsfrei zu betreiben. In Tabelle 4.7 sind

die tatsächlichen Resultate des Betriebsmodells für die Referenzverkehrszelle den 18,2 Mio. Einwohnern in Kernstädten gegenübergestellt. Die 24 Stunden entsprechen dem simulierten Freitag.

Dauer	Parameter	Einheit	C_{ref}	Kernstädte
24 h	Personenverkehr	[Pkm]	446 774	809 Mio.
	MIV-Nahverkehr	[Pkm]	260 808	218 Mio.
	Emissionseinsparung	[tCO ₂]	32,2	29 300
1 Jahr	Personenverkehr	[Pkm]	150 Mio.	228 Mrd.
	MIV-Nahverkehr	[Pkm]	87 Mio.	79 Mrd.
	Emissionseinsparung	[tCO ₂]	10 800	9,8 Mio.

Tabelle 4.7: Verkehrsleistung und Potential zur Emissionsvermeidung durch Serviceagenten für einen Freitag in der Referenzverkehrszelle mit Distanzen bis 100 km und in Kernstädten (hochgerechnet). Quelle: Auswertung nach [58].

Die für Kernstädte ausgewiesenen Werte beruhen auf einer Hochrechnung auf Basis der für die Referenzverkehrszelle ermittelten Werte im Wochenverlauf. Inklusive des Rückschlusses auf die gesamte Personenverkehrsleistung in Deutschland umfasst diese Hochrechnung die folgenden Faktoren, bei einer Genauigkeit in der gesamten Kette von 98,7 %.

1. Bezogen auf den durchschnittlichen Wochentag fallen 81 % der jährlichen gesamten deutschen Personenverkehrsleistung durch Filterung auf Kernstädte heraus.
2. Durch die Entnahme von Wegen über 100 km Länge zum Erhalt der Referenzverkehrszelle entfallen weitere 40 % der Verkehrsleistung.
3. Die 20000 Einwohner der Referenzzelle stellen den 910. Teil der kernstädtischen Bewegung in Deutschland dar.

4. Innerhalb der Referenzverkehrszelle entsteht an einem Freitag 9 % mehr Verkehrsleistung als am durchschnittlichen Wochentag.

In allgemeiner Betrachtung werden mit der vorgestellten Referenzverkehrszelle 0,24 ‰ der deutschen Bevölkerung erreicht, jedoch nur 0,14 ‰ der gesamten Personenverkehrsleistung erbracht. Die Wege in den betrachteten Kernstädten sind damit durchschnittlich kürzer als in ländlich besiedelten Gebieten mit geringerer Einwohnerdichte. Werden die jährlich vermiedenen CO₂-Emissionen aus Tabelle 4.7 auf die Einwohner der Referenzzelle gleichverteilt, ergibt sich ein Emissionsvermeidungspotential durch Serviceagenten von 538 kg pro Einwohner pro Jahr. Dies entspricht einer Masse von nahezu 10 Mio. t CO₂, welche vermieden werden können. Mit diesem Ergebnis werden nur etwa 48 % des als Ziel formulierten Emissionswertes von 20,5 Mio. t CO₂ für Kernstädte erreicht. Eine Diskussion dieser Abweichung erfolgt in Kapitel 6.2.5.

4.6.2 Reduktion von passiven Verkehrsflächen

Abschließend wird als zweite Auswirkung des Betriebs von Serviceagenten in Städten die Freigabe von passiver Verkehrsfläche durch Reduktion des ruhenden Verkehrs des MIV bilanziell untersucht. In [90] wurde für eine Referenzverkehrszelle gleicher Größe gezeigt, dass durch den Betrieb von autonomen Serviceagenten aus einer MOZ heraus etwa 30 km städtische Fahrspur von ruhendem Verkehr befreit werden können. Im Vergleich mit den in Abschnitt 3.2.2 vorgestellten räumlichen Strukturwerten einer Referenzzelle am Maßstab von Berlin, entspricht das einem Freigabepotential von 18 % bis 31 % auf die theoretische Einzelfahrspur. Durchschnittlich kann damit knapp ein Fünftel der derzeit durch ruhenden Verkehr nicht nutzbaren Verkehrsfläche dem fließenden Verkehr zur Verfügung gestellt werden. Unter der Annahme eines gleichen Anteils von Pkw-Abstellständen im öffentlichen Raum in allen Kernstädten Deutschlands, ergeben 30 km pro Zelle hochgerechnet 27 500 km Fahrspur, welche reaktiviert werden könn-

ten. Mit diesem Potential geht eine Zunahme der Fahrleistungen durch die autonomen Transferfahrten in d_l einher, welche Auswirkungen auf die Betriebswirtschaftlichkeit haben. Im folgenden Abschnitt wird diese Zunahme daher in den Kontext der Auslastung von Serviceagenten gestellt. Die vorgestellten Simulationsergebnisse werden um eine ökonomische Bewertung des Agentenbetriebs erweitert.

4.7 Betriebswirtschaftliche Bewertung von Serviceagenten

Im letzten Abschnitt der Ergebnisse der Simulation erfolgt eine Ermittlung der Kosten und Erlöse von Serviceagenten innerhalb einer festgelegten Nutzungsdauer. Ziel ist dabei festzustellen, ob und in welcher Höhe Restkapital durch den Flottenbetrieb entsteht und welcher Einsatzpreis zum kostendeckenden Betrieb mindestens erforderlich ist. Ein wesentliches Kriterium für einen wirtschaftlichen Flottenbetrieb ist die Zulässigkeit, das Angebot zu beschränken und den Einsatz eines weiteren Agenten abzuwägen. Gegenüber teilöffentlichen Finanzierungsmodellen des ÖPNV mit hoher Verfügbarkeit und Sicherstellung des Betriebs werden Serviceagenten nach Vorstellung des Autors privatunternehmerisch betrieben, so dass $V_m(T, x)$ und $f_d(T, x)$ als Bewertungskriterien eines Agenten maßgeblich sind. Für die folgenden Berechnungen wird kein Wettbewerb mehrerer Anbieter von Serviceagenten innerhalb einer Verkehrszelle zu Grunde gelegt. Es wird davon ausgegangen, dass ein Anbieter die Referenzverkehrszelle betreibt, jedoch keinen öffentlichen Versorgungsauftrag zu erfüllen hat.

Als Grundlage für den Aufbau dieses Abschnittes zeigt Abbildung 4.11 die Abnahme der Fahrleistung je zusätzlichem Flottenteilnehmer. Exemplarisch sind die Einsitzer der Flotte zur Substitution des MIV vorgestellt, welche an erster Stelle den Referenzagenten beinhalten. Da jeder Agent aus Abbildung 4.11 nur einen Sitzplatz hat, entspricht die Fahrleistung V_m der Verkehrsleistung. Auf die dargestellte Flotte bezogen, beträgt die Transportdifferenz von $V(T, x)$ zu $V_m(T, x)$ pro Agent maximal 96 km. Auf die

Einsitzer-Flotte bezogen, zeigt der Vergleich der Verkehrsleistung mit der benötigten Tagesfahrleistung einen Mehraufwand von 23 %. Die Differenz entspricht einer Erhöhung der Verkehrsleistung durch den Betrieb von Serviceagenten gegenüber der herkömmlichen Verwendung von Pkw und ist den Transferfahrten geschuldet. Der Wert liegt über den Resultaten von [18] (13 %) und deckt sich mit dem Ergebnis aus [38]. Sofern die Einführung von Serviceagenten in einem Verkehrsraum nicht durch eine Anpassung der lokalen Verkehrssteuerung begleitet wird, könnte diese Erhöhung der Verkehrsleistung zu einer Reduktion der Verkehrsflussgeschwindigkeit führen.

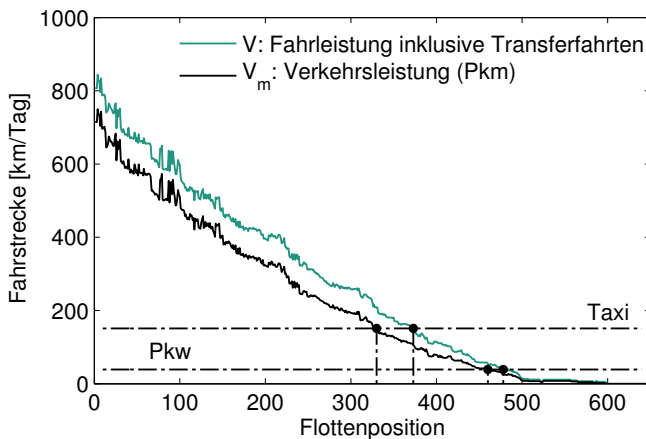


Abbildung 4.11: V und V_m der Einsitzer-Agenten zur Substitution des MIV in T .

Da der Algorithmus des Betriebsmodells große Strecken bevorzugt, sofern diese zu dem jeweiligen Zeitpunkt verfügbar sind, hat der Referenzagent theoretisch die höchste Verkehrsleistung und damit im Betrachtungszeitfenster die höchste Durchschnittsgeschwindigkeit. Der Algorithmus des Betriebsmodells prüft die Stundenquartale jedoch nacheinander für jeden Agenten und nicht ereignisorientiert, so dass der Referenzagent nicht mit Sicherheit in jedem Quartal die längsten Strecken erhält. Aus diesem Grund hat in Abbildung 4.11 der Agent mit der ID 7 mit 750 km die höchste

$V_m(T, x)$. Unter der Annahme, dass täglich die gleiche Beförderungsaufgabe vorliegt, resultieren für die ersten 104 Flottenpositionen Jahresfahrleistungen über 200 000 km. Über 270 Flottenpositionen erreichen jährliche Fahrleistungen von mehr als 100 000 km. Da die Simulation nur einen Freitag als Wochentag mit der Verkehrsleistungsspitze berücksichtigt, entsprechen diese Jahresfahrleistungen Maximalwerten. Werden die Jahresfahrleistungen von Pkw (14 200 km pro Jahr) und Taxi (55 100 km pro Jahr) betrachtet, weisen die Agenten auch auf den Flottenpositionen 330 (Taxi) und 460 (Pkw) noch höhere Fahrleistungen auf (vgl. Abbildung 4.11). Dabei muss berücksichtigt werden, dass weniger als die Hälfte der Fahrleistung von Taxis mit einem zahlenden Kunden besetzt ist (vgl. Abschnitt 2.5.1).

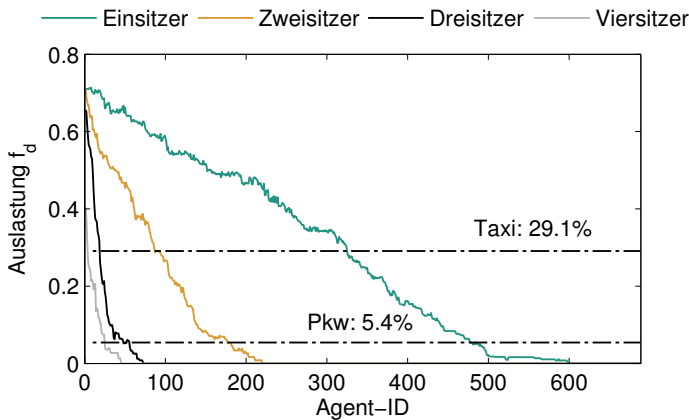


Abbildung 4.12: Abnahme der Auslastung $f_d(T, x)$ der Einsitzer-Flotte der Serviceagenten für die Substitution des MIV.

Um eine Flotte von Serviceagenten wettbewerbsfähig gegenüber anderen Verkehrsmitteln zu platzieren, sind der Absolutwert $V_m(T, x)$ und die Auslastung $f_d(T, x)$ entscheidend. Kennzeichnet $f_s(T, x)$ lediglich den streckenmäßigen Mehraufwand, unabhängig der absoluten $V_m(T, x)$, berücksichtigt $f_d(T, x)$ den zeitlichen Absolutwert. Abbildung 4.12 zeigt die Abnahme der zeitbasierten Auslastung der Einsätze am Beispiel der Substitution des MIV.

Die Markierungen weisen unter Anwendung der Werte aus Abschnitt 2.5.1 die durchschnittliche Auslastung von heutigen Pkw und Taxis aus. Es ist ersichtlich, dass in allen Sitzplatzkategorien Agenten eine höhere Auslastung aufweisen können als Taxis oder Pkw. Insgesamt haben 324 von 598 Einsitzern eine höhere Auslastung als das Taxi und 81 % dieser Flotte sind höher ausgelastet als ein heutiger Pkw. 77 Einsitzer befördern sogar über 60 % des Betrachtungszeitraumes Passagiere. Die zunehmend geringere Anzahl an ausstehenden Einsätzen im Betrachtungszeitraum führt in allen Kategorien mit steigender Agentenanzahl zu einer Abnahme der Auslastung.

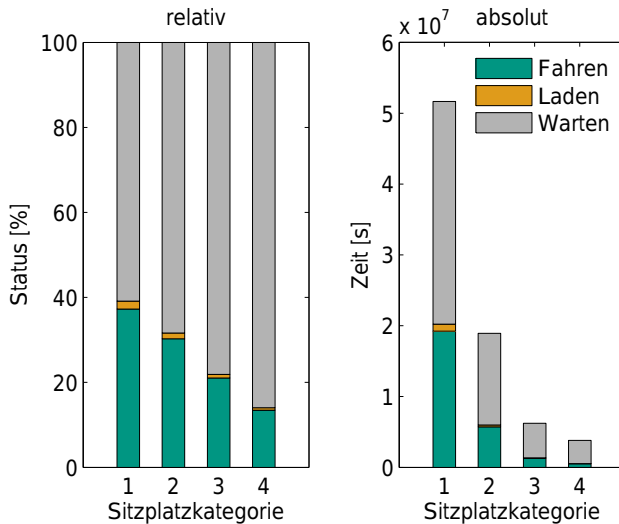


Abbildung 4.13: Auslastung der gesamten Flotte nach Sitzplatzkategorien für die Substitution des MIV und einen vollständigen Betriebstag. Relative Anteile (links) bezogen auf die Statushäufigkeit, absolute Anteile (rechts) bezogen auf die Gesamtzeit der Flotte.

Neben der Auswertung der einzelnen Agenten zeigt Abbildung 4.13 die Auslastung der gesamten Flotte für die Substitution des MIV. In statusbezogener Betrachtung (*relativ*) ist erkennbar, dass die durchschnittliche

Fahrzeit mit höherer Sitzplatzzahl abnimmt. Die Einsitzer-Flotte erzielt über alle 598 Teilnehmer eine durchschnittliche Auslastung von 37,2 %, entsprechend etwa neun Stunden des betrachteten Tages, in welchen Passagiere befördert werden. Da der maßgebliche Teil der Wege zwischen 07:00 Uhr und 19:00 Uhr anfällt (vgl. Abbildung 4.2), stellt dies gegenüber herkömmlichen Verkehrsmitteln eine hervorragende Auslastung dar. Einsitzer haben in drei Vierteln dieses für den Fahrbetrieb relevanten Tageszeitraumes einen Passagier an Bord. Für die Viersitzer-Flotte beträgt die Wartezeit in T über 80 %. Im Vergleich mit den anderen Sitzplatzkategorien haben die Viersitzer damit die geringste Auslastung, diese liegt jedoch immer noch über der Auslastung des ÖPNV (vgl. Abschnitt 2.5.1). Die Betrachtung des Status der Gesamteinsatzzeit der Flotte (*absolut*) zeigt in Abbildung 4.13, dass Einsitzer länger Einsätze fahren, als die Gesamteinsatzzeit der Zweisitzer beträgt. Dieser Punkt unterstreicht die Bedeutung der Auslastung der Einsitzer gegenüber den anderen Sitzplatzkategorien.

Der Einsatzzeitraum der verwendeten Fahrzeuge und elektrischen Speicher ist abhängig von der Laufleistung einer Flottenposition x (vgl. Abschnitt 3.1.3), der resultierenden Zyklenanzahl und der benötigten Entladetiefe. Die Laufleistung wird ausgehend vom simulierten Freitag auf die Nutzungsdauer hochgerechnet. Diese Herangehensweise entspricht damit dem wirtschaftlich ungünstigsten Szenario. Weiterhin wird angenommen, dass jeder Agent innerhalb der Nutzungsdauer immer die gleiche Flottenposition besetzt. Das Resultat spiegelt damit zwar nicht den realen Betrieb wieder, in welchem nach einer dem Markt angepassten Betriebsstrategie eine Verteilung der Einsätze erfolgen kann. Durch diese Vorgehensweise können die Flottenpositionen jedoch zueinander ins Verhältnis gesetzt und Aussagen über Teilbereiche der Flotte als Ganzes getroffen werden.

Für die Ermittlung der Austauschrate der elektrischen Speicher werden der Fahrverbrauch und die Laufleistung herangezogen. In Abbildung 4.14 sind für die einzelnen Distanzen die durch die Fahrtmodellierung entstehenden Fahrverbräuche ausgewiesen. Der Abbildung kann entnommen werden,

dass für Karlsruhe im Winter je nach Distanz der durchschnittliche Fahrverbrauch zwischen 16,2 kWh/100 km (1 km) und 23,6 kWh/100 km (50 km) variiert. Der Anstieg des durchschnittlichen Fahrverbrauchs bei längeren Distanzen kann durch die größeren Fahrtanteile mit höherer Geschwindigkeit begründet werden.

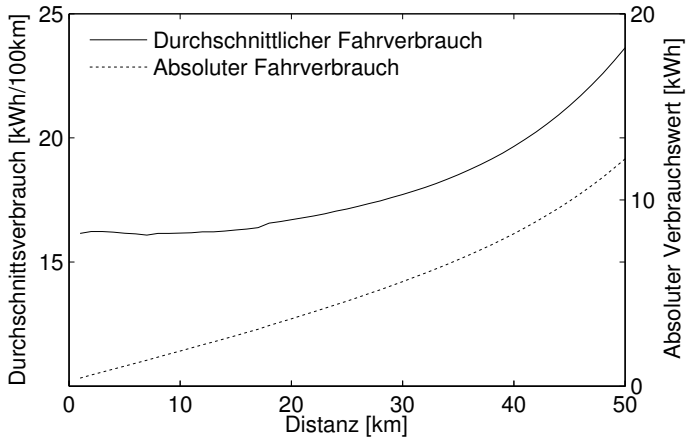


Abbildung 4.14: Absolute Verbrauchswerte und abgeleitete Durchschnittsverbräuche von Serviceagenten ohne Transferfahrten für Nahverkehrsdistanzen im Januar in Karlsruhe.

Für einen einzelnen elektrischen Speicher ist mit $p_{DoD} = 87\%$ und einer Vollzyklenanzahl von 1716 ein Maximaldurchsatz von 179 150 Ah bis zum EoL bei 70 % ermittelt worden (vgl. Abschnitt 3.1.2). Dies entspricht einem Umsatz zur Traktion von 32 250 kWh. Je nach Flottenposition und resultierendem Verbrauchswert entsteht ein Fahrleistungsband für die Batterien zwischen 137 000 km und 199 000 km. Diese Reichweite entspricht etwa den Herstellergarantieleistungen derzeitiger elektrischer Pkw im Kompaktklassesegment [80]. Nach dieser Fahrleistung wird ein Austausch benötigt und die Batterie für 26,7 % des Neukaufpreises in den Wertschöpfungskreislauf zurückgegeben (vgl. Abschnitt 3.1.3). Mit der an-

genommenen Laufleistung von 300 000 km ergeben sich hochgerechnet für diese Flotte die in Abbildung 4.15 aufgezeigten Wechselbedarfe des elektrischen Speichers und der Fahrzeuge. Das maximale Alter ist für Fahrzeuge und Speicher auf zehn Jahre festgelegt.

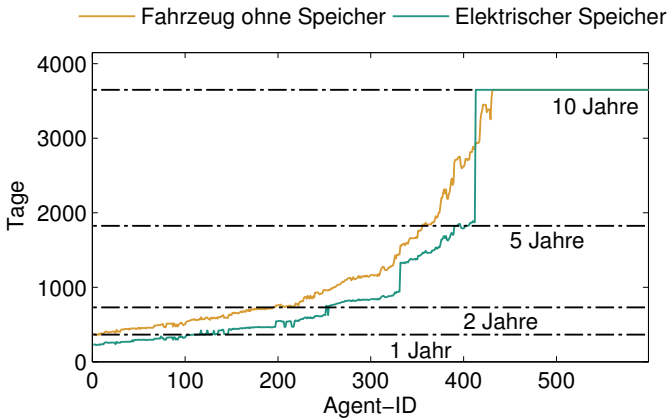


Abbildung 4.15: Lebensdauer der Einsitzer-Agentenflotte und den zugehörigen elektrischen Speichern für die Substitution des MIV.

Es ist ersichtlich, dass etwa ein Drittel der 598 Fahrzeuge innerhalb von zwei Jahren ersetzt werden muss, da die zulässige Reichweite überschritten wird. Annähernd ein Drittel der Flottenpositionen erreicht diese Laufleistung jedoch nicht einmal innerhalb von 10 Jahren. Der elektrische Speicher hat demgegenüber eine noch höhere Austauschrate. Innerhalb des ersten Jahres wird für 100 Agenten ein Austausch fällig. Auf der anderen Seite sind 30 % der elektrischen Speicher sehr gering ausgelastet, so dass die verfügbare Energiemenge auch innerhalb von 10 Jahren nicht entnommen wird. Die kalkulierte Auslastung dieser Flottenteilnehmer ist nicht ausreichend, um Verluste durch kalendarische Alterung zu vermeiden. Dies ist bedeutend, da die Einsitzer-Flotte zur Substitution des MIV unter allen 16 Flotten die am höchsten ausgelastete Flotte darstellt.

Aufgrund der hohen realisierten Laufleistungen und der aufgezeigten, hohen Austauschrate von Fahrzeugen und Batterien innerhalb einer Flotte wird für die Berechnung des Restkapitals eine einjährige Nutzungsdauer angewendet. Dies spiegelt den Anspruch wider, durch kurze Refinanzierungszeiträume der Fahrzeuge auch kurze Innovationszyklen zu ermöglichen.

In Tabelle 4.8 wird die ständige Verfügbarkeit der Einsitzer-Flotte für den MIV ökonomisch bewertet. Eingangswerte dafür sind grundsätzlich die Dimensionierung der Flotte aus Abschnitt 4.3 und im Speziellen die Einnahmen über \mathcal{H}_x von X . In Anlehnung an einen durchschnittlichen Deutschen FFCS-Anbieter wird die Zahlungsbereitschaft mit 0,29 €/min angenommen (vgl. Abschnitt 2.5). Ergänzend wird die TCO-Betrachtung aus Abschnitt 3.1.3 für die simulierten, zurückgelegten Distanzen übernommen. Für die Berechnung werden die Kosten des regulären Einsitzer-Agenten verwendet (Spalte *Serviceagent (Komfort)*). Da die Annahmen für Versicherung und Wartung mit einer hohen Unsicherheit behaftet sind, sind von den Betriebskosten nur die Energiekosten vorgestellt. Diese werden konservativ mit 0,28 €/kWh als Strompreis für Endkunden angenommen.

Wie in Abschnitt 4.3 herausgestellt, werden für 20000 Einwohner 598 Einsitzer-Agenten benötigt, um die Verkehrsleistungslastspitze abzudecken. Wird das vorgestellte Anforderungsprofil an jedem Tag abgearbeitet und behält jeder Agent dauerhaft seine Flottenposition, werden bei einjähriger Nutzungsdauer 602 Fahrzeuge und 714 Batterien benötigt. Die Gesamtkosten inklusive Ersatz der Fahrzeuge und Speicher belaufen sich auf 15,4 Mio. €. Unter separater Berücksichtigung der Laufleistung für Fahrzeuge und Speicher liegt die Summe der Restwerte bei 6,9 Mio. €, so dass buchhalterisch eine Investition in die Flotte von 8,5 Mio. € vorliegt. Unter Einbezug der Energiekosten und Umsatzerlöse des Fahrbetriebs verbleibt ein Restkapital von 17,6 Mio. €. Wird dieses Restkapital vollständig verrechnet, liegt der Mindesteinsatzpreis bei 0,115 €/min. Wird die Nutzungsdauer auf drei Jahre erweitert, sinkt der Preis um 17 % auf 0,096 €/min. Diese Werte entsprechen dem ausschließlichen Fahrbetrieb.

Parameter	Einheit	Nutzungsdauer in Jahren		
		1	2	3
Benötigte Fahrzeuge	[-]	602	796	977
Benötigte Batterien	[-]	714	979	1305
Initiale Kosten	[Tsd. €]	14400	14400	14400
<i>Fahrzeuge</i>	[Tsd. €]	9900	9900	9900
<i>Speicher</i>	[Tsd. €]	4500	4500	4500
Ersatzkosten	[Tsd. €]	1000	6200	11600
<i>Fahrzeuge</i>	[Tsd. €]	100	3300	6300
<i>Speicher</i>	[Tsd. €]	900	2900	5300
Kosten der Flotte	[Tsd. €]	15400	20600	26000
Restwert nach ND*	[Tsd. €]	6900	6600	6400
Reale Kosten in ND*	[Tsd. €]	8500	14000	19600
Energiekosten	[Tsd. €]	3000	6100	9200
Gesamtkosten	[Tsd. €]	11500	20100	28800
Erlös Fahrbetrieb	[Tsd. €]	29100	58200	87300
Restkapital	[Tsd. €]	17600	38100	58500
Mindesteinsatzpreis	[€/min]	0,115	0,100	0,096

Tabelle 4.8: Gerundete Kosten und Erlöse des Flottenbetriebs von 598 einsitzigen Komfortagenten bei einem Strompreis von 0,28 €/kWh und einer Zahlungsbereitschaft von 0,29 €/min. *Nutzungsdauer.

Berücksichtigung finden muss, dass in diese Kostenabschätzung weder Gemeinkosten für die MOZ (z.B. Fläche, Gebäude und Leistungsbereitstellung), noch die Kommunikationsplattformen, das Datenmanagement, die Personalkosten oder sonstige Betriebskosten wie die Flottenwartung oder Versicherung einfließen. Diese Kostengruppen müssen durch das Restka-

pital abgebildet werden können. Die vorgestellte Berechnungsgrundlage ermöglicht Investitionsmodelle zur Nutzung der Infrastruktur als tarifierbare Dienstleistung. Es ist denkbar, dass ein Flottenbetreiber Skaleneffekte durch den Betrieb von Flotten in mehr als einer Verkehrszelle ausnutzt und die Flottengröße an die Auslastung der Flottenposition anpasst.

In Tabelle 4.8 sind die Erlöse über die Einsatzzeit mit Passagieren kalkuliert. Ergänzt mit den Fahrleistungen aus Abschnitt 4.6.1 können die distanzbasierten Kosten der Flotte ermittelt werden. Bei einjähriger Nutzung entstehen für die betrachtete Flotte Gesamtkosten von 11,5 Mio. €, bei einer Flottenfahrleistung von 63 100 000 km. Inklusive Transferfahrten resultieren spezifische Kosten von 0,183 €/km als Basisbetrag.

4.8 Sensitivitätsanalyse

In diesem Abschnitt werden einzelne Parameter der Basissimulation verändert, um die Auswirkung auf das Gesamtsystem zu untersuchen. Zunächst werden die Variationsmöglichkeiten des Modells insgesamt aufgezeigt, anschließend die Sensitivität der bedeutendsten Parameter untersucht. Als übergeordnete Simulationsergebnisse werden zur technischen Seite die Flottengröße und auf der ökonomischen Seite das Restkapital nach Nutzungsdauer beobachtet. In Tabelle 4.9 sind mögliche Parametervariationen zu beiden Seiten vorgestellt.

Gegenüber der Basissimulation des jährlichen Spitzenlasttags im Winter kann die Flottengröße im Sommer in der Referenzstadt Karlsruhe bei höheren Umgebungstemperaturen und geringerem Fahrverbrauch untersucht werden. Ebenso stellt sich die Frage, ob und in welchem Maß die einheitliche Ladeleistung von 94 kW als zeitliches Kriterium für die Verfügbarkeit der Flotte eine Auswirkung auf die benötigte Fahrzeuganzahl hat. Denkbar ist dabei ein Ladeleistungsintervall zwischen dreiphasiger Bereitstellung von 22 kW (mit 32 A) und 120 kW (2016: Maximal angebotene Ladeleistung für Elektrofahrzeuge [108]). Als zweiter elektrischer Parameter kann

der Energieinhalt des Speichers variiert werden, um längere Einsatzzeiträume zu ermöglichen und damit eine geringere Anzahl an Agenten vorhalten zu müssen. Um Distanzen des Nahverkehrs bis 50 km zu erreichen, werden nach Abbildung 4.14 mindestens 12 kWh benötigt. Als kleinster Energieinhalt des Speichers sind dabei 15 kWh sinnvoll. Darin enthalten ist dann ein Puffer für Transferfahrten und die Rückkehr zu einer MOZ. Als sinnvoller Maximalwert erscheint ein Energieinhalt von 90 kWh. Diese Speichergröße findet sich in derzeit erhältlichen und für Langstrecken ausgelegten elektrischen Fahrzeugen [107]. Hinsichtlich der Kategorie Einsatzort können gegenüber Karlsruhe sehr warme oder sehr kalte Orte durch die Reduktion der Reichweite einen Einfluss auf die Anzahl der erreichbaren Kettenelemente haben und damit ebenso die Flottengröße beeinflussen.

Kategorie	Parameter	Einheit	Veränderung		
			(-)	Standard	(+)
<i>Verkehrstechnisch: Auswirkung auf die Flottengröße</i>					
Flotte	Monat	[-]	-/-	Winter	Sommer
	Ladeleistung	[kW]	22	94	120
Agenten	Energieinhalt	[kWh]	15	21,6	90
Einsatzort	Breitengrad	[-]	60° N	49° N	37° N
<i>Ökonomisch: Auswirkung auf das jährliche Restkapital</i>					
	Agententyp	[-]	Basis	Komfort	-/-
Investition	Batteriepreis	[€/kWh]	110	350	-/-
	Batterie-Technologie	[-]	-/-	1	2
Betrieb	Strompreis	[€/kWh]	0,08	0,28	-/-
Kunden	Preis	[€/min]	0,18	0,29	-/-

Tabelle 4.9: Variationsalternativen für die Sensitivitätsanalyse.

Nicht prozentual abschätzbar ist eine mögliche Veränderung der Verkehrsflussgeschwindigkeit durch Serviceagenten. Einerseits könnte die durch unbesetzte Transferfahrten zusätzlich entstehende Fahrleistung zu einer Reduktion führen. Andererseits könnte in einem vollständig autonomen Verkehrssystem durch die Entnahme lokaler Steuerungssysteme (Lichtsignalanlagen, einheitlich zulässige Höchstgeschwindigkeit) eine Zunahme der Verkehrsflussgeschwindigkeit erreicht werden. Ein solches Szenario wurde in der idealisierten Darstellung in Abschnitt 1.1 beschrieben.

Auf der Seite der ökonomischen Parameter mit Einfluss auf das Restkapital kann statt Serviceagenten mit Qualitätsmerkmalen der Kompaktklasse der preisgünstigere Basisagent eingesetzt werden (vgl. Tabelle 3.3). Demgegenüber steht das Ziel, für eine erfolgreiche Marktintegration die Kunden mit hohem Komfort und Transportqualität zu überzeugen. Für den Lithium-Ionen-Batteriepries wird in [82] das Unterschreiten der Schranke von 110 €/kWh (Umrechnung mit einem Wechselkurs von EUR/USD 1,35) als Kommerzialisierungsziel ausgegeben. Diese Kostenvorteile umfassen auch einen möglichen Technologiesprung wie in Abbildung 3.7 dargestellt. Auf der Seite der Betriebskosten ist eine Variation des Strompreises möglich. Wird ausschließlich erneuerbare Energie verwendet, kann gegenüber einem Endkunden-Strompreis von 0,28 €/kWh der Bezugspreis auf 0,08 €/kWh sinken [40]. Sollen Serviceagenten am Mobilitätsmarkt erfolgreich herkömmliche Pkw substituieren, muss mindestens eine Preisparität existieren. Nach Abschnitt 2.5.3 bedeutet das, dass die durchschnittliche Zahlungsbereitschaft anstatt 0,29 €/min nur 0,18 €/min beträgt.

Von den vorgestellten Untersuchungsalternativen zur Flottengröße werden im Folgenden die beiden Kategorien *Agenten* und *Einsatzort* variiert. Aufgrund der Bedeutung der Zahlungsbereitschaft und des Ziels, ausschließlich erneuerbare Energie einzusetzen, werden auf der ökonomischen Seite die Kategorien *Betrieb* und *Kunden* zusammengefasst untersucht.

4.8.1 Flottengröße

In diesem Abschnitt wird die Auswirkung des Energieinhalts und des Einsatzortes auf die Flottengröße untersucht. In Abbildung 4.16 ist die resultierende Flottengröße für das Intervall von 15 kWh bis 90 kWh dargestellt (vgl. Erläuterungen zu Tabelle 4.9). Aus den Datenpunkten der Simulation erzielt eine exponentielle Regressionsfunktion die höchste Anpassungsgüte. Es ist erkennbar, dass der Speicher mit 15 kWh eine Vergrößerung der Einsitzer-Flotte auf 646 Agenten ($X_{MIV} = 998$) nach sich zieht. Mit dem 90 kWh großen Speicher sinkt diese Zahl auf 562 benötigte Agenten ($X_{MIV} = 889$). Durch den größeren Speicher werden weniger Ladungen im Tagesverlauf und damit auch weniger Rückfahrten zu einer MOZ benötigt. Demgegenüber begrenzen die gering ausgelasteten Agenten mit kurzen Einsätzen auf den hinteren Flottenpositionen das Potential, die Flotte noch deutlicher zu verkleinern. Auf diesen Teil der Flotte hat ein vergrößerter Energieinhalt keinen Einfluss, sondern zieht nur höhere Kosten nach sich.

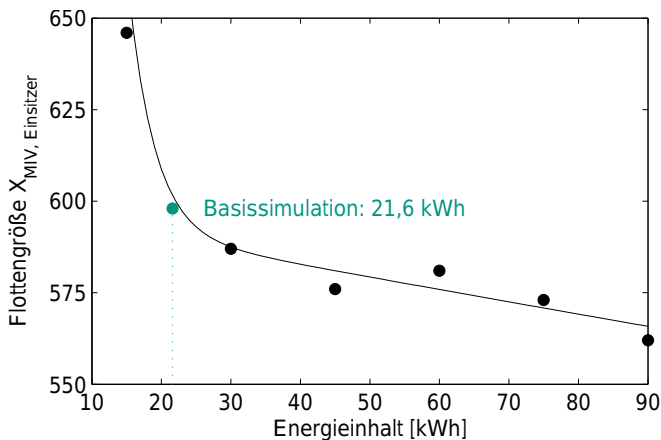


Abbildung 4.16: Auswirkung der Variation des Energieinhalts des einheitlichen elektrischen Speichers auf die Flottengröße der Einsitzer zur Substitution des MIV in der Referenzverkehrszelle.

Als zweiter Parameter wird im Folgenden die Veränderung des Einsatzortes untersucht. Dabei wird analysiert, wie stark der Tagesenergiebedarf der Flotte mit der Umgebungstemperatur schwankt. Um die damit verbundene Änderung des Mobilitätsverhaltens und der Verkehrsnachfrage relativ gering zu halten, werden mit Sevilla in Spanien (37° Nord) und Helsinki in Finnland (60° Nord) zwei Städte innerhalb Europas ausgewählt, für welche im globalen Maßstab ein ähnlicher Kulturraum angenommen werden kann. Die Temperaturprofile dieser beiden Städte finden sich in Anhang A.12. Um die Spreizung zu maximieren, wird Sevilla im Juli Helsinki im Februar gegenübergestellt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die verwendeten Datensätze der NASA nur Monatsmittelwerte und keine Temperaturspitzen abbilden. Durch die Übernahme von $w_{C,T}$ wird unterstellt, dass in beiden Vergleichsstädten ebenso Freitag der wöchentliche Spitzenlasttag ist. In Tabelle 4.10 sind die Ergebnisse für die Flotte der Basissimulation in den drei untersuchten Städten zusammengefasst.

Stadt	BG*	Jahreszeit	$W_{X,w}$ [MWh]	$X_{MIV,Einsitzer}$	X_{MIV}
Sevilla	37° N	Sommer	43,3	595	930
Karlsruhe	49° N	Winter	51,9	598	933
Helsinki	60° N	Winter	59,4	612	952

Tabelle 4.10: Auswirkung veränderter Einsatzorte und Jahreszeiten auf den Tagesenergiebedarf und die Flottengröße zur Substitution des MIV.
*Breitengrad.

In isolierter Betrachtung des Tagesenergiebedarfs ist ersichtlich, dass durch den Anstieg der Umgebungstemperatur in Sevilla der Energiebedarf für den MIV nur 83 % des Wertes von Karlsruhe beträgt. Durch die sehr niedrigen Temperaturen in Helsinki steigt der Energiebedarf für das gleiche Wegeprofil um 14 %. Zusammengefasst hat die Umgebungstemperatur im europäischen Vergleich einen Einfluss auf den Tagesenergiebedarf im Nahverkehr

und kann zwischen den Jahreszeiten und Breitengraden für die gleiche Flotte zur Substitution des MIV um 16 MWh variieren.

Hinsichtlich der Flottengröße zeigt nur Helsinki eine erwartungsgemäße Entwicklung im Vergleich mit Karlsruhe. Durch die größere Energiemenge wird die Flotte häufiger geladen und dadurch steigt die Anzahl der benötigten Agenten. Einer Erhöhung des Energiebedarfs um 14 % steht dabei nur eine leichte Zunahme der Gesamtflotte um etwas mehr als 3 % gegenüber. Die Flottengröße reagiert damit nicht sehr sensitiv auf die Umgebungstemperatur. Entgegen der Erwartung führt der verringerte Tagesenergiebedarf in Sevilla jedoch nur zu einer marginalen Verkleinerung der Flotte. Eine Erklärung dafür ist, dass das zeitliche Raster von 15 Minuten und der Neubeginn von Fahrten ausschließlich zum Beginn von Quartalen im Modell eine höhere Auswirkung hat, als die Verlängerung der Reichweite innerhalb einer Wegekette durch verringerten Energiebedarf.

Zusammengefasst ist die Flottengröße als Simulationsresultat relativ robust gegenüber den untersuchten, veränderten Parametern. Erst eine deutliche Erhöhung des Energieinhalts oder sehr tiefe Umgebungstemperaturen führen zu einer Veränderungen im einstelligen Prozentbereich.

4.8.2 Restkapital

Um die Auswirkung auf das Restkapital zu untersuchen, werden der Basis-simulation in diesem Abschnitt verringerte Betriebskosten und eine geringere Zahlungsbereitschaft gegenübergestellt. Das bisherige Simulationsergebnis basiert auf der Zahlungsbereitschaft für Carsharing, welche über der Zahlungsbereitschaft für den privaten Pkw liegt. In Abbildung 4.17 wird das Ergebnis der Einsitzer-Flotte verglichen mit einem Betrieb in welchem nur die Zahlungsbereitschaft der privaten Pkw-Halter angenommen und erneuerbare Energie verwendet wird. Dies entspricht einer gesunkenen Zahlungsbereitschaft von 0,29 €/min auf 0,18 €/min und einer Verringerung der Stromgestehungskosten von 0,28 €/kWh auf 0,08 €/kWh (vgl. Ausführ-

rungen zu Anfang dieses Abschnitts). Aufgrund der geringeren Zahlungsbereitschaft sinkt dadurch der Erlös von 29,1 Mio. € auf 18,1 Mio. €. Durch die erneuerbare Energie sinken ebenso die Stromkosten als Teil der Betriebskosten von 3,0 Mio. € auf unter 1,0 Mio. €. Als Resultat verringert sich das Restkapital von 17,6 Mio. € auf 8,7 Mio. €. Wird ohne Veränderung der Energiebereitstellung nur die Zahlungsbereitschaft gesenkt, liegt das Restkapital bei 6,5 Mio. €.

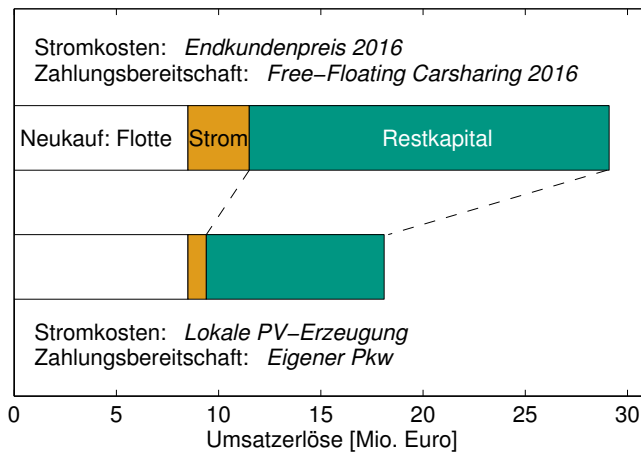


Abbildung 4.17: Vergleich der jährlichen Erlöse von 598 Einsitzern zur Substitution des MIV bei reduziertem Strompreis und reduzierter Zahlungsbereitschaft.

Zusammengefasst verbleibt bei dem Betrieb von Serviceagenten in Preisparität mit konventionellen Pkw unter Einsatz erneuerbarer Energie weiterhin ein positives Restkapital. Die Ergebnisse der Basissimulation und der Sensitivitätsanalyse werden im folgenden Kapitel kompakt vorgestellt.

5 Ergebnis der Simulation

5.1 Transporttechnische Kalkulation

Für den Betrieb in einer kernstädtischen Umgebung mit 20000 Einwohnern werden zur Vollsubstitution des bestehenden MIV-Nahverkehrs mindestens 933 Serviceagenten benötigt. Dies entspricht 12 % der bestehenden Pkw-Flottengröße mit konventionellen Antrieben. Wird weiterhin der ÖPNV ersetzt, werden dafür 437 Agenten benötigt. 94 % der angeforderten Einsätze können mit Ein- und Zweisitzern abgearbeitet werden, Dreisitzer und Viersitzer haben vorrangig eine produktpolitische Relevanz. Aufgrund der im Verhältnis geringen Wegeanzahl und kurzen Einsatzdistanzen sind die Modalitäten Fuß und Rad für eine Erstintegration von Serviceagenten weniger geeignet. Der Ersatz dieser Modalitäten bedeutet keine Einsparung von Emissionen. Wird für das Zeitraster innerhalb eines Zeitschrittes (Stundenquartal) eine Gleichverteilung der Einsätze angenommen, beginnt zwischen 07:00 Uhr und 19:00 Uhr spätestens alle vier Sekunden ein Agent einen neuen Einsatz. Demgegenüber zeigt die Analyse der Flotte im Verlauf des simulierten Betriebstages, dass trotz teilweise sehr hoher Auslastungen auf den vorderen Flottenpositionen eine Vollsubstitution des MIV für einzelne Flottenteilnehmer sehr große Wartezeitfenster nach sich zieht. Sofern der Anspruch an ein hochkomfortables Massentransportmittel mit individuellem Zuschnitt nicht verletzt wird, könnten die nächtlichen Zeiträume geringer Auslastung für den Transport von Gütern verwendet werden.

Eine Analyse der Sensitivität der Flottengröße zeigt, dass erst bei einer Vervierfachung der Nominalkapazität des elektrischen Speichers eine Reduktion der Fahrzeuganzahl im einstelligen Prozentbereich erzielt wird.

Aufgrund des vorgegebenen betrieblichen Rasters haben weiterhin auch große Veränderungen der Umgebungstemperatur nur marginale Auswirkungen auf die Flottengröße. Die vorgestellten Ergebnisse sind damit im Rahmen des erstellten Modells als relativ robust anzusehen.

Hinsichtlich des Tagesablaufs erreichen einzelne Agenten Auslastungen von über 70 % und befördern mehr als 40 Passagiere. Von den Einsitzern im MIV-Betrieb haben 400 mehr als eine Vollladung im Tagesverlauf, 200 Agenten laden sogar mindestens fünf Mal innerhalb von 24 Stunden vollständig nach. Diese Flotte stellt dabei unter den 16 analysierten Flotten die bedeutendste und am höchsten ausgelastete Flotte dar. Es werden darin Tagesfahrleistungen der ersten Agenten von mehr als 700 km erreicht. Aus einer pauschalen Annahme von zwei Minuten zwischen Anforderung und Ankunft des Serviceagenten beim Passagier (entsprechend 1,6 km Transferfahrt) resultiert eine zusätzliche Fahrleistung in Höhe von 23 % im Tagesverlauf. Mit steigender Sitzanzahl verbessert sich das Verhältnis zwischen Leerfahrten zum Transfer und der Verkehrsleistung. Hinsichtlich des Energieeinsatzes im Tagesverlauf setzt der *Referenzagent* (erster Agent der MIV-Flotte) 141 kWh um.

5.2 Energietechnische Planung

Mit der vorliegenden Arbeit ist es möglich, für eine konkrete Einwohnerzahl den elektrischen Energiebedarf für die Fortbewegung im Nahverkehr abzuschätzen. Dies ermöglicht eine systematische Planung, um den kohlenstoffbasierten Antrieb im Nahverkehr zu ersetzen. Der eingesetzte elektrische Speicher wird mit einem hohen C-Faktor von 4,4 geladen, entsprechend 94 kW, um die Standzeiten in einer MOZ zu reduzieren. Für eine Vollladung wird in etwa eine Viertelstunde benötigt. Bis zum festgelegten Lebensende sind pro Speicher 32,2 MWh zur Traktion entnehmbar. Durch die Simulation ist es möglich, in den einzelnen Zeitschritten agentenspezifisch die Auslastung im Tagesverlauf, und für die Flotte den Energieverbrauch und

die benötigte Ladeleistung zu analysieren. Wird in der Referenzverkehrszelle eine einzelne MOZ angenommen, laden zur Substitution von MIV und ÖPNV dort maximal 96 Serviceagenten gleichzeitig. Dieser Wert kann als Minimaldimensionierung für die Planung in einer Zelle verwendet werden. Für den simulierten Freitag im Winter in Karlsruhe werden für diese beiden Modalitäten 71 MWh benötigt. Dieser Wert stellt als Spitzentag in der Woche den ungünstigsten Betriebsfall dar. Mindestens 60 MWh davon werden im Tagesverlauf nachgeladen. 53 % dieser Energie wird durch die Einsitzer-Flotte des MIV nachgefragt.

Die in der Referenzverkehrszelle bereit zu stellende Leistung schwankt dabei im Mittelwert im Tagesverlauf zwischen 1 MW und 6 MW mit Spitzenwerten von über 10 MW. Für den Einsatz der MOZ als bidirektionale Leistungsschnittstelle existiert in erster Näherung großes Potential, um nachts Leistung in der gleichen Höhe in das elektrische Netz zurück zu speisen. Auf Basis der ermittelten Zahlen kann für die deutschen Kernstädte ein Jahresenergiebedarf zur Traktion im Nahverkehr für MIV und ÖPNV von 21,6 TWh angenommen werden. Dies entspricht mehr als 3 % des deutschen Bruttostromverbrauchs.

5.3 Emissionsreduktion und Raumnutzung

Insgesamt wird durch Serviceagenten in der vorliegenden Arbeit eine Verkehrsleistung von etwa 400 000 Pkm am Tag in der Referenzzelle umgesetzt, wovon 260 000 Pkm auf den MIV entfallen. Durch den elektrischen Antrieb und die regenerative Speisung der Traktionsenergie können täglich bis zu 32,2 t direkte, energiebedingte CO₂-Emissionen in der Referenzverkehrszelle vermieden werden. Dies entspricht einem jährlichen Vermeidungspotential von etwa 10 Mio. t in deutschen Kernstädten oder 538 kg pro Einwohner. Neben der Reduktion von Treibhausgasemissionen kann durch die Reduktion des ruhenden Verkehrs ebenso ein großer Anteil bisher passiver Verkehrsfläche reaktiviert werden. Die vorgestellte Refe-

renzverkehrszelle umfasst je nach angenommener Einwohnerdichte eine Fläche zwischen $1,5 \text{ km}^2$ und $5,2 \text{ km}^2$. Durch den Ersatz der MIV-Flotte mit Serviceagenten können darin etwa 30 km städtische Fahrspur durch Entnahme von öffentlichen Parkflächen freigegeben werden. Dies entspricht 18 % bis 31 % der theoretischen Einzelfahrspur in der Zelle. Zusammengefasst können durch den Einsatz von Serviceagenten CO₂-Emissionen im Nahverkehr vermieden und der ruhende Verkehr erheblich reduziert werden.

5.4 Betriebswirtschaftliche Analyse

Abschließend wurde untersucht, ob und in welchem Umfang durch den Betrieb von Serviceagenten für einen Flottenbetreiber Restkapital entsteht. Dazu wurde aufgrund der herausragenden Bedeutung exemplarisch die Einsitzer-Flotte zur Substitution des MIV herangezogen. Für die Kalkulation wurden komfortable Serviceagenten mit einem Fahrzeugpreis von 16 600 € verwendet. Der batterieelektrische Speicher kostet zusätzlich 350 €/kWh und entspricht initial 24 % des Gesamtfahrzeugpreises bei 21,6 kWh Energieinhalt. Für Fahrzeug und Speicher wird bei einjähriger Nutzung oder dem Erreichen der maximalen Laufleistung ein Restwert von 26,7 % des Neukaufpreises verwendet. Mehr als 270 Flottenpositionen erreichen Jahresfahrleistungen von über 200 000 km. Die durchschnittliche zeitliche Flottenauslastung beträgt 37,2 % und ist damit wesentlich höher als von Taxi und Pkw. Diese Feststellung ist insbesondere bedeutend, da das Betriebsmodell eine Vollsubstitution des MIV im Nahverkehr erzielt. Durch die hohen Laufleistungen sinken die Einsatzkosten von Serviceagenten auf 50 % gegenüber einem privat gehaltenen Vergleichsfahrzeug in der elektrischen Kompaktklasse. Hat bei konventionellen Pkw der Neukaufpreis großes Gewicht, sind für Serviceagenten die Betriebskosten bedeutender.

Aufgrund der durch die ersten Flottenpositionen erreichten, jährlichen Fahrleistungen von mehr als 300 000 km wird unter dauerhafter Beibehaltung der zugewiesenen Flottenposition für ein Drittel der Flotte ein Ersatz

des elektrischen Speichers binnen Jahresfrist benötigt. Hingegen wird ein Ersatz von einem Drittel der Fahrzeuge erst nach etwa zwei Jahren nötig. Dieser Teil der Flotte rückt daher in die Lebenszyklusgeschwindigkeit von Elektronikprodukten für den Endkunden und Konsumgütern. Demgegenüber steht ein knappes Drittel der Fahrzeuge und Speicher auf den hinteren Flottenpositionen, für welche aufgrund der geringen Auslastung auch nach zehn Jahren kein Ersatz benötigt wird.

Bei einer Zahlungsbereitschaft der Passagiere von $0,29\text{ €/min}$ und Strombezugskosten von $0,28\text{ €/kWh}$ entsteht bei einjähriger Kalkulation ein Restkapital durch den Betrieb von 598 Einsitzern von $17,6\text{ Mio. €}$. Das Restkapital kann für die Investition in die Infrastruktur und sonstige Gemeinkosten herangezogen werden. Wird das Restkapital verrechnet, liegt der Einsatzpreis für den ausschließlichen Fahrbetrieb bei unter $0,12\text{ €/min}$. Um für den Massenmarkt gegenüber privat gehaltenen Pkw eine Alternative darzustellen, müssen Serviceagenten preisliche und funktionale Vorteile bieten. Der Einsatzpreis privater Pkw liegt bei durchschnittlich $0,18\text{ €/min}$. Inklusiv eines kalkulatorischen Betriebsgewinns darf die Infrastruktur von Serviceagenten damit maximal etwa $0,06\text{ €/min}$ kosten. Wird die Zahlungsbereitschaft auf den Einsatzpreis konventioneller Pkw gesenkt und nur erneuerbare Energie für den Betrieb verwendet, sinkt das Restkapital des Flottenbetriebs für die Einsitzer auf $8,7\text{ Mio. €}$ pro Jahr. In distanzbezogener Betrachtung entstehen für die analysierte Flotte durch den reinen Fahrbetrieb Kosten von $0,18\text{ €/km}$. Die Gesamtkosten für einen Pkw der Kompaktklasse belaufen sich auf mindestens $0,29\text{ €/km}$, so dass etwa $0,11\text{ €/km}$ Differenz für die Refinanzierung von Infrastruktur existieren.

Zusammengefasst über alle Analysen zeigen die Ergebnisse, dass durch autonome und elektrische Serviceagenten in Städten der Primärenergiekonsum fossiler Rohstoffe sinken kann mit einhergehender Reduktion von energiebedingten CO_2 -Emissionen im Straßenverkehr. Gleichzeitig wird der städtische Flächenverbrauch verringert durch erheblich verbesserte Auslastung einzelner Fahrzeuge und einer ganzen Flotte. Durch sehr hohe

Fahrleistungen sinkt der reine Transportpreis relativ zu den Gesteungskosten der Individualmobilität und es verbleibt ein Restkapital für die Finanzierung der Infrastruktur. Auch unter ausschließlicher Verwendung erneuerbarer Energie und einer Platzierung von Serviceagenten am Mobilitätsmarkt in Preisparität zu konventionellen Pkw bleibt dieses Restkapital positiv. Serviceagenten besitzen damit in transport- und energietechnischer, ökologischer und betriebswirtschaftlicher Kategorie das Potential, wesentlicher Baustein im Straßenverkehr zu werden.

6 Zusammenfassung

6.1 Fazit

Die Beantwortung der Forschungsfrage aus Kapitel 1.1 lautet:

„Um bei gleicher Beförderungsqualität den MIV-Nahverkehr von 20 000 städtischen Einwohnern vollständig zu substituieren und eine ausschließliche Speisung mit erneuerbarer Energie zu ermöglichen, werden 933 autonom eingesetzte elektrische Serviceagenten mit einem Tagesenergiebedarf von 52 MWh benötigt.“

Mit dem vorgestellten Modellsystem aus i) Anforderung an die bisherigen Verkehrsmittel, ii) Fahrtmodellierung der Einsätze und iii) Betriebsmodellierung einer Flotte im Tagesverlauf wird der Nahverkehr für Distanzen bis 50 km vollständig durch Serviceagenten abgedeckt. Die Ergebnisse zeigen, dass es im Rahmen der getroffenen Annahmen möglich ist, mit Serviceagenten den städtischen Nahverkehr aus mehreren Perspektiven effizienter, platzsparender und ohne lokale CO₂-Emissionen zu gestalten. Gegenüber Carsharing als Erweiterung des Mobilitätsangebots existiert damit das Potential, mit einem autonomen, elektrischen Massenverkehrsmittel herkömmliche Verkehrsmittel zu verdrängen. Wesentliches Vorgehen dazu ist, die Mobilitätsnachfrage der Bevölkerung als produktionstechnische Aufgabe aufzufassen und als solche abzarbeiten.

Ein wesentliches Resultat der Arbeit ist, dass durch die Elektrifizierung des Antriebs und der Regelmäßigkeit der von der Bevölkerung angeforderten Wege auch ohne spezielle Ladestrategie eine Planbarkeit der elektrischen Last erreicht werden kann, welche die Integration von erneuer-

barer Energie vereinfacht. So können zentrale, bei den MOZ installierte und stationäre Pufferspeicher für ein Referenzgebiet dimensioniert werden, da der im Tagesverlauf benötigte Ladebedarf für die Transportaufgabe im Vorhinein bekannt ist. Eine ausschließliche Speisung mit erneuerbarer Energie wird damit möglich.

Die ermittelte Differenz des Einsatzpreises von Serviceagenten gegenüber dem Einsatz von privaten Pkw kann aus systemischer Perspektive weiter vergrößert werden. Stellhebel dafür sind verlängerte Nutzungsdauern, der konsolidierte Betrieb mehrerer Flotten in einer Vielzahl von Verkehrszellen als auch wettbewerbliche Mechanismen des Flottenbetreibers gegenüber anderen Anbietern. Der letzte Punkt umfasst insbesondere das für die vorliegende Arbeit ausgegebene Ziel, aus ökologischen- und Raumnutzungsgründen für eine Erstintegration in das Verkehrsgeschehen eine andere Modalität vollständig zu substituieren. Die Vollsubstitution einer Modalität ist hinsichtlich der zeitlichen Auslastung und des erwarteten Restkapitals der ungünstigste Betriebsfall.

6.2 Kritische Würdigung

6.2.1 Betriebsablauf

Die Simulationsresultate dieser Arbeit für das Ziel der Vollsubstitution des VKM-basierten Nahverkehrs können als Basisszenario für Serviceagenten herangezogen werden. Nicht berücksichtigt sind betriebliche Strategien zur weiteren Steigerung der Auslastung und Wirtschaftlichkeit des vorgestellten Konzepts. Ein einfaches Beispiel dazu ist der Beginn einer Serie von Kettenelementen bei unvollständiger Ladung. Das Betriebsmodell bearbeitet sukzessive jeden Agenten einzeln und die zeitliche Reihung der angeforderten Einsätze entscheidet, welcher Agent welchen Passagier befördert. Die resultierende Flottengröße stellt damit eine mögliche und hinsichtlich der Erfüllung der Transportaufgabe *richtige* Lösung dar, ist jedoch noch nicht

optimal und könnte durch die Entnahme des zeitlichen Rasters verringert werden. Die erzielten Simulationsergebnisse basieren auf der Betrachtung von Agenten als *Aktuatoren* unter Regie einer Leitzentrale, nicht aber als logische Instanzen mit egozentrierter Handlungsautonomie.

Für die Fortsetzung des erstellten Modells wäre eine Georeferenzierung des Einsatzprofils $w_{C,T}$ eine bedeutende Weiterentwicklung. Im Wegedatensatz der MID sind keine ortsbezogenen Angaben enthalten, so dass für Transferfahrten zwischen den Passagieren pauschal Distanzen mit Verlustzeiten angenommen werden mussten. Durch eine Georeferenzierung könnte die Entfernung zum folgenden Passagier mit in die Auftragsannahme einbezogen werden. Mit ortsbezogenen Daten könnte das Betriebsmodell dahingehend erweitert werden, dass jeder angeforderte Einsatz als *Event* verstanden wird, auf welches sich alle Agenten zur Bearbeitung bewerben können. Je nach momentanem Zustand der sich bewerbenden Agenten und der einzelnen Verortung im Verkehrsraum bietet ein Teil der Flotte damit gegeneinander um diesen nächsten Einsatz. Die zu Grunde liegende Funktion der Zuteilung eines Events ist dabei Teil der Betriebsstrategie. Mit dieser zweiten Stufe des Betriebsmodells könnte eine Optimierung des Einsatzplanungsalgorithmus und eine Reduktion der zusätzlichen Fahrleistungen durch Transferfahrten erreicht werden. Zusätzlich könnte gegenüber der einfachen Laderegie eine bedarfsorientierte Strategie für Laden und Rückspeisen angewendet werden. Ein notwendiger Schritt für diese Ergänzung ist die Aufgabe des zeitlichen Rasters von 15 min, welches derzeit zur Sortierung der statistischen Wegedaten der MID benötigt wird. Andererseits ist es wahrscheinlich, dass auch zukünftig Regelmäßigkeiten in der Mobilitätsnachfrage existieren. So ist es denkbar, dass auch unter Vergabe von Einsätzen an Agenten als logische Instanzen ein Teil einer Flotte weiterhin als Aktuatoren mit festgelegten Mustern eingesetzt werden kann.

Neben einer Erweiterung des Betriebsmodells durch georeferenzierte Einsätze könnte der Simulationszeitraum beispielsweise auf ein gesamtes Jahr vergrößert werden. Damit könnten die Flottenpositionen variiert

und die Fahrleistungen und Auslastungen über einen längeren Zeitraum innerhalb einer Flotte angeglichen werden.

Den Abschluss der Diskussion des Betriebsmodells bilden die Annahmen zu Lade- und Entladeverlusten. Für diese Verluste wurde nach den Ergebnissen der Rollenprüfstandversuche von [47] pauschal ein Aufschlag auf die Traktionsenergie von 31 % verwendet. Aufgrund der hohen Einsatzfolge für Serviceagenten resultiert gegenüber Fahrten auf dem Prüfstand eine andere Belastung des elektrischen Speichers. Für eine realitätsnähere Abschätzung der Lade- und Entladeverluste bedarf es modifizierter Versuche am Rollenprüfstand, welche die Einsatzfrequenz und das Betriebsmuster von Serviceagenten abbilden. Der Autor nimmt an, dass die ermittelten Energiemengen für die MOZ Mindestwerte sind.

6.2.2 Einsatzanforderungsprofil

Im Folgenden werden die Annahmen und das Modell zum Erhalt der Einsatzanforderung diskutiert. Die zur Untersuchung verwendeten Daten der MID stellen Ergebnisse des derzeitigen Mobilitätsverhaltens dar. Diese Daten führen damit erst zu dem Einsatz der herkömmlichen Verkehrsmittel und dem untersuchten Straßenverkehrssystem. Im idealen Fall können für die Untersuchung der Mobilität mit Serviceagenten auch Einsatzprofile aus dem Betrieb von Serviceagenten verwendet werden. Die in dieser Arbeit nicht berücksichtigte Komfortstufe der Agenten wirkt sich nach Ansicht des Autors direkt auf die Anzahl der Fahrzeuge in einer Verkehrszelle aus. Es kann angenommen werden, dass eine hohe Akzeptanz von Agenten zu einem Anstieg der Zahl der benötigten Agenten führt. Für die Fortsetzung dieses Gedankens wird deshalb eine Verteilungsfunktion der Wegenachfrage im Personennahverkehr bezüglich des Komfortbedürfnisses der Passagiere benötigt. Bei detaillierter Betrachtung des Verkehrsleistungslastgangs haben das Wetter, Großveranstaltungen oder Ferien Auswirkung auf die lokale Mobilitätsnachfrage. Ereignisse dieser Art sind schlecht vorhersehbar, kön-

nen im Eintrittsfall jedoch schwerwiegend sein. Zukünftige Arbeiten zu Serviceagenten und MOZ können den kritischen Grad der Beeinflussung des vorgestellten Modells durch externe Ereignisse untersuchen.

Einen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse hat die Filterung der Eingangsdaten zum Erhalt des Einsatzanforderungsprofils. Für das repräsentative Abbild des Bewegungsprofils in Kernstädten wurden dem Ausgangsdatensatz mehr als 97 % der Einträge entnommen. Durch diese Entnahme steigt die Ausreißerempfindlichkeit der gefilterten Datenbasis, die nur noch 3 % der ursprünglichen Daten enthält. Bedingt durch das Erhebungsdesign der MID haben die Matrizen für das Wegeprofil einen sehr hohen Anteil an leeren Positionen. Beispielsweise liegt die Einsatzanforderung des MIV verteilt in einer dreidimensionalen Matrix mit vier Sitzplatzkategorien, 96 Stundenquartalen und 100 Distanzkategorien. Dies entspricht 38400 Positionen. Tatsächlich besetzen die 23001 Fahrten nur 1490 dieser Positionen. Alle anderen Einträge sind null. Der Autor nimmt an, dass sich die zunehmende Verfügbarkeit georeferenzierter Daten der Bevölkerung positiv auf die Größe des Datensatzes einer Folgestudie auswirkt.

6.2.3 Bewegung im Verkehrsraum

Als dritter Modellteil werden die Fahrtmodellierung und das Phasenmodell für die einzelnen Einsätze diskutiert. Um in allen Bereichen der Systemplattform quantitative Aussagen zum Betrieb treffen zu können, stellt die Standardisierung des Verhaltensmusters der Serviceagenten mit den vier Phasen für die vorliegende Arbeit eine angemessene Lösung dar. Grundsätzlich ist die pauschal einkalkulierte Transferzeit das Betriebsrisiko des Mobilitätsdienstleisters und variiert mit der Stadt und der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Passagiere. Damit einhergehend ist die Kalibrierung des Verkehrssystems an der Stadt Berlin und die lokale Verteilung von zulässigen Geschwindigkeiten innerhalb dieses Stadtgebiets eine Einschränkung.

Aus der Aufteilung einer Durchschnittsgeschwindigkeit in Blöcke konstanter Fahrt resultiert ein unterbestimmtes lineares Gleichungssystem. Aus dem Lösungsraum, welcher durch die variablen Geschwindigkeitsanteile aufgespannt wird, stellt die in Abbildung 3.27 vorgestellte Lösung eine mögliche, aber nicht die optimale Lösung dar. Die zur Lösung benötigten Nebenbedingungen sind Charakteristika des untersuchten Straßenverkehrsraums und damit stadtspezifisch. Beispielsweise gilt für 72 % des 5 200 km langen Straßennetzes von Berlin eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h [67]. Die verwendeten Geschwindigkeitsprofile sehen einen zunehmenden Anteil von Geschwindigkeiten über 50 km/h bei längeren Einsätzen vor. Das Beispiel Berlin zeigt, dass auch lange innerstädtische Distanzen von 20 km und mehr auftreten können, bei denen die zulässige Geschwindigkeit 50 km/h nicht übersteigt. Der Autor nimmt daher an, dass die Durchschnittsgeschwindigkeit kürzerer Distanzen in kleineren Städten höher ist. Diesem Umstand wurde in der Modellierung durch eine größere Spreizung der Durchschnittsgeschwindigkeit Rechnung getragen.

Mit dem in Abschnitt 3.3.2 vorgestellten Verfahren zum Erhalt von Geschwindigkeitsprofilen wird konservativ das derzeitige Verkehrsmuster des städtischen MIV übernommen. Dies umfasst die Steuerung durch Lichtsignalanlagen und die für einen konkreten Straßenabschnitt und einen Zeitpunkt definierte zulässige Höchstgeschwindigkeit. Die gleichzeitige Unterteilung eines Straßenabschnittes für Teilnehmer verschiedener Geschwindigkeitsniveaus (z. B. als produktpolitische Maßnahme eines Mobilitätsanbieters) oder vollständige betriebliche Autonomie im Straßenverkehr ohne Lichtsignalanlagen werden durch das Modell nicht abgebildet. Außerdem entspricht die Annahme, dass einzelne Streckenstücke bei konstant gleicher Verkehrsflussgeschwindigkeit zurückgelegt werden, nicht der Realität. Auch bei autonomen Betriebsmustern der Serviceagenten werden Beschleunigungen und Abbremsen eine spezifische Energiekonsumkurve erzeugen. Wird die Fahrtmodellierung abschließend ganzheitlich betrachtet, kann folgendes festgestellt werden: Die Fahrtdauer für eine bestimmte

Distanz innerhalb eines Stundenquartals variiert ausschließlich durch die Verluste durch die Routenwahl $l_{ext_s}(p)$. Grundsätzlich ist für jede Distanz jedoch nur genau ein Streckenschlüssel vorgesehen, aus welchem die gleiche Energiemenge resultiert. Die Energiemenge ist damit im vorgestellten Modell unabhängig von der Transportdauer.

6.2.4 Höhe und Verwendung des Restkapitals

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht bleibt es zu untersuchen, ob die für den Betrieb benötigten infrastrukturellen Komponenten durch das Restkapital mit Betriebsüberschuss abgebildet werden können. Dies umfasst beispielsweise die MOZ mit Baugrund, Gebäude, Betrieb, benötigtes Personal, die Flotteninstandhaltung und die Komponenten für autonomes Fahren sowie die Telematik im Verkehrsraum. Erste Ansätze zur Kostenschätzung der benötigten Komponenten finden sich in [25]. Um Serviceagenten neben dem MIV ferner auch gegenüber dem ÖPNV in Preisparität zu platzieren, wird ein Nutzersegment-spezifischer Modellzuschnitt mit präziserer Untersuchung der Zahlungsbereitschaft benötigt.

6.2.5 Emissionsvermeidung in Kernstädten

Diesen Abschnitt abschließend, werden die Resultate zur Emissionsvermeidung in Kernstädten diskutiert. Insgesamt können mit dem Betriebsmodell 48 % der im Nahverkehr von Kernstädten entstehenden CO₂-Emissionen vermieden werden. Die verbleibenden 52 % entstehen durch Verkehrsleistungen, die mit den gewählten Randbedingungen durch das Modell nicht substituiert werden. Grundlage für diesen Prozentwert ist, dass die jährliche Verkehrsleistung des MIV-Nahverkehrs nach Abschnitt 2.2 mit 856 Mrd. Pkm angesetzt wird. Dieser Wert ist das Resultat der Definition, dass der MIV-Nahverkehr der Gesamtverkehrsleistung des MIV entspricht, abzüglich der nach [34] klassifizierten Wege mit dem Zweck *Urlaub*. Da in der Referenzverkehrszelle die Verkehrsleistung des MIV für Distanzen

bis 50 km vollständig substituiert wird, nimmt der Autor an, dass die tatsächliche Verkehrsleistung des MIV-Nahverkehrs in Deutschland erheblich geringer ist. Diese Überlegung wird durch eine nähere Betrachtung der vorgenommenen Stufung in der Referenzverkehrszelle bekräftigt. Die Stufung auf Distanzen bis 50 km wurde durchgeführt, um den Anteil des Nahverkehr am gesamten Personenverkehr bis 100 km herauszustellen. Durch diese Stufung entfallen 13,7 % der Verkehrsleistung des MIV (vgl. Abschnitt 4.6.1). Diese Verkehrsleistung resultiert jedoch aus weniger als 2 % der Wege. Das Vernachlässigen einer scheinbar nur geringen Wegezanzahl zwischen 50 km und 100 km hat damit große Bedeutung für die Verkehrsleistung. Zusammengefasst zeigt die große Menge der durch das Modell nicht erreichten Emissionen, dass die Abgrenzung des MIV-Nahverkehrs zu weiträumig ist. Die gewählte Definition für den MIV-Nahverkehr und die Festlegung von 100 km Grenzdistanz stimmen nicht überein. Dieses Ergebnis unterstreicht die Bedeutung von Pkw und deren Verkehrsleistung auch im Mittel- und Fernstreckenverkehr. Um in folgenden Arbeiten hohe Prozentsätze der MIV-Verkehrsleistung zu erreichen, ist eine Modellerweiterung auf größere Distanzen und eine Anpassung der Geschwindigkeitsprofile notwendig.

6.3 Ausblick

6.3.1 Serviceagenten als Baustein der Energiewende

Das Betriebsmodell von Serviceagenten stellt einen Teilbereich einer ablauforganisatorisch durchdachten *Energiewende* dar. Zur detaillierten Beobachtung der Energiewende wurde von der Deutschen Bundesregierung der Überwachungsprozess *Energie der Zukunft* initiiert. Für die regelmäßigen Berichte sind für fünf verschiedene Dimensionen des Transformationsprozesses je zwei Leitindikatoren vorgeschlagen [72]. Abbildung 6.1 gibt eine Übersicht und ermöglicht das Einordnen der vorliegenden Arbeit in

diesen Kontext. Hervorgehoben sind Leitindikatoren, bei welchen der Autor eine positive Veränderung durch Serviceagenten annimmt.

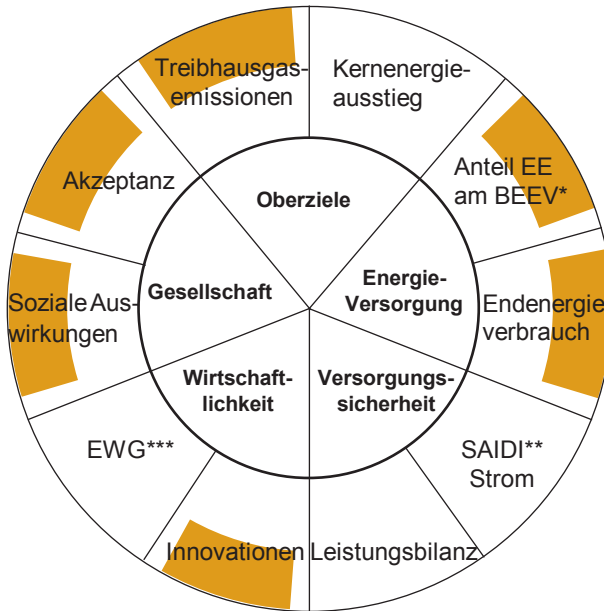


Abbildung 6.1: Leitindikatoren für die Beobachtung der Energiewende (äußerer Ring). Markiert sind die Einflusskategorien dieser Arbeit. *Bruttoendenergieverbrauch, **System Average Interruption Duration Index, ***Energiewirtschaftliche Gesamtrechnung. Quelle: [72].

Durch die Verwendung von ausschließlich erneuerbarer Energie im Nahverkehrssektor wird der Anteil am Bruttoendenergieverbrauch steigen. Gleichzeitig sinkt der Endenergieverbrauch im Sektor Verkehr und als Oberziel sinken die Treibhausgasemissionen. Die systematische Integration von Agenten in den städtischen Nahverkehr ist gegenüber herkömmlichen Verkehrsmitteln eine Innovation und schafft durch die Anforderungen an Fahrzeuge und Infrastruktur eine weitergehende Nachfrage nach innovativen Lösungen. Ein integratives Mobilitätskonzept, welches einerseits

umweltgerecht ist, andererseits auch die Teile der Bevölkerung erreicht, die heutzutage von der Nutzung ausgeschlossen sind, führt zu einer verbesserten Ressourcenallokation und erhöht damit das Maß an ökonomischer Wohlfahrt in der Gesellschaft. Heute ausgeschlossene Personen des Individualverkehrs sind Kinder, körperlich eingeschränkte oder ältere Menschen. Für diese Gruppen stellen Serviceagenten eine Form der sozialen Mobilität dar. Gleichzeitig sind Serviceagenten für alle Bevölkerungssegmente ein sichtbares Transformationselement der Energie- und Mobilitätswende, so dass die Akzeptanz in der Bevölkerung positiv beeinflusst werden kann.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass vier von fünf Dimensionen der Energiewende mit mindestens je einem zugeordneten Leitindikator mit dem vorgestellten Ansatz beeinflusst werden können.

6.3.2 Stadtplanung: Verkehrsflächen und Verkehrsmittel

Hinsichtlich der Dimensionierung von Verkehrszellen, über den in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz der Referenzzelle hinaus, besteht weiterer Forschungsbedarf. Lokale städtische Bebauungsstrukturen und das Maß der Urbanisierung beeinflussen die Verkehrsleistung in einem Gebiet. Im Rahmen einer ganzheitlichen Analyse städtischer Charakteristika könnte die Verkehrszelle effizienter im Hinblick auf die Anforderungen zugeschnitten werden. Seitens der Forschung fehlen bisher Kennziffern, welche die Verkehrsleistung eines Gebiets durch standardisierte, raumparametrische Untersuchungen berechenbar machen. Anhand dieser Kennziffern könnte das Geschäftspotential einer Verkehrszelle ermittelt werden. Neben der Substitution des MIV-Nahverkehrs zeigen die Ergebnisse ebenso Potential zur Substitution des ÖPNV. Grundsätzlich steht in der vorliegenden Arbeit die allgemeine Betrachtung und produktionstechnische Bearbeitung der Mobilitätsanforderung eines Zielgebietes im Vordergrund. Es kann jedoch nicht beantwortet werden, ob die aktuelle Kapazität des Straßenverkehrsystems ausreichend ist, auch vollständig die Verkehrsleistung des ÖPNV

aufzunehmen. Folgende Untersuchungen könnten daher die Auslastung des Verkehrsraums durch Serviceagenten aufgreifen. Diese Fragestellung berührt die Verkehrsflächenplanung zukünftiger Städte. Als Anreizsystem zur Verkehrslenkung könnten von Serviceagenten befahrene Streckenstücke mit Einordnung in die gesamt geplante Route individuell nach Tageszeit, Flächenauslastung und momentaner Verkehrsdichte bepreist werden.

Ogleich in der vorliegenden Arbeit ein umweltorientiertes Mobilitätskonzept vorgestellt wird, geht der Autor nicht davon aus, dass dieses die Nachfrage nach Fußwegen, Fahrrädern oder Pedelecs verdrängen wird. Vor allem die Einfachheit, die geringen Kosten und die relativ große infrastrukturelle Unabhängigkeit lassen vermuten, dass die Beliebtheit von Fahrrädern weltweit weiter wachsen wird. Erfolgt keine räumliche Trennung der Verkehrsflächen, kann dies eine erhebliche Einschränkung für den Verkehr von Serviceagenten darstellen.

6.3.3 Akzeptanz von Serviceagenten

Das vorgestellte Mobilitätskonzept mit Serviceagenten erweitert den Gedanken des Individualverkehrs. Dabei bleibt die Fragestellung der Akzeptanz des autonomen Fahrens in der Masse der Bevölkerung („Car-is-King“-Szenario) unbeantwortet. Das vorgestellte Gesamtsystem basiert auf einem rationalen Ansatz und einer ökologisch orientierten Grundeinstellung. Das eigene Automobil aufzugeben, dessen Kauf eine emotionale und damit irrationale Komponente beinhaltet, ist in allen gesellschaftlichen Schichten eine besondere Herausforderung. Weltweit existiert ein hohes Maß an Selbstdarstellung des eigenen Lebensstils durch Konsumgüter und Fahrzeuge. Die Bereitschaft zur Aufgabe der individuellen Mobilität, bei welcher jede Person eigenmächtig entscheidet wann, an welchem Ort und für wie lange Bewegung stattfindet, kann nur durch eine individuell wahrgenommene Verbesserung der persönlichen Transportsituation erreicht werden. Bisher ist der Einstieg des Passagiers mit Phase II als technisch not-

wendiger Teil der Beförderung formuliert. Eine Erweiterung davon wäre, dass sich der Agent durch individualisierte Software-Einstellungen temporär an den Passagier anpasst. Neben dem eigentlichen, autonom ablaufenden Transport erhält der Passagier die Möglichkeit, spezifischen Bedürfnissen durch zugeschnittene Funktionalität im Fahrzeug nachzukommen.

Gegenüber der Orientierung an einer Herstellermarke von Serviceagenten steht die Dienstleistungsqualität und das auf die Bedürfnisse des Passagiers zugeschnittene Angebot des Mobilitätsanbieters im Vordergrund. Der Betrieb von Serviceagenten würde damit Merkmale ähnlich der aktuellen Situation im Luftverkehr aufweisen, in welcher der Flottenbetreiber und nicht der Flugzeughersteller gegenüber dem Kunden als Reisepartner auftritt.

Persönliche und spontane Anforderungen, wie ein durch einen Passagier erst während der Beförderung geändertes Fahrtziel, werden in dieser Ausarbeitung nicht berücksichtigt. Ferner existiert keine landesspezifische Bedarfsanalyse oder Konkretisierung des Stadttyps. Das Modell verallgemeinert damit die Bedürfnisse der Menschen. Es ist unwahrscheinlich, dass der Querschnitt der Bevölkerung mit nur einem preisgünstigen Serviceagenten erreicht wird. Dies umfasst insbesondere diejenigen Kundensegmente, welche aus Gründen des Komforts oder auch des Alleinstellungsmerkmals kein Interesse an dauerhaft gemeinsam genutzten Serviceagenten haben. Ferner nimmt der Autor an, dass es keinen „Weltprodukt“-Serviceagenten geben wird, sondern dass die Fahrzeuge und die Betriebsstrategien beispielsweise nach Platzangebot, Art der transportierten Güter, Hygiene und Komfort spezifiziert werden müssen. Folgende Arbeiten sollten sich daher auf diese Produktdiversifikation konzentrieren.

6.3.4 Serviceagenten im wirtschaftlichen Kreislauf

Insbesondere in den wachstumsorientierten, westlichen Konsumgesellschaften erreichen oft minderwertige Produkte den Markt, ohne dass negative externe Effekte der Wertschöpfungskette Berücksichtigung finden. Die dau-

erhaft revitalisierende und Märkte vertikal weiterentwickelnde Komponente ist dabei das Design der Produktlaufzeit und der benötigte Ersatz durch den Käufer. Durch die Vernetzung auf Basis des Internets, resultierend in höheren Produktzugriffsgeschwindigkeiten, sinkenden Markteintrittsbarrieren und ubiquitären Marktplätzen, wird das Inverkehrbringen minder qualitativer Produkte zunehmend vereinfacht. Die Internalisierung der daraus von der Gesellschaft zu tragenden monetären und nicht-monetären Kosten ist produktspezifisch und noch am Anfang der Entwicklung. Fraglich ist daher, welches Produktdesign Serviceagenten besitzen müssen, um nicht nur im Betrieb, sondern auch in der Herstellung den Anspruch an ein umweltorientiertes Nahverkehrsmittel zu erfüllen. Die Tauglichkeit als Massenverkehrsmittel mit hohen Laufleistungen erfordert ein anderes Design als heutige Pkw. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz, die Kostenstruktur von Serviceagenten auf Basis aktueller Pkw zu erstellen, stellt die einzige Möglichkeit einer wissenschaftlichen Näherung zu diesem Teilaspekt dar.

In der Ökonomie des Teilens sinkt durch die Aufteilung auf mehrere Personen der Beitrag des Einzelnen zur Refinanzierung eines höherwertigen Produkts. Als Ausblick sollten Serviceagenten daher ganzheitlich wertschöpfungsorientierte Transporteinheiten darstellen. Neben der lokalen Emissionsvermeidung hätte dies positive Auswirkung auf die Emissionsbilanz der Vorkette, den Materialeinsatz, technische Innovationszyklen in der Herstellung und das Ausscheiden nach der aktiven Produktnutzung. Serviceagenten haben als Neukonzeption den Raum, hochwertige und im ökologischen Gesamtsystem *neutrale* Verkehrsmittel zu werden. Die resultierenden Marktmechanismen durch veränderte Produktlebenszyklen oder ökologisch orientierten Materialeinsatz in der Fahrzeugindustrie sind nicht absehbar, können jedoch fundamentale Auswirkungen auf die vorgestellte Kostenstruktur von Serviceagenten haben.

Heutzutage wird ökologisches Bewusstsein vielmals mit einer „Strategie der Vermeidung“ und Ressourcenschonung gleichgesetzt. Aus den in der vorliegenden Arbeit aufgezeigten vielfältigen Schwächen des derzei-

tigen Straßenverkehrssystem erwächst ein Rechtfertigungsdruck für den Wunsch nach individueller und motorisierter Fortbewegung. Die positiven Resultate der vorliegenden Arbeit, vor allem die Planbarkeit der elektrischen Last zur ausschließlichen Versorgung mit erneuerbarer Energie, zeigen, dass auch der Straßenverkehr das Potential hat, als Element eines ausbalancierten menschlichen Wirtschaftens mit den natürlichen Ressourcen entwickelt zu werden. Hinsichtlich einer tatsächlichen Realisierung von ökologisch orientierten, komfortablen Serviceagenten in Städten wird diese Arbeit mit einem chinesischen Sprichwort beendet:

– Die eine Generation baut die Straße, auf der die nächste fährt. –

Anhang

A.1 Bausteine der Struktogramme

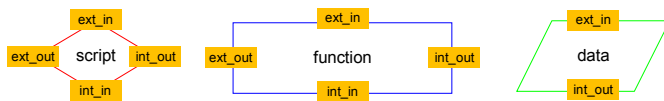


Abbildung A.1.1: Belegungsplan der Bausteine zur Modellbeschreibung des erstellten Modells in Matlab[®].

A.2 Struktogramm der Fahrtmodellierung

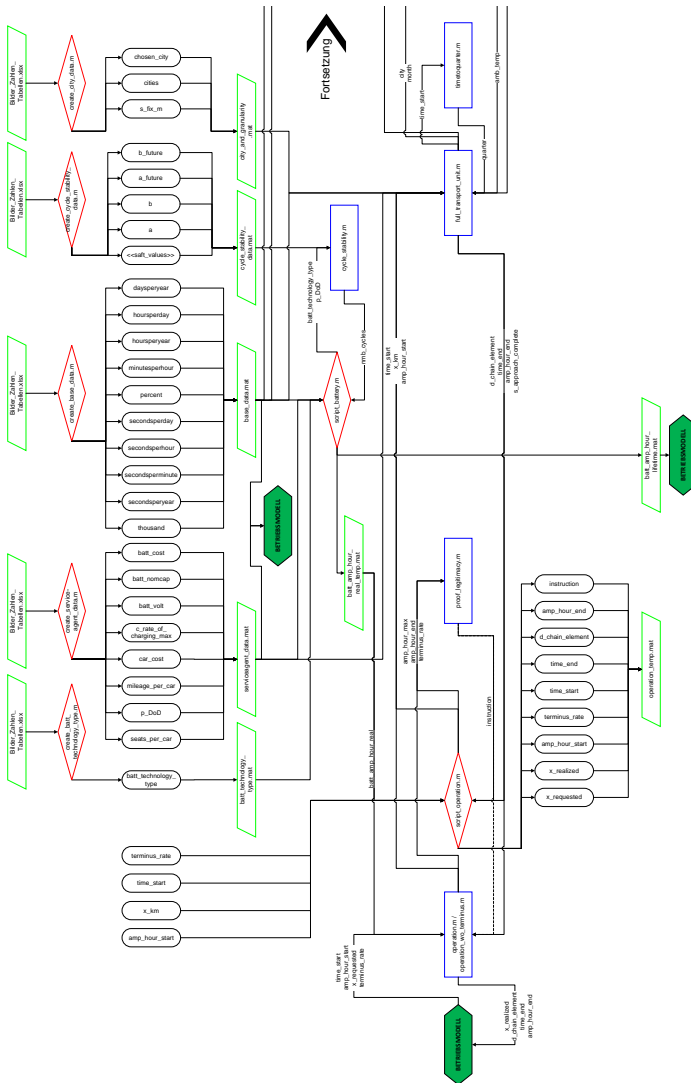


Abbildung A.2.1: Modellierung der Fahrten (1/2).

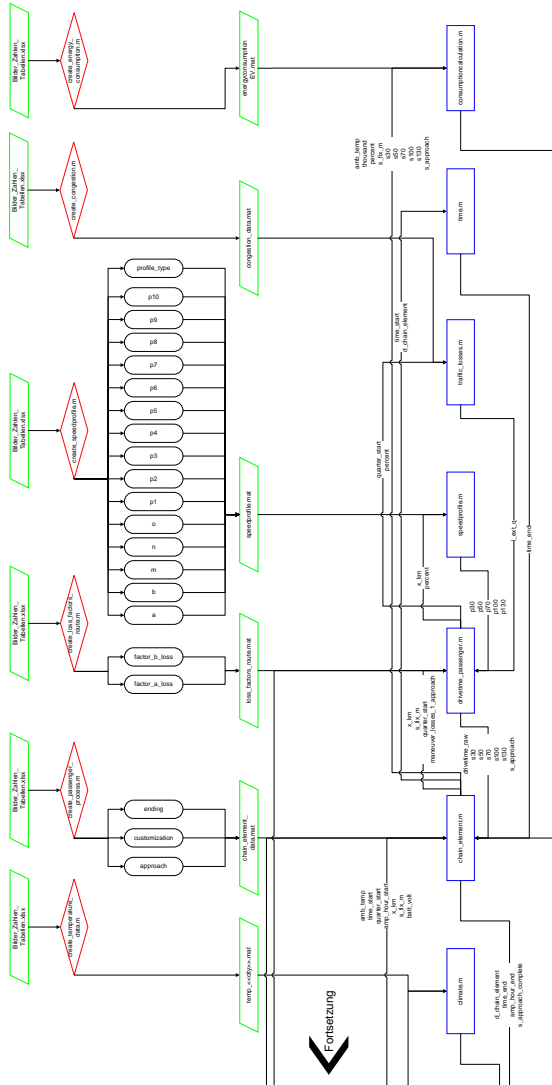


Abbildung A.2.2: Modellierung der Fahrten (2/2).

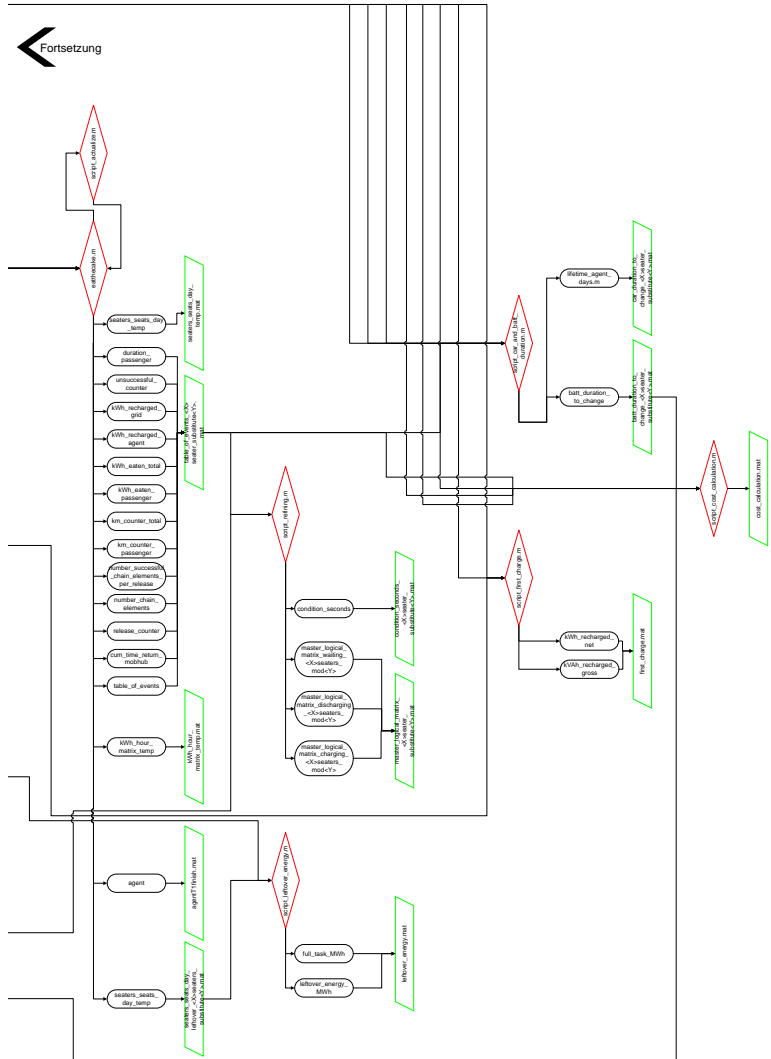


Abbildung A.4.2: Betriebsmodell für die Kategorien der Systemplattform (2/2).

A.5 Variablen des MID-Wegedatensatzes

Nummer	Variablenname	Beschreibung
1	wid	Primärschlüssel: Wegeart
2	wsid	Sortierte Wege-Identifikation
3	w_gew	Wegespezifischer Gewichtungsfaktor
4	stich_m	Monat des Stichtags
5	stichtag	Wochentag des Stichtags
6	stichwo	Kalenderwoche des Stichtags
7	saison	Jahreszeit des Stichtags
8	st_time	Uhrzeit des Wegbeginns
9	en_time	Uhrzeit des Wegendes
10	st_dat	Tag des Beginn des Weges
11	en_dat	Tag des Wegeendes
12	w13	Verortung des Ziels
13	hvm	Hauptverkehrsmittel des Weges
14	w07	Anzahl an Wegbegleitern
15	wegkm_k	Distanz [km]
16	wegmin_k	korrigierte Wegedauer [min]
17	hp_alter	Alter der Person
18	lebensph	Lebensphase der Person
29	bland	Bundesland
20	rtyp	Regionsgrundtyp
21	ktyp_zsg	Kreistyp (Raumordnungsbericht 2005)

Tabelle A.5.1: Benötigte Variablen des Wegedatensatzes der Studie „Mobilität in Deutschland 2008“. Quelle: [58].

A.6 Regionstypen

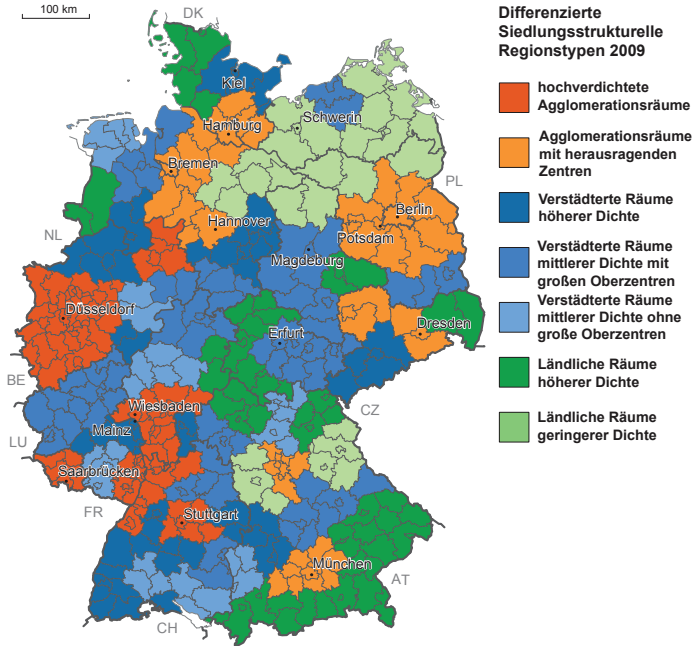


Abbildung A.6.1: Differenzierte siedlungsstrukturelle Regionstypen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Quelle: [22].

A.7 Wegedauer in Kernstädten

Die Häufigkeitsverteilung der Wegedauern an einem Freitag in Kernstädten und Agglomerationsräumen in Abbildung A.7.1 zeigt deutlich die empfundene verstrichene Zeit der befragten Personen. Übliche Angaben des Sprachgebrauchs wie 5 min, 10 min oder 30 min und 45 min sind überproportional vertreten.

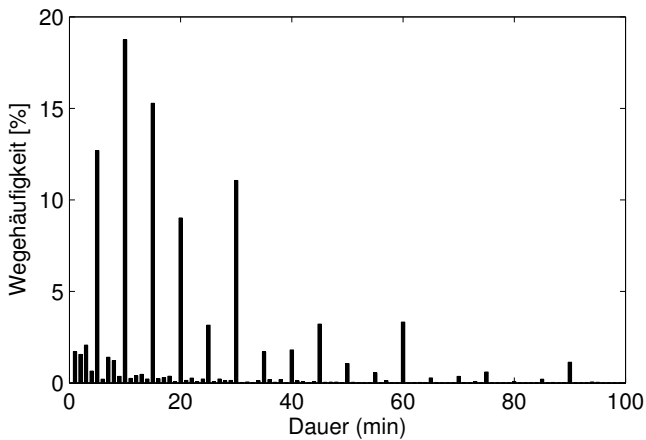


Abbildung A.7.1: Wegedauer an einem Freitag im städtischen Zuschnitt. Quelle: Auswertung von [58].

A.8 Fehler durch Berechnung der Sitzplatzanzahl

Die Ermittlung der benötigten Fahrzeuge (Sitzplätze) zur Substitution einer Modalität innerhalb eines Quartals basiert auf dem gesamten Verkehrsaufkommen der Modalität nach MID in diesem Zeitschritt. Da nicht jede Personengruppe für jede Distanz ohne Rest auf die vier untersuchten Fahrzeugkategorien aufgeteilt werden kann, entsteht durch die Zerlegung der Wegezanzahl in die vier Sitzplatzkategorien ein geringer Fehler. Beispielsweise werden im Zeitraum 12:45–13:00 ($q = 52$) 23 Wege der Kategorie drei Personen und 43 Wege der Kategorie vier Personen angefordert. Für die Modellierung werden diese Werte zu 24 und 44 aufgerundet, entsprechend 8 dreisitzigen Serviceagenten und 11 Viersitzern. In den Abbildungen A.8.1 bis A.8.4 ist dieser Fehler für die einzelnen Modalitäten abgebildet.

Für die Beurteilung wird einerseits die Abweichung der Summe der Sitzplätze ohne nachträgliche Korrektur zum Gesamtverkehrsaufkommen der Modalität herangezogen. Zum Anderen ist die Summe der Sitzplätze nach Korrektur zur vollständigen Aufteilung auf die verfügbaren Sitzplatzkategorien gegenüber der Gesamtwegezanzahl dargestellt. Es ist ersichtlich, dass in prozentualer Betrachtung für die einzelnen Quartale teilweise hohe Abweichungen gegenüber der kalkulatorischen Anzahl an Gesamtwegen der Modalität entstehen. Insbesondere für die Modalitäten Fuß, Rad und ÖPNV liegen die Werte an den Randstunden des Tages vereinzelt zwischen 50 % und 70 %. Dies ist darauf zurück zu führen, dass in diesen Quartalen eine sehr geringe Wegezanzahl vorliegt, für welche die Zerlegung und anschließende Anpassung der Werte zwar eine hohe relative Veränderung ergibt, aber nur eine geringe absolute Bedeutung hat. Summiert über alle Stundenquartale liegt der Fehler nach Korrektur für keine Modalität höher als 4 %. Aufgrund der großen Wegezanzahl des MIV liegt der Fehler bei dieser Modalität unter 2 %.

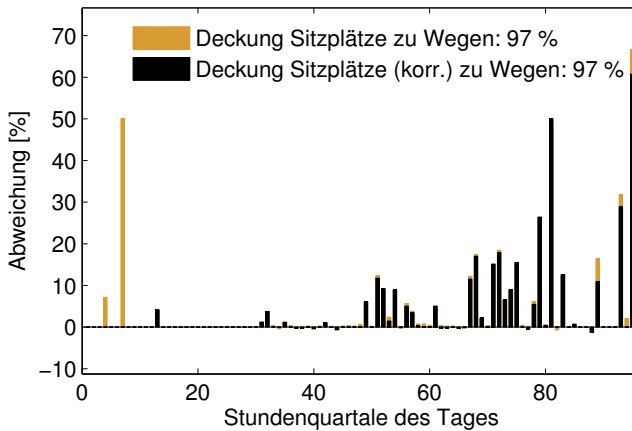


Abbildung A.8.1: Fehler durch Kalkulation der Sitzplatzanzahl gegenüber der gesamten Anzahl an Wegen für die Modalität Fußgänger. Quelle: Auswertung von [58].

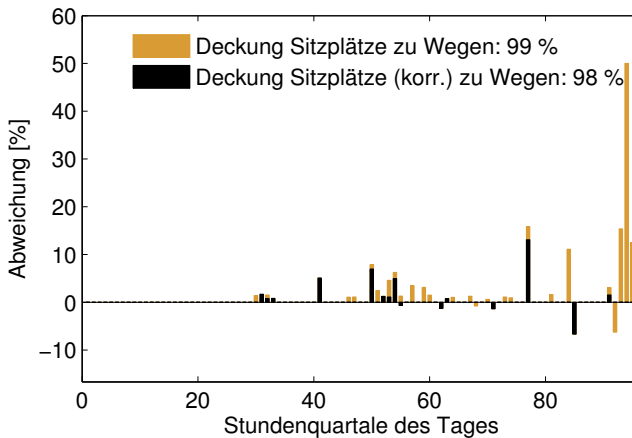


Abbildung A.8.2: Fehler durch Kalkulation der Sitzplatzanzahl gegenüber der gesamten Anzahl an Wegen für die Modalität Radfahrer. Quelle: Auswertung von [58].

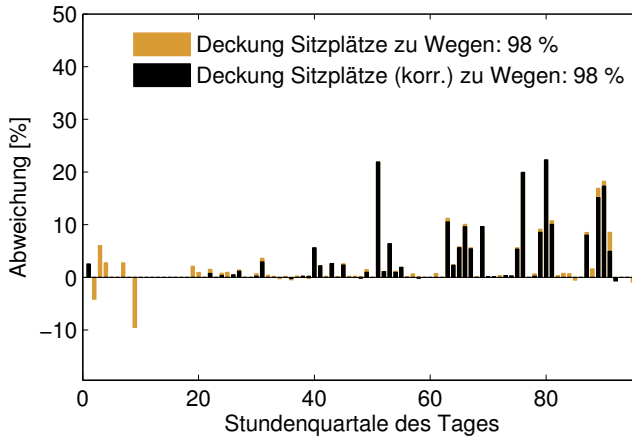


Abbildung A.8.3: Fehler durch Kalkulation der Sitzplatzanzahl gegenüber der gesamten Anzahl an Wegen für die Modalität MIV. Quelle: Auswertung von [58].

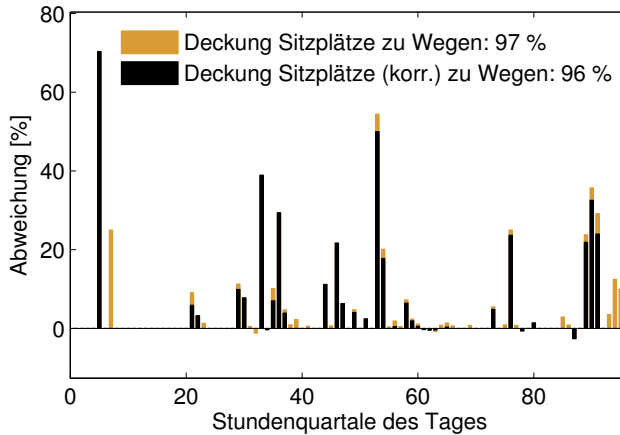


Abbildung A.8.4: Fehler durch Kalkulation der Sitzplatzanzahl gegenüber der gesamten Anzahl an Wegen für die Modalität ÖPNV. Quelle: Auswertung von [58].

A.9 Tagesablauf der Agenten bei der Substitution von Pkw

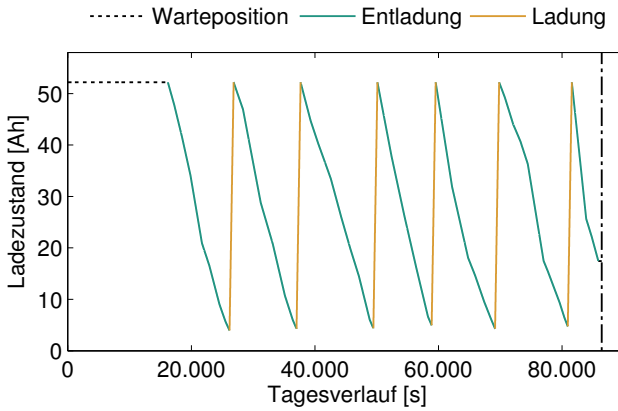


Abbildung A.9.1: Tagesablauf des 50. Einsitzer-Agenten.

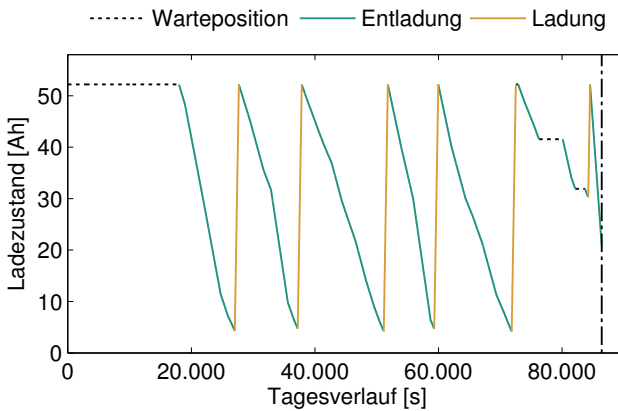


Abbildung A.9.2: Tagesablauf des 100. Einsitzer-Agenten.

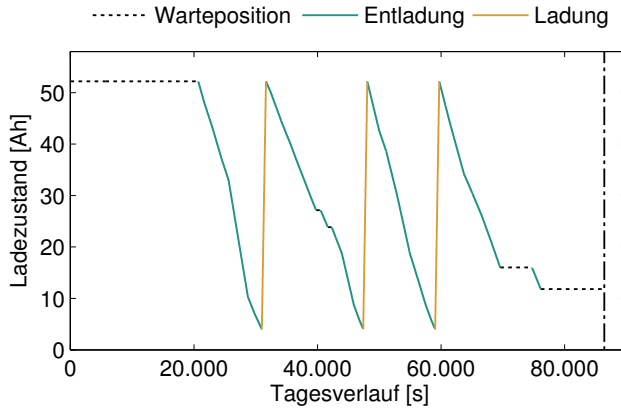


Abbildung A.9.3: Tagesablauf des 200. Einsitzer-Agenten.

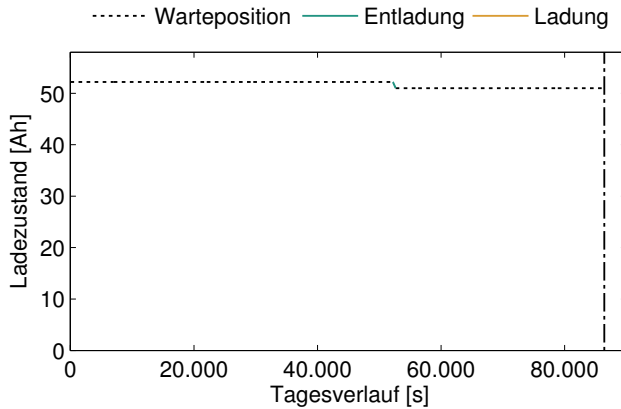


Abbildung A.9.4: Tagesablauf des 598. Einsitzer-Agenten.

A.10 Restwertanalyse im Kompaktklassesegment

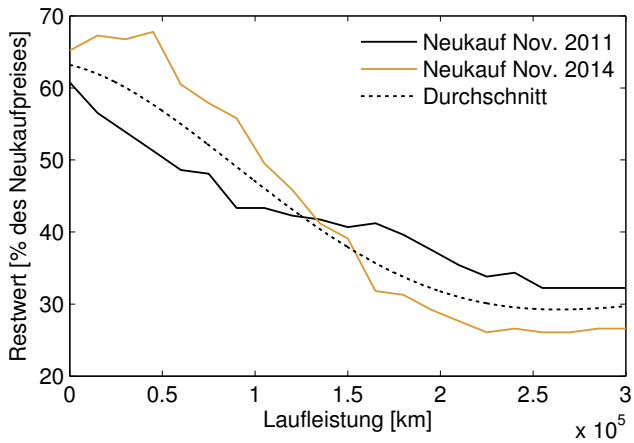


Abbildung A.10.1: Restwertentwicklung in der Pkw-Kompaktklasse in Relation zum Verkaufspreis des Neuwagens im November 2015. Quelle: Berechnung nach [12].

A.11 Substitution des öffentlichen Verkehrs

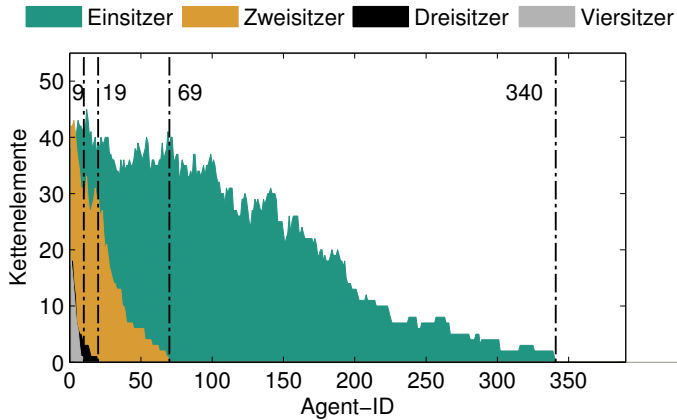


Abbildung A.11.1: Flottengröße und Anzahl der Kettenelemente der einzelnen Flottenteilnehmer in T für einen Freitag in der Referenzverkehrszelle in Karlsruhe bei Substitution des ÖPNV.

A.12 Temperaturprofile der untersuchten Städte

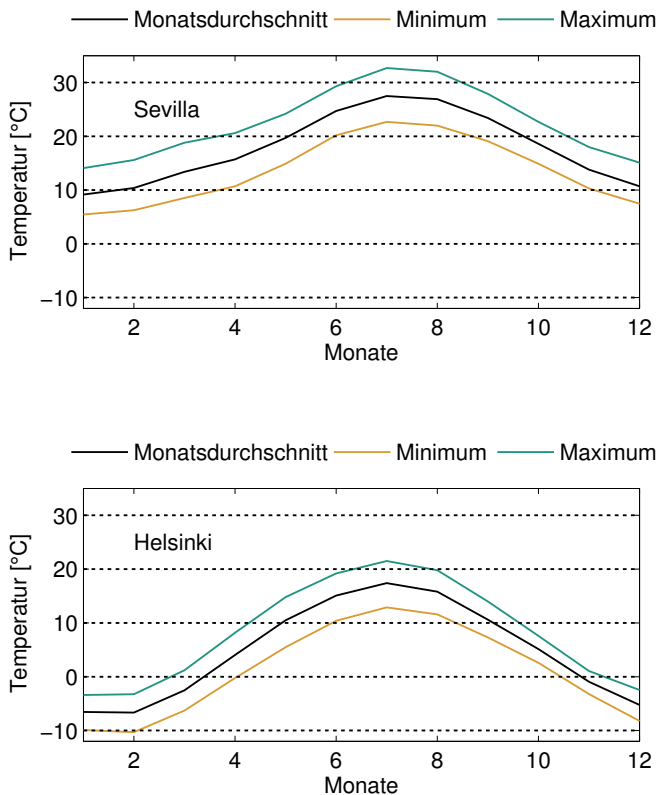


Abbildung A.12.1: Vergleich von Sevilla (37° Nord) und Helsinki (60° Nord) als europäische Städte mit erheblichem Unterschied zueinander im durchschnittlichen Temperaturprofil. Darstellung zwischen minimalem und maximalem Monatsdurchschnittswert aus 22 aufeinander folgenden Jahren. Quelle: [11].

Abbildungsverzeichnis

1.1	Anforderungen an das Gesamtsystem Straßenverkehr	4
1.2	Bestandteile und Zielsetzung der Systemplattform	6
1.3	Auswahl aktueller Servicefahrzeuge	8
2.1	Prognose der Entwicklung der Weltbevölkerung	16
2.2	Verkehrsaufkommen und -leistung im Personenverkehr	18
2.3	Verkehrsleistung in den Lebenszyklusgruppen	19
2.4	Auslastung der derzeitigen Pkw-Flotte	26
2.5	Verkehrsfläche pro Person im fließenden Verkehr	30
3.1	Stufen der Modellierung	39
3.2	Elemente des Gesamtsystems Serviceagent	41
3.3	Einsatzgebiet von Serviceagenten im Personenverkehr	42
3.4	Durchschnittliche Fahrleistungen im MIV	42
3.5	Betriebsablauf von Serviceagenten	43
3.6	Auslastung von Serviceagenten	44
3.7	Zyklusfestigkeit des elektrischen Speichers	48
3.8	Bestimmung der Ladeleistung einer Batterie	50
3.9	Mobilitätsparameter zur Substitution eines Verkehrsmittels	60
3.10	Werteerfassung für eine Distanz in einer Verkehrszelle	61
3.11	Jährliches Verkehrsaufkommen in Deutschland	64
3.12	Jährliche Verkehrsleistung in Deutschland	65
3.13	Verteilung der Startzeiten der Wege	66
3.14	Einsatz der Verkehrsmittel in der Verkehrszelle	67
3.15	Distanzen der in Städten nachgefragten Wege	68

3.16	Indizierung der Wegedaten im Zeitraster	69
3.17	Wegeprofil der Referenzverkehrszelle	72
3.18	Distanzverteilungen der Verkehrsmittel im Vergleich	73
3.19	Beispiel für die Distanzverteilungen des MIV	74
3.20	Verteilung der Sitzplatzkategorien	76
3.21	Beispiel der Einsatzanforderung an Serviceagenten	77
3.22	Ablauf des Einsatzes eines Serviceagenten	82
3.23	Nomenklatur des Phasenmodells	83
3.24	Partitionierung einer Distanz im Verkehrsraster	84
3.25	Beispiel für das Phasenmodell	86
3.26	Fahrtzeitverlängerung durch Verkehrsdichte	88
3.27	Geschwindigkeitsprofile bei freier Fahrt	89
3.28	Durchschnittsgeschwindigkeit von Serviceagenten	90
3.29	Temperaturprofil für Karlsruhe	95
3.30	Schnittstelle von elektrischem Netz und Verkehrsnetz	97
3.31	Autonomer Betriebsprozess eines Serviceagenten	99
3.32	Wegekette eines Serviceagenten in einem Einsatzgebiet	100
3.33	Routine des Betriebsmodells	103
4.1	Anforderungsprofil zur Substitution des MIV	109
4.2	Anzahl der Einsätze im Zeitraster	110
4.3	Tagesablauf des Referenzagenten	112
4.4	Tagesablauf des 300. Einsitzer-Agenten	114
4.5	Flottengröße und Anzahl der Kettenelemente: MIV	116
4.6	Energiebedarf der Agenten	118
4.7	Zustandsverteilung der Einsitzer-Flotte	120
4.8	Anschlussleistungsprofil der Mobilitätszentrale	123
4.9	Nicht erfüllte Einsätze in der Referenzverkehrszelle	127
4.10	Fahrleistung und Verkehrsleistung der Flotten	129
4.11	Fahr- und Verkehrsleistung der Einsitzer-Flotte	133
4.12	Auslastung der Einsitzer-Flotte	134

4.13	Auslastung der gesamten Flotte	135
4.14	Fahrverbrauch von Serviceagenten	137
4.15	Lebensdauer der Agenten und elektrischen Speicher	138
4.16	Sensitivität: Flottengröße zu Energieinhalt	144
4.17	Sensitivität: Restkapital zu Energiekosten und Einsatzpreis	147
6.1	Leitindikatoren für die Beobachtung der Energiewende	163
A.1.1	Bausteine zur Modellbeschreibung	169
A.2.1	Modellierung der Fahrten (1/2)	170
A.2.2	Modellierung der Fahrten (2/2)	171
A.3.1	Modellierung des Einsatzanforderungsprofils (1/2)	172
A.3.2	Modellierung des Einsatzanforderungsprofils (2/2)	173
A.4.1	Betriebsmodell (1/2)	174
A.4.2	Betriebsmodell (2/2)	175
A.6.1	Regionstypen	177
A.7.1	Wegedauer an einem Freitag in Städten	178
A.8.1	Fehler durch Kalkulation der Sitzplatzanzahl: Fußgänger	180
A.8.2	Fehler durch Kalkulation der Sitzplatzanzahl: Radfahrer	180
A.8.3	Fehler durch Kalkulation der Sitzplatzanzahl: MIV	181
A.8.4	Fehler durch Kalkulation der Sitzplatzanzahl: ÖPNV	181
A.9.1	Tagesablauf des 50. Agenten	182
A.9.2	Tagesablauf des 100. Agenten	182
A.9.3	Tagesablauf des 200. Agenten	183
A.9.4	Tagesablauf des 598. Agenten	183
A.10.1	Restwertentwicklung in der Pkw-Kompaktklasse	184
A.11.1	Flottengröße und Anzahl der Kettenelemente: ÖPNV	185
A.12.1	Temperaturprofile von Sevilla und Helsinki	186

Tabellenverzeichnis

2.1	Kennwerte des Taxibetriebs in Stuttgart	28
2.2	Kostenvergleich privater Pkw mit Carsharing	35
3.1	Parameter von Lithium-Ionen Energiespeichern	47
3.2	Kennwerte der Ladung eines Agenten	51
3.3	Gesamtkosten elektrischer Pkw und von Serviceagenten	54
3.4	MID: Ausgangsdatensatz und Zielzuschnitt	71
3.5	Werte der Referenzverkehrszelle	71
3.6	Die Referenzverkehrszelle in Beispielquartalen	75
3.7	Räumliche Struktur einer Referenzverkehrszelle	80
3.8	Energiekonsum eines elektrischen Pkw	92
3.9	Einfluss der Geschwindigkeit auf die Traktionsenergie	93
3.10	Festgelegte Parameter der Simulation	105
4.1	Einsatzanforderungsprofil in der Referenzverkehrszelle	108
4.2	Tagesablaufs des Referenzagenten und von Agent 300	115
4.3	Benötigte Agenten zur Vollsubstitution	117
4.4	Verteilung des Energiebedarfs nach Sitzplätzen	119
4.5	Bilanzierung des Energiebedarfs einer Mobilitätszentrale	122
4.6	Einsätze und Verkehrsleistung in der Referenzzelle	128
4.7	Emissionsvermeidung in der Referenzverkehrszelle	130
4.8	Kosten und Erlöse des Flottenbetriebs	140
4.9	Variationsalternativen für die Sensitivitätsanalyse	142
4.10	Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Flottengröße	145
A.5.1	Variablen des Wegedatensatzes der MID	176

Literaturverzeichnis

- [1] ALLGEMEINER DEUTSCHER AUTOMOBIL-CLUB E.V.: *ADAC Autokosten 2015: Kostenübersicht für über 1800 aktuelle Neuwagen-Modelle*. Version: Mai 2015. http://www.adac.de/_mmm/pdf/autokosteneuebersicht_a-d_47086.pdf, Abruf: 31.12.2016
- [2] ALLGEMEINER DEUTSCHER AUTOMOBIL-CLUB E.V.: *ADAC Autokosten-Rechner. Abfrage für den VW Golf 1.0 TSI BlueMotion Comfortline*. Version: März 2016. <https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokosten/autokosten-rechner/default.aspx>, Abruf: 31.12.2016
- [3] AMERICAN PUBLIC TRANSPORTATION ASSOCIATION ; NEFF, John (Hrsg.) ; DICKENS, Matthew (Hrsg.): *2013 Public Transportation Fact Book*. 64. Washington, DC : American Public Transportation Association, 2013
- [4] AMT FÜR STATISTIK BERLIN-BRANDENBURG: *Statistischer Bericht: Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung in Berlin 2012*. Februar 2013
- [5] ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN E.V.: *Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2011 und 2012 mit Zeitreihen von 2008 bis 2012*. November 2013
- [6] ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN E.V.: *Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2013*. Version: September 2014. <http://www.ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html>, Abruf: 31.12.2016

- [7] ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN E.V.: *Energieflussbild 2013 für die Bundesrepublik Deutschland in Petajoule*. Version: August 2014. <http://www.ag-energiebilanzen.de/9-0-Energieflussbilder.html>, Abruf: 31.12.2016
- [8] ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN E.V.: *Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2013*. März 2014
- [9] ARTHUR D. LITTLE ; UNION INTERNATIONALE DES TRANSPORTS PUBLICS (UITP): *The Future of Urban Mobility 2.0*. 2014
- [10] ATMOSPHERIC SCIENCE DATA CENTER AM NASA LANGLEY RESEARCH CENTER: *Accuracy*. Version: 2015. <https://eosweb.larc.nasa.gov/project/sse/Accuracy.pdf>, Abruf: 31.12.2016
- [11] ATMOSPHERIC SCIENCE DATA CENTER AM NASA LANGLEY RESEARCH CENTER: *Surface meteorology and Solar Energy (SSE): Data and Information*. Version: 2015. https://eosweb.larc.nasa.gov/project/sse/sse_table, Abruf: 31.12.2016
- [12] AUTOSCOOUT24 GMBH: *Fahrzeugbewertung*. Version: November 2015. <https://www.autoscout24.de/fahrzeugbewertung>, Abruf: 31.12.2016
- [13] BALMER, Michael: *Monatsberichte zum weltweiten Stand der Forschung mit MATSim*. Version: 2014. <https://matsim.atlassian.net/wiki/display/MATPUB/Report+October+2014>, Abruf: 31.12.2016
- [14] BAYERISCHE MOTORENWERKE AG: *BMW E1 Elektromobil*. Version: 1992. <https://www.bmw-konzernarchiv.de/research/detail/index.xhtml?id=993446>, Abruf: 31.12.2016
- [15] BAYERISCHE MOTORENWERKE AG: *Der neue BMW i3. Preisliste*. Version: Juli 2013. http://www.bundk.de/sites/default/files/dokumente/bmwi3_preisliste.pdf, Abruf: 31.12.2016

- [16] BERLINER VERKEHRSBETRIEBE: *Meine Stadt. Meine BVG. Geschäftsbericht 2013*. April 2014
- [17] BERLINER VERKEHRSBETRIEBE: *Hol Dir lieber das Original. Das BVG-Abo*. Version: 2016. https://www.bvg.de/images/content/tickets/AboFlyer_Kampagne2015.pdf, Abruf: 31.12.2016
- [18] BISCHOFF, Joschka ; MACIEJEWSKI, Michal: Autonomous taxicabs in Berlin - a spatiotemporal analysis of service performance. In: *Transportation Research Procedia* Bd. 19 International Scientific Conference on Mobility and Transport Transforming Urban Mobility (mobil.TUM 2016), 2016, S. 176–186
- [19] BISCHOFF, Joschka ; MACIEJEWSKI, Michal: Simulation of City-wide Replacement of Private Cars with Autonomous Taxis in Berlin. In: *Procedia Computer Science* Bd. 83 The 7th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2016), 2016, S. 237–244
- [20] BOYTCHEV, Hristio: *Eine kommunistische Utopie des Stadtverkehrs*. Version: November 2014. <http://www.tagesspiegel.de/wissen/informatiker-ral-rojas-im-portraet-eine-kommunistische-utopie-des-stadtverkehrs/10965596.html>, Abruf: 31.12.2016
- [21] BRÜNDL, Adrian ; DEUTSCH, Nicolas ; BORNHOLDT, Martin ; RUHBAUM, Charlotte: *Branchenmonitor Energieeffizienz 2014*. Deutsche Unternehmensinitiative Energieeffizienz e.V. (DENEFF) in Zusammenarbeit mit PricewaterhouseCoopers (PWC), April 2014
- [22] BUNDESINSTITUT FÜR BAU-, STADT- UND RAUMFORSCHUNG: *Laufende Raumb Beobachtung - Raumbegrenzungen*. Version: 2009. <http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumbegrenzungen/Raumbegrenzungen/SiedlungsstrukturelleGebietstypen/Regionstypen/regionstypen.html>, Abruf: 31.12.2016

- [23] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *Zweiter Monitoring-Bericht "Energie der Zukunft"*. Version: März 2014. <https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/zweiter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>, Abruf: 31.12.2016
- [24] CENTER FOR ECONOMICS AND BUSINESS RESEARCH: *The future economic and environmental costs of gridlock in 2030: An assessment of the direct and indirect economic and environmental costs of idling in road traffic congestion to households in the UK, France, Germany and the USA*. Version: Juli 2014. [http://ibtt.org/sites/default/files/documents/MAF/Costs-of-Congestion-INRIX-Cebr-Report%20\(3\).pdf](http://ibtt.org/sites/default/files/documents/MAF/Costs-of-Congestion-INRIX-Cebr-Report%20(3).pdf), Abruf: 31.12.2016
- [25] CHEN, Tong Donna: *Management of a Shared, Autonomous, Electric Vehicle Fleet: Vehicle Choice, Charging Infrastructure & Pricing Strategies*, The University of Texas at Austin, Diss., 2015
- [26] CIRILLO, Cinzia ; AXHAUSEN, Kay W.: Evidence on the distribution of values of travel time savings from a six-week diary. In: *Transportation Research A* 40 (2006), June, Nr. 5, S. 444–457
- [27] CIVITY MANAGEMENT CONSULTANTS: *Pressemitteilung: Big-Data-Studie zum Free-Floating-Carsharing (FFC) in Städten*. Version: August 2014. www.civity.de/sites/civity/files/civity_pm_carsharing-studie.pdf, Abruf: 31.12.2016
- [28] CIVITY MANAGEMENT CONSULTANTS: *Urbane Mobilität im Umbruch? Verkehrliche und ökonomische Bedeutung des Free-Floating-Carsharing*. August 2014
- [29] DAIMLER-BENZ AKTIENGESELLSCHAFT: *The A-Class Electric Vehicle*. Version: Dezember 1997. http://www.umweltbrief.de/pdf/Mercedes_A-class_electric_zebra.pdf, Abruf: 31.12.2016

- [30] DAUENSTEINER, Alexander: *Der Weg zum Ein-Liter-Auto: Minimierung aller Fahrwiderstände mit neuen Konzepten*. Berlin : Springer, 2002. – ISBN 978–3–642–59378–9
- [31] DER TAGESSPIEGEL: *Der Raum, das kritische Gut von morgen*. Version: November 2014. <http://www.tagesspiegel.de/mobil/urbane-mobilitaet-der-zukunft-der-raum-das-kritische-gut-von-morgen/10978634.html>, Abruf: 31.12.2016
- [32] DEUTSCHER TAXI- UND MIETWAGENVERBAND E.V. (BZP): *Geschäftsbericht 2014 / 2015: Zahlen über den Taxi- und Mietwagenverkehr*. 2015
- [33] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN 62196-1 (VDE 0623 Teil 5) Stecker, Steckdosen, Fahrzeugsteckvorrichtungen und Fahrzeugstecker - Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen - Teil 1: Laden von Elektrofahrzeugen bis 250 A Wechselstrom und 400 A Gleichstrom*. 2010
- [34] DEUTSCHES INSTITUT FÜR WIRTSCHAFTSFORSCHUNG ; DVV MEDIA GROUP (Hrsg.): *Verkehr in Zahlen 2012/2013*. Bd. 41. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2012
- [35] EHANG, INC.: *EHANG184: Autonomous Aerial Vehicle (AAV)*. Version: 2016. <http://www.ehang.com/ehang184>, Abruf: 31.12.2016
- [36] ERHARD, Johannes ; REH, Werner ; TREBER, Manfred ; OELIGER, Dietmar ; RIEGER, Daniel ; MÜLLER-GÖRNERT, Michael: *Klimafreundlicher Verkehr in Deutschland - Weichenstellung bis 2050*. Verbandskonzept des WWF Deutschland, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND), Germanwatch e.V., Naturschutzbund Deutschland e.V. (NABU), Verkehrsclub Deutschland e.V. (VCD), Juni 2014
- [37] FAGNANT, Daniel ; KOCKELMAN, Kara: *Dynamic Ride-Sharing and Optimal Fleet Sizing for a System of Shared Autonomous Ve-*

- hicles. In: *Transportation Research Board 94th Annual Meeting Compendium of Papers*, 2015, S. 17
- [38] FITCH, Kent: *Canberra Autonomous Car Simulation*.
Version: 2016. <http://www.projectcomputing.com/resources/cacs/index.html>, Abruf: 31.12.2016
- [39] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN ; ARBEITSGRUPPE STRASSENENTWURF (Hrsg.): *Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen: RASt 06*. Ausgabe 2006. Köln : FGSV-Verlag, 2007 (FGSV). – ISBN 978–3–939715–21–4
- [40] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE: *Stromgestehungskosten erneuerbare Energien*. Version: November 2013. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.pdf>, Abruf: 31.12.2016
- [41] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG ISI: *Technologie-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030*. Karlsruhe : Schriftenreihe des Fraunhofer ISI, 2012
- [42] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKZEUGMASCHINEN UND UMFORMTECHNIK IWU: *IAA 2014: Leichter Lastesel für die Landwirtschaft*. Presseinformation / Fotograf: Jürgen Jeibmann, Dresden, August 2014
- [43] FRAUNHOFER INSTITUT FÜR WINDENERGIE UND ENERGIESYSTEMTECHNIK IWES: *Geschäftsmodell Energiewende: Eine Antwort auf das “Die Kosten der Energiewende“-Argument*. Kassel, Januar 2014
- [44] FREY, René ; HOCHSCHULVERLAG AG AN DER ETH ZÜRICH (Hrsg.): *Ökonomie der städtischen Mobilität: Durch Kostenwahrheit*

- zur nachhaltigen Entwicklung des Agglomerationsverkehrs. Nationales Forschungsprogramm Stadt und Verkehr, 1994
- [45] GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON: *Total Cost of Ownership*. Version: 2014. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/16735/total-cost-of-ownership-v6.html>, Abruf: 31.12.2016
- [46] GEHRKE, J. ; ROKOSSA, T. ; G., Toulemonde: *Industry Update: Used cars could make the difference*. Deutsche Bank Markets Research, 2013
- [47] GERINGER, Bernhard ; TOBER, Werner: *Batterieelektrische Fahrzeuge in der Praxis: Kosten, Reichweite, Umwelt, Komfort*. Österreichischer Verein für Kraftfahrzeugtechnik, 2012
- [48] GOOGLE INC.: *Online Kartendienst zur Navigation im Straßenverkehr*. Version: Mai 2016. <https://www.google.de/maps/>, Abruf: 31.12.2016
- [49] GREENBLATT, Jeffery ; SHAHEEN, Susan: Automated Vehicles, On-Demand Mobility, and Environmental Impacts. In: CHESTER, Mikhail (Hrsg.): *Current Sustainable/Renewable Energy Reports* Bd. 2. Springer, September 2015, S. 74–81
- [50] HACKMANN, Markus ; PYSCHNY, Hermann ; STANEK, Robert: *Total Cost of Ownership Analyse für Elektrofahrzeuge*. P3 Group und electrive.net, März 2015
- [51] HANDELSBLATT: *In Peking tritt erneut Warnstufe "Rot" in Kraft*. Version: Dezember 2015. <http://www.handelsblatt.com/panorama/aus-aller-welt/smog-alarm-in-pekings-tritt-erneut-warnstufe-rot-in-kraft/12745772.html>, Abruf: 31.12.2016
- [52] HARDER, Florian: *Straßenbenutzungsgebühren und nachhaltiger Stadtverkehr: Eine agentenbasierte Mikrosimulation*, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Diss., 2010

- [53] HAUBROCK, Andre: *Degradationsuntersuchungen von Lithium-Ionen Batterien bei deren Einsatz in Elektro- und Hybridfahrzeugen*, Technische Universität Clausthal, Diss., 2011
- [54] HEINRICH-BÖLL-STIFTUNG ; INSTITUTE FOR ADVANCED SUSTAINABILITY STUDIES ; BUND FÜR UMWELT- UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND ; LE MONDE DIPLOMATIQUE: *Bodenatlas 2015 - Daten und Fakten über Acker, Land und Erde*. 2015
- [55] ICHA, Petra: *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2013*. Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt (Hrsg.), Juli 2014 (Schriftenreihe: Climate Change 23 / 2014)
- [56] INSTITUT FÜR ANGEWANDTE SOZIALWISSENSCHAFT GMBH (INFAS) ; DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V.: *Mobilität in Deutschland 2008 - Ergebnisbericht*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2010
- [57] INSTITUT FÜR ANGEWANDTE SOZIALWISSENSCHAFT GMBH (INFAS) ; DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V.: *Mobilität in Deutschland 2008 - Nutzerhandbuch*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2010
- [58] INSTITUT FÜR ANGEWANDTE SOZIALWISSENSCHAFT GMBH (INFAS) ; DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V.: *Mobilität in Deutschland 2008 - Wegedatensatz*. 1. Ausgabe. Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2010. – Zugriff nach schriftlicher Genehmigung durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
- [59] INSTITUT FÜR ANGEWANDTE SOZIALWISSENSCHAFT GMBH (INFAS) ; DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V., INSTITUT FÜR VERKEHRSFORSCHUNG: *Mobilität in Deutschland 2008 - Webanwendung zur Auswertung in Tabellen*.

- Version: 2010. <http://www.htmldb-hosting.com/pls/htmldb/f?p=MIT08:1, Abruf: 31.12.2016>
- [60] INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG GMBH (IFEU): *Weiterentwicklung und vertiefte Analyse der Umweltbilanz von Elektrofahrzeugen*. Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt (Hrsg.), April 2016 (Schriftenreihe: Texte 27 / 2016)
- [61] JOSSEN, Andreas ; WEYDANZ, Wolfgang: *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*. 1. Auflage. Untermeitingen : Reichardt, 2006. – ISBN 978–3–939359–11–1
- [62] KNÖRR, Wolfram ; DÜNNEBEIL, Frank: *Aktualisierung "Daten und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030"*. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, 2011
- [63] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: *Pressemitteilung Nr. 3/2012: Der Fahrzeugbestand am 01. Januar 2012*. Januar 2012
- [64] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: *Fahrzeugzulassungen (FZ): Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Marken - Jahr 2013*. April 2014
- [65] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: *Bestand an Pkw am 01. Januar 2015 gegenüber dem 01. Januar 2014 auf 1.000 Einwohner (Diagramm)*. Version: 2015. http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/FahrzeugklassenAufbauarten/2015/2015_b_pkw_bundeslaender_diagramm.html?nn=1343934, Abruf: 31.12.2016
- [66] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT: *Pressemitteilung Nr. 1/2016: Jahresbilanz - Fahrzeugzulassungen im Dezember 2015*. Version: 2016. http://www.kba.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2016/pm_01_16_fahrzeugzulassungen_12_2015_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4, Abruf: 31.12.2016

- [67] KUNST, Friedemann: *Tempo 30 auf Hauptverkehrsstraßen? Beitrag zur Fachtagung des Umweltbundesamtes am 13.11.2012.* Version: November 2012. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/dokumente/kunst-veroeffentlichung.pdf>, Abruf: 31.12.2016
- [68] LELIEVELD, Jos ; EVANS, John S. ; GIANNADAKI, Despina ; FNAIS, Mohammed ; POZZER, Andrea: The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. In: *Nature* 525 (2015), S. 367-371. <http://www.nature.com/nature/journal/v525/n7569/full/nature15371.html>
- [69] LINK, Jochen: *Elektromobilität und erneuerbare Energien: Lokal optimierter Einsatz von netzgekoppelten Fahrzeugen*, Technische Universität Dortmund, Diss., 2011
- [70] LINNE UND KRAUSE MARKETING-FORSCHUNG: *Gutachten gemäß § 13 Abs. 4 PBefG über die Funktionsfähigkeit des Taxigewerbes in der Landeshauptstadt Stuttgart sowie in den Städten Filderstadt und Leinfelden-Echterdingen*. Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für öffentliche Ordnung, Oktober 2013
- [71] LK ARGUS GMBH: *Machbarkeitsstudie und Wirkungsanalyse zur Parkraumbewirtschaftung Prenzlauer Berg*. Version: November 2011. https://www.berlin.de/imperia/md/content/bapankow/pdf-dateien/gesetzordnungsamt/machbarkeitsstudie__parkraumbewirtschaftung_nov_11_.pdf?start&ts=1409141420&file=machbarkeitssstudie__parkraumbewirtschaftung_nov_11_.pdf, Abruf: 31.12.2016
- [72] LÖSCHEL, A. ; ERDMANN, G. ; STAISS, F. ; ZIESING, H.-J.: *Stellungnahme zum zweiten Monitoring-Bericht der Bundesregierung für das Berichtsjahr 2012*. März 2014

- [73] LUTTER, Horst ; BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDNUNG (Hrsg.): *Raumordnungsbericht 2005*. Selbstverlag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2005
- [74] MACIEJEWSKI, Michal ; BISCHOFF, Joschka: Large-scale Microscopic Simulation of Taxi Services. In: *Procedia Computer Science* Bd. 52 The 6th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT-2015), 2015, S. 358–364
- [75] MATLAB: *Version 8.1.0.604 (R2013a)*. Natick, Massachusetts : The MathWorks Inc., 2013
- [76] MATSIM (2016): *Multi-Agent Transport Simulation Toolkit*. Version: Januar 2016. <http://www.matsim.org/>, Abruf: 31.12.2016
- [77] NADARAYA, Elizbar: On estimating regression. In: *Theory of Probability and its Applications* 9 (1964), Nr. 1, S. 141-142. <http://dx.doi.org/10.1137/1109020>
- [78] NEUMANN, Andreas ; BALMER, Michael ; RIESER, Marcel: Converting a Static Macroscopic Model into a Dynamic Activity-Based Model to Analyze Public Transport Demand in Berlin. In: ROORDA, Matthew J. (Hrsg.) ; MILLER, Eric J. (Hrsg.): *Travel Behaviour Research: Current Foundations, Future Prospects*, International Association for Travel Behaviour Research (IATBR), 2014, S. 151–176
- [79] NIESING, Birgit: Die Zukunft der Stadt. In: *weiter.vorn : Das Fraunhofer Magazin* 12 (2012), Nr. 4, S. 8–13
- [80] NISSAN MOTOR CO., LTD.: *Produktbroschüre des Nissan Leaf*. Version: 2016. <http://media.nissan.eu/content/dam/services/DE/broschure/104602.pdf>, Abruf: 31.12.2016
- [81] NUHN, Helmut ; HESSE, Markus: *Verkehrsgeographie*. Paderborn : Schöningh, 2006 (UTB ; 2687 : Geographie). – ISBN 978–3–8252–2687–9

- [82] NYKVIST, Björn ; NILSSON, Måns: Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. In: *Nature Climate Change* 5 (2015), S. 329-332. <http://www.sei-international.org/publications?pid=2717>
- [83] PAVONE, Marco: Autonomous Mobility-on-Demand Systems for Future Urban Mobility. In: *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte* Daimler und Benz Stiftung, Herausgeber: Markus Maurer, J. Christian Gerdes, Barbara Lenz und Hermann Winner, 2015, S. 399–416.
- [84] RANDELHOFF, Martin: *Europäische Städte mit der niedrigsten Durchschnittsgeschwindigkeit im Straßenverkehr (2008)*. Version: August 2012. <http://www.zukunft-mobilitaet.net/9995/%20analyse/durchschnittsgeschwindigkeit-europa-2008-berlin-deutschland/>, Abruf: 31.12.2016
- [85] RANDELHOFF, Martin: *Die wahren Kosten eines Kilometers Autofahrt*. Version: Januar 2015. <http://www.zukunft-mobilitaet.net/2487/strassenverkehr/die-wahren-kosten-eines-kilometers-autofahrt/>, Abruf: 31.12.2016
- [86] RIFKIN, Jeremy: *Die Null-Grenzkosten-Gesellschaft: Das Internet der Dinge, kollaboratives Gemeingut und der Rückzug des Kapitalismus*. Frankfurt am Main [u.a.] : Campus-Verlag, 2014. – ISBN 978–3–593–39917–1
- [87] RINSPEED AG: *“microMAX“ - das vernetzte Schwarm-Auto*. Version: 2013. <http://www.rinspeed.eu/aktuelles.php?aid=13>, Abruf: 31.12.2016
- [88] SAFT BATTERIEN GMBH: *Energy storage module*. Interne Informationsbereitstellung durch die Siemens AG, 2013
- [89] SCHLICK, Thomas ; HERTEL, Guido ; HAGEMANN, Bernhard ; MAISER, Eric ; KRAMER, Michael: *Zukunftsfeld Elektromobilität:*

Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau. Roland Berger Strategy Consultants, Mai 2011

- [90] SCHMIDT, Arwed ; GRATZFELD, Peter ; SPIEGELBERG, Gernot: Einsatz einer autonomen und modularisierten Fahrzeugflotte als Mobilitätsdienstleister. In: *Elektronischer Tagungsband der 25. Verkehrswissenschaftlichen Tage 2016.* Dresden : Fakultät Verkehrswissenschaften “Friedrich List“ der TU Dresden, März 2016, S. 1–10. – Volltext nicht frei.
- [91] SCHNABEL, Werner ; LOHSE, Dieter ; DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (Hrsg.): *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung: Band 2 Verkehrsplanung.* Beuth Verlag GmbH, 2011
- [92] SENATSVERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT BERLIN: *Berliner Verkehr in Zahlen 2013.* Version: Januar 2014. http://www.stadtentwicklung.berlin.de/verkehr/politik_planung/zahlen_fakten/download/Mobilitaet_dt_komplett.pdf, Abruf: 31.12.2016
- [93] SENATSVERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT BERLIN: *Straßenbäume in Berlin.* Version: Dezember 2014. http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/stadtgruen/stadtbaeume/de/daten_fakten/downloads/ausw_137.pdf, Abruf: 31.12.2016
- [94] SENATSVERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG UND UMWELT BERLIN: *Teilverkehrszellen und Verkehrszellen: Informationen.* Version: 2016. <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/verkehr/datengrundlagen/verkehrszellen/de/informationen.shtml>, Abruf: 31.12.2016
- [95] SIEMENS AG: *Sustainable Urban Infrastructure: Ausgabe München - Wege in eine CO₂-freie Zukunft.* München : Forschungsauf-

- trag an das Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, 2009. – Bestell-Nr. A19100-F-P135
- [96] SIEMENS AG, CORPORATE TECHNOLOGY: *Mündliche Aussage zur Belastbarkeit von Pkw-Traktionsbatterien des Beauftragten für Batteriesystemtechnik*. Interview, 2014
- [97] SIEMENS AG SEKTOR INFRASTRUCTURE & CITIES: *Technische Schriftenreihe Ausgabe 9: Elektrische Infrastruktur für E-Car Ladestationen*. Erlangen, 2013
- [98] SOLARENERGIE-FÖRDERVEREIN DEUTSCHLAND E.V. (SFV): *Diskussion zur Agora-Studie vom September 2014 von Wolf von Fabeck*. Version: 2014. http://www.sfv.de/artikel/sfv-stellungnahme_zur_agora-studie_vom_sept_2014_.htm, Abruf: 31.12.2016
- [99] SPIEGELBERG, Gernot: *Is Electrification the 'solution'? Programmbeitrag zur Fifth Annual Oxford Energy Conference*. Version: Juni 2016. <http://www.energy.ox.ac.uk/wordpress/wp-content/uploads/2016/06/Gernot-Spiegelberg.pdf>, Abruf: 31.12.2016
- [100] SPIESER, Kevin ; TRELEAVEN, Kyle ; ZHANG, Rick ; FRAZOLLI, Emilio ; MORTON, Daniel ; PAVONE, Marco: *Toward a Systematic Approach to the Design and Evaluation of Automated Mobility-on-Demand Systems: A Case Study in Singapore*. In: MEYER, Gereon (Hrsg.) ; BEIKER, Sven (Hrsg.): *Road Vehicle Automation: Lecture Notes in Mobility*. Cham : Springer, 2014, Kapitel 4, S. 229–245
- [101] SPRINGER GABLER VERLAG (HRSG.): *Gabler Wirtschaftslexikon. Stichwort: Sharing Economy*. Version: 2016. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/688938792/sharing-economy-v5.html>, Abruf: 31.12.2016
- [102] STATISTA GMBH: *Europäische Städte mit der niedrigsten Durchschnittsgeschwindigkeit im Straßenverkehr*. Version: 2008. [http:](http://)

- [//de.statista.com/statistik/daten/studie/37200/umfrage/durchschnittsgeschwindigkeit-in-den-15-groessten-staedten-der-welt-2009/](http://de.statista.com/statistik/daten/studie/37200/umfrage/durchschnittsgeschwindigkeit-in-den-15-groessten-staedten-der-welt-2009/), Abruf: 31.12.2016
- [103] STATISTA GMBH: *Durchschnittliches Leergewicht von neu zugelassenen Personenkraftwagen in Deutschland im Jahr 2014 nach Segmenten (in Kilogramm)*. Version: 2014. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/239565/umfrage/leergewicht-von-pkw-neuzulassungen-in-deutschland-nach-segmenten/>, Abruf: 31.12.2016
- [104] STATISTA GMBH: *Dicke Luft in China*. Version: Dezember 2015. <https://de.statista.com/infografik/4115/feinstaubbelastung-in-peking-in-mikrogramm-pro-kubikmeter/>, Abruf: 31.12.2016
- [105] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Bruttoinlandsprodukt 2013 für Deutschland*. Version: Januar 2014. https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressekonferenzen/2014/BIP2013/Pressebrochure_BIP2013.pdf?__blob=publicationFile, Abruf: 31.12.2016. Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 15. Januar 2014 in Berlin
- [106] STREETSCOOTER GMBH / DEUTSCHE POST DHL GROUP: *Streetscooter*. Version: 2015. <http://www.streetscooter.eu/>, Abruf: 31.12.2016
- [107] TESLA MOTORS, INC.: *Model S - Produktbeschreibung und technische Daten*. Version: 2016. https://www.teslamotors.com/de_DE/models, Abruf: 31.12.2016
- [108] TESLA MOTORS, INC.: *Supercharger*. Version: 2016. https://www.teslamotors.com/de_DE/supercharger?redirect=no, Abruf: 31.12.2016
- [109] TOMTOM INTERNATIONAL BV: *TomTom European Traffic Index*. Version: 2014. http://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/list, Abruf: 31.12.2016

- [110] UMWELTBUNDESAMT: *Daten zum Verkehr. Ausgabe 2012.*
Version: Oktober 2012. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4364.pdf>, Abruf: 31.12.2016
- [111] UMWELTBUNDESAMT: *Treibhausgasausstoß in Deutschland 2012 - vorläufige Zahlen aufgrund erster Berechnungen und Schätzungen des Umweltbundesamtes.* Version: Februar 2013. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/hintergrund_treibhausgasausstoß_d_2012_bf.pdf, Abruf: 31.12.2016
- [112] UMWELTBUNDESAMT: *Daten zur Umwelt 2015.* Version: Juni 2015. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/daten-zur-umwelt-2015>, Abruf: 31.12.2016
- [113] UMWELTBUNDESAMT: *Übersicht zur Entwicklung der energiebedingten Emissionen und Brennstoffeinsätze in Deutschland 1990-2011.* Version: März 2016. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/uebersicht_zur_entwicklung_der_energiebedingten_emissionen_und_brennstoffeinsaetze_in_deutschland_1990-2014_web.pdf, Abruf: 31.12.2016
- [114] UNITED NATIONS CONFERENCE ON ROAD TRAFFIC: *19. Convention on Road Traffic.* Wien, November 1968
- [115] UNITED NATIONS: DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS: *World Urbanization Prospects - The 2011 Revision.*
Version: 2012. http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/WUP2011_Report.pdf, Abruf: 31.12.2016
- [116] VERKEHRSLUB DEUTSCHLAND (VCD), LANDESVERBAND BAYERN E.V.: *11 Sprintspartipps.* Nürnberg : Broschüre, 2009
- [117] VERTRAGSSTAATENKONFERENZ DER KLIMARAHMENKONVENTION IN KYOTO: *Das Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen.*

- Version: 1992. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpger.pdf>,
Abruf: 31.12.2016
- [118] VOLKSWAGEN AG: *Volkswagen Classic: Golf II CityStromer*.
Version: 2016. <https://www.volkswagen-classic.de/modelle/fahrzeugpool/golf-2-citystromer>, Abruf: 31.12.2016
- [119] WARAICH, Rashid: *Agent-based simulation of electric vehicles: design and implementation of a framework*, ETH Zürich, Diss., 2013
- [120] WIRTSCHAFTS- UND SOZIALRAT DER VEREINTEN NATIONEN: *Report of the sixty-eighth session of the Working Party on Road Traffic Safety*. März 2014
- [121] WONG, Chit Ming ; TSANG, Hilda ; LAI, Hak Kan ; THOMAS, G. Neil ; LAM, King Pan Kin Bong ad Chan ; ZHENG, Qishi ; AYRES, Jon G. ; LEE, Siu Yin ; LAM, Tai Hing ; THACH, Thuan Quoc: Cancer Mortality Risks from Long-term Exposure to Ambient Fine Particle. In: *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention* 25 (2016), April, Nr. 5, S. 839-845. <http://dx.doi.org/10.1158/1055-9965.EPI-15-0626>
- [122] ZVEI - ZENTRALVERBAND ELEKTROTECHNIK- UND ELEKTRONIKINDUSTRIE E.V. KOMPETENZZENTRUM ELEKTROMOBILITÄT: *Spannungsklassen in der Elektromobilität*. Dezember 2013

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

Die Bände sind unter www.ksp.kit.edu als PDF frei verfügbar
oder als Druckausgabe bestellbar.

- Band 1** Urs Wiesel
Hybrides Lenksystem zur Kraftstoffeinsparung im schweren Nutzfahrzeug. 2010
ISBN 978-3-86644-456-0
- Band 2** Andreas Huber
Ermittlung von prozessabhängigen Lastkollektiven eines hydrostatischen Fahrtriebsstrangs am Beispiel eines Teleskopladers. 2010
ISBN 978-3-86644-564-2
- Band 3** Maurice Bliesener
Optimierung der Betriebsführung mobiler Arbeitsmaschinen. Ansatz für ein Gesamtmaschinenmanagement. 2010
ISBN 978-3-86644-536-9
- Band 4** Manuel Boog
Steigerung der Verfügbarkeit mobiler Arbeitsmaschinen durch Betriebslasterfassung und Fehleridentifikation an hydrostatischen Verdrängereinheiten. 2011
ISBN 978-3-86644-600-7
- Band 5** Christian Kraft
Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich. 2011
ISBN 978-3-86644-607-6
- Band 6** Lars Völker
Untersuchung des Kommunikationsintervalls bei der gekoppelten Simulation. 2011
ISBN 978-3-86644-611-3
- Band 7** 3. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. 17. Februar 2011, Karlsruhe. 2011
ISBN 978-3-86644-599-4

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 8** Vladimir Iliev
Systemansatz zur anregungsunabhängigen Charakterisierung des Schwingungskomforts eines Fahrzeugs. 2011
ISBN 978-3-86644-681-6
- Band 9** Lars Lewandowitz
Markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung der Produktgruppe Fahrerassistenzsysteme. Ein methodisches Rahmenwerk. 2011
ISBN 978-3-86644-701-1
- Band 10** Phillip Thiebes
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen. Grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge, Vorstellung einer Methodik zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und deren Validierung am Beispiel einer Forstmaschine. 2012
ISBN 978-3-86644-808-7
- Band 11** Martin Gießler
Mechanismen der Kraftübertragung des Reifens auf Schnee und Eis. 2012
ISBN 978-3-86644-806-3
- Band 12** Daniel Pies
Reifenungleichförmigkeitserregter Schwingungskomfort – Quantifizierung und Bewertung komfortrelevanter Fahrzeugschwingungen. 2012
ISBN 978-3-86644-825-4
- Band 13** Daniel Weber
Untersuchung des Potenzials einer Brems-Ausweich-Assistenz. 2012
ISBN 978-3-86644-864-3
- Band 14** **7. Kolloquium Mobilhydraulik.**
27./28. September 2012 in Karlsruhe. 2012
ISBN 978-3-86644-881-0
- Band 15** 4. Fachtagung
Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen
20. Februar 2013, Karlsruhe. 2013
ISBN 978-3-86644-970-1

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 16** Hans-Joachim Unrau
Der Einfluss der Fahrbahnoberflächenkrümmung auf den Rollwiderstand, die Cornering Stiffness und die Aligning Stiffness von Pkw-Reifen. 2013
ISBN 978-3-86644-983-1
- Band 17** Xi Zhang
Untersuchung und Entwicklung verschiedener Spurführungsansätze für Offroad-Fahrzeuge mit Deichselverbindung. 2013
ISBN 978-3-7315-0005-6
- Band 18** Stefanie Grollius
Analyse des gekoppelten Systems Reifen-Hohlraum-Rad-Radführung im Rollzustand und Entwicklung eines Rollgeräuschmodells. 2013
ISBN 978-3-7315-0029-2
- Band 19** Tobias Radke
Energieoptimale Längsführung von Kraftfahrzeugen durch Einsatz vorausschauender Fahrstrategien. 2013
ISBN 978-3-7315-0069-8
- Band 20** David Gutjahr
Objektive Bewertung querdynamischer Reifeneigenschaften im Gesamtfahrzeugversuch. 2014
ISBN 978-3-7315-0153-4
- Band 21** Neli Ovcharova
Methodik zur Nutzenanalyse und Optimierung sicherheitsrelevanter Fahrerassistenzsysteme. 2014
ISBN 978-3-7315-0176-3
- Band 22** Marcus Geimer, Christian Pohlandt
Grundlagen mobiler Arbeitsmaschinen. 2014
ISBN 978-3-7315-0188-6
- Band 23** Timo Kautzmann
Die mobile Arbeitsmaschine als komplexes System. 2014
ISBN 978-3-7315-0187-9

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 24** Roman Weidemann
Analyse der mechanischen Randbedingungen zur Adaption der oszillierenden Hinterschneidtechnik an einen Mobilbagger. 2014
ISBN 978-3-7315-0193-0
- Band 25** Yunfan Wei
Spurführungsregelung eines aktiv gelenkten Radpaars für Straßenbahnen. 2014
ISBN 978-3-7315-0232-6
- Band 26** David Schmitz
Entwurf eines fehlertoleranten Lenkventils für Steer-by-Wire Anwendungen bei Traktoren. 2014
ISBN 978-3-7315-0264-7
- Band 27** Christian Schwab
Beitrag zu einer universellen Baggerschnittstelle zur Übertragung elektrischer und hydraulischer Leistung sowie elektronischer Signale für komplexe Anbaugeräte. 2014
ISBN 978-3-7315-0281-4
- Band 28** Peter Dengler
Untersuchung zum effizienten Betrieb von Hydraulikzylindern in Konstantdrucksystemen unter Verwendung einer Zwischendruckleitung. 2015
ISBN 978-3-7315-0295-1
- Band 29** Manuel Bös
Untersuchung und Optimierung der Fahrkomfort- und Fahrdynamikeigenschaften von Radladern unter Berücksichtigung der prozessspezifischen Randbedingungen. 2015
ISBN 978-3-7315-0310-1
- Band 30** 5. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen 25. Februar 2015, Karlsruhe. 2015
ISBN 978-3-7315-0323-1
- Band 31** Michael Eckert
Energieoptimale Fahrdynamikregelung mehrmotoriger Elektrofahrzeuge. 2015
ISBN 978-3-7315-0332-3

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 32** Martin Scherer
Beitrag zur Effizienzsteigerung mobiler Arbeitsmaschinen. Entwicklung einer elektrohydraulischen Bedarfsstromsteuerung mit aufgeprägtem Volumenstrom. 2015
ISBN 978-3-7315-0339-2
- Band 33** Rinaldo Arnold
Automatische Abstimmung der Sekundärseite eines dreiphasigen Systems zur berührungslosen induktiven Energieübertragung. 2015
ISBN 978-3-7315-0355-2
- Band 34** Johannes Gültlinger
Kraftübertragung und Fahrbahnverschleiß durch Spikereifen. 2015
ISBN 978-3-7315-0358-3
- Band 35** Thorsten Dreher
Energieeffizienz von Konstantdrucksystemen mit sekundärgeregelten Antrieben beim Einsatz in mobilen Arbeitsmaschinen. 2015
ISBN 978-3-7315-0377-4
- Band 36** Steffen Kölling
Konzeptionelle Untersuchung zur Neigekompensation von Stromabnehmern. 2015
ISBN 978-3-7315-0387-3
- Band 37** Michael Fritz
Entwicklungswerkzeuge für die Fahrzeugklimatisierung von Nutzfahrzeugen. 2015
ISBN 978-3-7315-0384-2
- Band 38** Ralf Oberfell
Stochastische Simulation von Energieflüssen im Nutzfahrzeug Ein einsatzorientiertes Bewertungs- und Optimierungsverfahren. 2015
ISBN 978-3-7315-0403-0
- Band 39** Christoph Sturm
Bewertung der Energieeffizienz von Antriebssystemen mobiler Arbeitsmaschinen am Beispiel Bagger. 2015
ISBN 978-3-7315-0404-7

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 40** Florian Netter
Komplexitätsadaption integrierter Gesamtfahrzeugsimulationen. 2016
ISBN 978-3-7315-0414-6
- Band 41** Markus Springmann
Auslegung eines asynchronen Langstatorlinearmotors mit großem Luftspalt als Straßenbahnantrieb. 2015
ISBN 978-3-7315-0418-4
- Band 42** Alexander Basler
Eine modulare Funktionsarchitektur zur Umsetzung einer gesamtheitlichen Betriebsstrategie für Elektrofahrzeuge. 2015
ISBN 978-3-7315-0421-4
- Band 43** Hans-Georg Wahl
Optimale Regelung eines prädiktiven Energiemanagements von Hybridfahrzeugen. 2015
ISBN 978-3-7315-0422-1
- Band 44** Jennifer Heck
Zur Simulation des Rad-Schiene-Verschleißes bei Straßenbahnen. 2016
ISBN 978-3-7315-0443-6
- Band 45** Moritz Vaillant
Design Space Exploration zur multikriteriellen Optimierung elektrischer Sportwagenantriebsstränge: Variation von Topologie und Komponenteneigenschaften zur Steigerung von Fahrleistungen und Tank-to-Wheel Wirkungsgrad. 2016
ISBN 978-3-7315-0452-8
- Band 46** Philip Nagel
Entwicklung einer Betriebsstrategie zur Energierückgewinnung in hybriden Mehrverbrauchersystemen. 2016
ISBN 978-3-7315-0479-5
- Band 47** Matthias Pfriedm
Analyse der Realnutzung von Elektrofahrzeugen in kommerziellen Flotten zur Definition einer bedarfsgerechten Fahrzeugauslegung. 2016
ISBN 978-3-7315-0489-4

Karlsruher Schriftenreihe Fahrzeugsystemtechnik (ISSN 1869-6058)

Herausgeber: FAST Institut für Fahrzeugsystemtechnik

- Band 48** Mohanad El-Haji
Ontologie-basierte Definition von Anforderungen an Validierungswerkzeuge in der Fahrzeugtechnik. 2016
ISBN 978-3-7315-0496-2
- Band 49** **9. Kolloquium Mobilhydraulik**
22./23. September 2016 in Karlsruhe. 2016
ISBN 978-3-7315-0573-0
- Band 50** 6. Fachtagung
Hybride und energieeffiziente Antriebe für mobile Arbeitsmaschinen
15. Februar 2017, Karlsruhe. 2017
ISBN 978-3-7315-0601-0
- Band 51** Fabian Schirmaier
Experimentelle Untersuchung und Simulation des Umformverhaltens nähgewirkter unidirektionaler Kohlenstofffasergelege. 2017
ISBN 978-3-7315-0620-1
- Band 52** Mathias Cabrera Cano
Neuronale Netze mit externen Laguerre-Filtern zur automatischen numerischen Vereinfachung von Getriebemodellen. 2017
ISBN 978-3-7315-0621-8
- Band 53** Arwed Schmidt
Flottenbetrieb von elektrischen und autonomen Serviceagenten im städtischen Personennahverkehr. 2017
ISBN 978-3-7315-0633-1

Die heutige Nutzung privater Pkw ist aufgrund des Einsatzes fossiler Ressourcen, lokaler Treibhausgasemissionen, der häufig geringen Auslastung und dem unpräzisen Zuschnitt zum Transportzweck keine zukunftsfähige Lösung für urbanen Nahverkehr. Es bedarf eines strategischen Ansatzes, welcher das Komfortbedürfnis der Bevölkerung fokussiert und durch die Aggregation zu elektrifizierten Flotten einen größeren klimapolitischen Hebel besitzt.

In dieser Arbeit wird ein autonomes Personenbeförderungssystem mit ausschließlich durch erneuerbare Energie angetriebenen Fahrzeugen konzipiert und im Gesamtsystem simuliert. Die Ergebnisse zeigen die technischen, ökonomischen und ökologischen Potentiale auf, welche durch die systematische Einsatzplanung eines an der individuellen Mobilitätsnachfrage orientierten Massenverkehrsmittels entstehen können. Damit wird eine Methode zur Integration des motorisierten Individualverkehrs in die Zielsetzungen für die Energiewende in Deutschland vorgestellt.

