

DISSERTATION

# **Systemtechnische Integration von Elektrotaxis im urbanen Raum**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktors der technischen Wissenschaften

unter der Leitung von  
Em.O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Günther BRAUNER  
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von  
Dipl.-Ing. Markus LITZLBAUER  
Matr.-Nr. 00225710

Wien, 03. September 2020

Die Begutachtung dieser Arbeit erfolgte durch:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang GAWLIK  
Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe  
Technische Universität Wien
  
2. Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Udo BACHHIESL  
Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation  
Technische Universität Graz

Adele, Kilian und Timon

Danke für eure unermüdliche Unterstützung!

## Kurzfassung

Taxis stellen eine wesentliche Ergänzung zum öffentlichen Personennahverkehr sowie zum motorisierten Individualverkehr dar und leisten einen bedeutsamen Beitrag zur Bewältigung des täglichen Verkehrsaufkommens. Darüber hinaus besitzen Taxis eine starke öffentliche Sichtbarkeit und verfügen bei einer ganzheitlichen Elektrifizierung der Taxiflotten über einen außerordentlich wirksamen Multiplikator-Effekt.

Aus diesem Grund befasst sich die vorliegende Arbeit mit der zentralen Fragestellung, wie sich der Einsatz von rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen auf den heutigen Taxiverkehr bzw. die hierfür notwendige Ladeinfrastruktur auswirken würde und leitet daraus relevante Erkenntnisse für die involvierten AkteurInnen ab.

Zur detaillierten Beantwortung wird der gesamte Taxibetrieb zunächst als Zufallsprozess betrachtet und unter Anwendung von Markov-Ketten sowie Warteschlangensystemen modelliert. Darauf aufbauend wird eine stochastische Simulation entwickelt, die das Mobilitätsverhalten und den daraus resultierenden Ladebedarf einer gesamten E-Taxiflotte konsistent abbildet und einer tiefgehenden Untersuchung dient.

Im Rahmen der technischen Machbarkeitsanalyse werden hierfür komplementäre Szenarien im Hinblick auf Flottengröße, Kapazität der Antriebsbatterie und Leistungsfähigkeit der Ladeinfrastruktur definiert. Damit ist es möglich, die entscheidenden Unterschiede hinsichtlich Betriebsarten (Tages-, Nacht- und Doppelschicht) und Ladestandorte (betriebliches und öffentliches Laden) präzise auszuarbeiten.

Ferner kommt in der vorliegenden Arbeit ein evolutionärer Optimierungsalgorithmus zum Einsatz, der den erforderlichen Ausbau an öffentlicher Ladeinfrastruktur bedarfsgerecht berechnet. Gezielte Aussagen im Hinblick auf die Beschaffenheit und den optimalen Ausbau einer adäquaten Ladeinfrastruktur lassen sich dadurch unter Berücksichtigung der gewählten Basis- und Alternativszenarien treffen.

Überdies werden auf Grundlage der ermittelten Ladeinfrastrukturnutzung die daraus resultierenden Summenladeprofile an den betrachteten Ladestandorten abgeleitet, die sich für das lokale elektrische Stromnetz ergebenden Auswirkungen untersucht sowie vorbeugende Lastmanagementstrategien diskutiert.

Zur Abrundung der inhaltlichen Aspekte wird das Potenzial zur CO<sub>2</sub>-Reduktion bei der Umstellung einer Taxiflotte auf rein elektrisch betriebene Fahrzeuge erhoben und der dafür notwendige Ausbau an erneuerbaren Energiequellen dargelegt.

## Abstract

Taxis are an essential complement to the local public transport as well as the individual motorized transport and contribute significantly to the covering of daily traffic. In addition, taxis have strong public perception and a large multiplier effect to electrify the entire taxi fleet.

Therefore, the present thesis addresses the central questions of how the use of purely electrically driven vehicles affects today's taxi traffic, what kind of charging infrastructure is required and which findings can be derived for the actors involved.

For detailed answers, the taxi operation is viewed as a random process and modelled using Markov chains and queue networks. Based on this, a stochastic simulation is developed to consistently map the mobility behaviour and the resulting charging requirements as well as to thoroughly examine the effects of an entire e-taxi fleet.

As part of the technical feasibility study, complementary scenarios are defined in terms of fleet size, battery capacity and performance of the charging infrastructure. This enables the determination of the key differences in terms of operating modes (day, night and double shift) and charging infrastructure (public or private) precisely.

Moreover, an evolutionary algorithm is used to calculate the optimal expansion and performance of the required public available charging infrastructure for all chosen scenarios. Based on the resulting charging infrastructure usage, the total power requirements at the charging locations are calculated. Furthermore, the effects on the local power grid are valued and preventive load management strategies are discussed.

In completion of the thematic content, the necessary renewable energy sources to cover the energy demand of an entire e-taxi fleet is outlined and the possible potential for CO<sub>2</sub> reduction is estimated.

## Abkürzungsverzeichnis

BEV	Battery Electric Vehicle (batteriebetriebenes Elektrofahrzeug)
BMS	Batteriemanagementsystem
CCCV	Constant Current/Constant Voltage (ein Ladeverfahren)
CCS	Combined Charging Systems (eine Ladesteckvorrichtung)
CEE	Conformité de l'équipement électrique (Zertifizierung elektrotechnischer Geräte)
CEN	Comité Européen de Normalisation (Europäische Komitee für Normung)
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Électrotechnique (Europäische Komitee für elektrotechnische Normung)
DSG	Datenschutzgesetz (Bundesgesetz zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten)
EPSG	European Petroleum Survey Group Geodesy (eine Arbeitsgruppe der europäischen Öl- und Gaserkundungsunternehmen)
ETSI	European Telecommunications Standards Institute (Europäische Institut für Telekommunikationsnormen)
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment (als Synonym für Ladepunkt verwendet)
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (Brennstoffzellenelektrofahrzeuge)
FIFO	First In First Out („der Reihe nach“)
FMS	Flottenmanagementsystem
GPS	Global Positioning System (Globales Positionsbestimmungs-System)
HEV	Hybrid Electric Vehicle (Hybridelektrofahrzeug)
IC-CPD	In-Cable Control and Protection Device
IEC	International Electrotechnical Commission (Internationale Elektrotechnische Kommission)
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
KFZ	Kraftfahrzeug

KPI	Key Performance Indicator (Leistungskennzahl)
LIFO	Last In First Out („zuletzt herein - zuerst hinaus“)
LIS	Ladeinfrastruktur
LP	Ladepunkt
LURS	Leit- und Reservierungssystem
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MLM	Maximum-Likelihood-Methode
MSE	Mean Squared Error (mittlerer quadratischer Fehler)
OVE	Österreichischer Verband für Elektrotechnik
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Plug-in-Hybridelektrofahrzeug)
PKW	Personenkraftwagen
REEV	Range-extended Electric Vehicle (Elektrofahrzeug mit Reichweitenverlängerung)
RIS	Rechtsinformationssystem des Bundeskanzleramts
SOC	State of Charge (Batterieladezustand)
THD	Total Harmonic Distortion (Verzerrung eines harmonischen Signals)
THG	Treibhausgas
TSP	Taxistandplatz
VCÖ	Verkehrsclub Österreich
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WGS	World Geodetic System (ein globales Referenzsystem der Geodäsie und Navigation)
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (ein weltweit einheitliches Leichtfahrzeuge-Testverfahren)
ZEBRA	Zero Emission Battery Research Activities (eine Natrium-Nickelchlorid-Zelle)

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>2</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>7</b>
1.1 Relevanz des Themas .....	8
1.2 Forschungsfrage und Zielsetzung .....	10
1.3 Vorgangsweise und Gliederung .....	11
<b>2 Ausgangssituation</b> .....	<b>13</b>
2.1 Elektromobilität – Eine Begriffsabgrenzung.....	13
2.2 Elektrofahrzeuge.....	15
2.3 Ladeinfrastruktur .....	21
2.4 Das Taxigewerbe am Beispiel „Stadt Wien“ .....	40
<b>3 Mobilitätsdatengrundlage</b> .....	<b>50</b>
3.1 GPS-basierte Fahrzeugdaten.....	51
3.2 Kumulierte Flottendaten .....	62
3.3 Abgrenzung zu verwandten Arbeiten .....	65
<b>4 Modellbildung und Datenaufbereitung</b> .....	<b>73</b>
4.1 Die Taxistandplätze – Ein Netzwerk von Warteschlangen.....	74
4.2 Bestimmung der Betriebsarten und -zeiten .....	82
4.3 Approximation der Verteilungen – Angewandte Methodik .....	94
4.4 Festlegung der Verteilungstypen und Parameterwerte.....	100
<b>5 Generierung einer gesamten E-Taxiflotte</b> .....	<b>126</b>
5.1 Programmablauf und Funktionsweise .....	129
5.2 Validierung und Visualisierung .....	148
<b>6 Technische Machbarkeitsanalyse</b> .....	<b>157</b>
6.1 Simulationsablauf und Funktionsblöcke .....	158
6.2 Ladeinfrastrukturausbau und Szenarienentwicklung .....	169
6.3 Detaillierte Ergebnisse zur Machbarkeitsanalyse .....	189
<b>7 Auswirkungen auf das elektrische Verteilernetz</b> .....	<b>224</b>
7.1 Nutzungshäufigkeit der Ladepunkte .....	224
7.2 Resultierende Summenlastprofile .....	229

7.3	Lastprofile am Ladestandort.....	235
<b>8</b>	<b>Umwelteffekte und Energiebereitstellung .....</b>	<b>242</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>249</b>
<b>10</b>	<b>Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....</b>	<b>256</b>
	Literaturverzeichnis.....	257
	Abbildungsverzeichnis.....	268
	Tabellenverzeichnis.....	275
<b>Anhang A</b>	<b>„Ergänzende Abbildungen“ .....</b>	<b>278</b>
<b>Anhang B</b>	<b>„Ergänzende Tabellen“ .....</b>	<b>292</b>
<b>Anhang C</b>	<b>„Ergänzende Beschreibungen“ .....</b>	<b>304</b>

# 1 Einleitung

Das Klima verändert sich und der Mensch sei schuld. Eine harte, aber mitunter nicht unbegründete Anschuldigung. Rückblickend war jede der vergangenen Dekaden wärmer als alle vorangegangenen und das seit mehr als 150 Jahren. Es erhöht sich aber nicht nur die Temperatur der Atmosphäre, auch der Meeresspiegel steigt kontinuierlich an und das gesamte Klimasystem verändert sich in einer Form, die in den zurückliegenden Jahrzehnten bis Jahrtausenden so noch nie aufgetreten ist. Dies bestätigt der fünfte Sachstandsbericht des IPCC (AR5)<sup>1</sup> [1]. In diesem wird die anthropogene<sup>2</sup> Freisetzung von Treibhausgasen (THG), insbesondere Kohlendioxid, als Hauptverursacher des aktuellen Klimawandels genannt. Dies bedeutet, dass neben den natürlichen Schwankungen (z. B. Variabilität der Sonneneinstrahlung und der Vulkanaktivität) vor allem der Mensch mit seinen Aktivitäten den größten Einflussfaktor darstellt.

Vom Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhundert bis heute steigerten die Menschen die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre auf einen – in den vergangenen 800.000 Jahren – noch nie dagewesenen Wert. Würde die derzeitige Emissionsrate unverändert bleiben, dann wäre schon Mitte dieses Jahrhunderts so viel Kohlendioxid in die Atmosphäre emittiert, dass die globale Mitteltemperatur um 2°C höher läge als das vorindustrielle Niveau. Ein solch ungebremsster Ausstoß von Treibhausgasen lässt vielfältige und deutliche Veränderungen u. a. bei Niederschlägen, Eis und Schnee, Extremwetterereignissen und eine Versauerung der Ozeane erwarten. [1]

Damit sich dennoch katastrophale Auswirkungen des Klimawandels für Natur, Wirtschaft und Gesellschaft vermeiden lassen oder zumindest das Risiko diesbezüglich deutlich eingedämmt werden kann, müssen die weltweiten Netto-THG-Emissionen ehestmöglich, aber zumindest bis spätestens 2060, auf null zurückgefahren werden [2]. Diese drastische Reduktion zielt auf eine Begrenzung der globalen Erderwärmung auf 1,5°C ab – folglich deutlich unter 2°C.

Ein Grundstein dafür wurde 2016 durch das Inkrafttreten<sup>3</sup> des Übereinkommens von Paris als Nachfolge des Kyoto-Protokolls gelegt. Die wahre Herausforderung stellt

---

<sup>1</sup> Der sechste Sachstandsbericht (Sixth Assessment Report) des IPCC (AR6) wird voraussichtlich im Jahr 2022 veröffentlicht.

<sup>2</sup> Bedeutung: Durch den Menschen verursacht.

<sup>3</sup> Das Abkommen trat am 04. November 2016 in Kraft, als es 55 Staaten ratifiziert hatten, die gemeinsam mindestens 55 % der globalen THG-Emissionen verursachen. Beschlossen wurde das Übereinkommen von Paris bereits am 12. Dezember 2015.

jedoch die kontinuierliche Umsetzung des ambitionierten 1,5°C-Ziels dar. Dabei wird sich die Entschlossenheit oder Zurückhaltung der einzelnen Staaten zeigen.<sup>4</sup>

Auch Europa muss sich dazu klar und deutlich positionieren. Jedoch werden die von der EU festgelegten<sup>5</sup> [3, 4] und für die Mitgliedsstaaten verbindlichen Energie- und Klimaziele bis 2030 nicht von allen Meinungsbildnern als „ausreichend“ angesehen. Ungeachtet der Höhe der Zielsetzungen forciert der Fahrplan jedenfalls eine umweltschonendere und energieeffizientere europäische Wirtschaft und beinhaltet folgende drei Schwerpunkte (Ziele bis 2030):

- Senkung der Treibhausgasemissionen (um mindestens 40 % gegenüber 1990)
- Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger (auf mindestens 30 %)
- Steigerung der Energieeffizienz (um mindestens 32,5 %)

Mittels gezielter Maßnahmen zur Effizienzsteigerung z. B. im Sektor „Gebäude“ durch Verbesserungen der Klimatisierung (inkl. Sanierung, Dämmung), Lüftung und Beleuchtung oder im Sektor „Industrie“ durch entsprechende Systemoptimierungen können Einsparungen beim Primärenergieverbrauch erreicht werden. Zudem stellt die Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energieträger u. a. beim Energiemix der Stromerzeugung ein hohes THG-Einsparungspotenzial dar. [3, 4]

Ungeachtet dessen wird zum Erreichen der Klimaziele auch eine drastische Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energieträger im Verkehrssektor unabdingbar sein. Vor allem da der Verkehrssektor den Hauptverursacher für die Luftverschmutzung in Städten darstellt [6]. Die Europäische Kommission beschreibt hierfür in ihrer Strategie für emissionsarme Mobilität [5] u. a. die Wichtigkeit eines beschleunigten Umstiegs auf emissionsfreie Fahrzeuge in Europa.

## 1.1 Relevanz des Themas

Die Notwendigkeit einer „Dekarbonisierung“ im Verkehrssektor wird unmissverständlich durch die Höhe der Emissionen zum Ausdruck gebracht. In Europa beträgt der Anteil der THG-Emissionen im Verkehrssektor knapp ein Viertel [6]. In Österreich sind es rund

---

<sup>4</sup> Bereits im Juni 2017 hat die USA wieder ihren Rückzug aus dem Pariser Klimaschutzabkommen angekündigt. Der Rückzug aus dem Abkommen soll voraussichtlich im November 2020 wirksam werden.

<sup>5</sup> Am 11. Dezember 2018 wurden die verbindlichen EU-2030-Ziele für den Anteil der Energie aus erneuerbaren Quellen von 27 % auf 30 % und für die Verbesserung der Energieeffizienz von 27 % auf 32,5 % angehoben. [4]

29 % des heimischen THG-Ausstoßes<sup>6</sup> (23,7 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. für 2017) [7]. Somit ist der Verkehrssektor der größte Verursacher von Treibhausgasemissionen (ohne Emissionshandel).

Dabei leiden Ballungsräume besonders unter der verkehrsbedingten Luftverschmutzung. Sie sehen sich jedoch nicht nur mit dem Schadstoffausstoß der fossil betriebenen Fahrzeuge konfrontiert, sondern müssen aufgrund des vielerorts steigenden Verkehrsaufkommens, des starken PendlerInnenverkehrs und eines verkehrsintensiven Gütertransports mit Staus, Platzproblemen, Lärm und schlechter Luftqualität kämpfen. [8]

Überdies steigt die Bevölkerungszahl in den Städten zusehends. Bereits während der Industrialisierung begann eine massive Land-Stadt-Wanderung (u. a. wegen mangelhafter Infrastruktur, fehlender Arbeitsplätze und Ausbildungsmöglichkeiten) und eine Beschleunigung des Verstädterungsprozesses [9]. Dieser führte dazu, dass seit dem Beginn des 21. Jahrhunderts mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung in Städten lebt und ein Anstieg auf zwei Drittel für das Jahr 2050 prognostiziert wird [10]. Dabei muss die Stadtentwicklung mit dem Wachstum der Bevölkerung Schritt halten können und in Bezug auf den Stadtverkehr ein nachhaltiges, umweltfreundliches Mobilitätsangebot umgesetzt werden.

Laut [8] sind hierbei der Ausbau des öffentlichen Verkehrs sowie der Infrastruktur für Radfahren und Gehen zu priorisieren. Des Weiteren sollte an den Haltestellen des öffentlichen Verkehrs eine multimodale Vernetzung mit anderen Mobilitätsdienstleistungen (wie z. B. Bike- und Carsharing sowie Taxi) geschaffen werden und angebotsübergreifende Mobilitätsplattformen die gemeinsame Buchung und Abrechnung ermöglichen.

Individuell genutzte E-Fahrzeuge spielen diesbezüglich jedoch eine sekundäre Rolle, da sie u. a. das Platzproblem im öffentlichen Raum der Städte durch ihren Einsatz nicht lösen. Dennoch sind sie im Rahmen von dekarbonisierenden Mobilitätskonzepten und insbesondere in Kombination mit erneuerbaren Energieträgern unverzichtbar, denn sie verringern die Abhängigkeit des Verkehrs von fossilen Erdölimporten. Deshalb ist es erforderlich, jene Wege des Güter- und Personentransports mit Elektroautos durchzuführen, die trotz allem weder auf Gehen, Radfahren oder den öffentlichen Verkehr verlagert werden können. Erfolgversprechende Einsatzmöglichkeiten sind hier u. a. Firmen- und Lieferflotten, kommunale Dienste, Carsharing und insbesondere Taxis [8].

---

<sup>6</sup> Inklusive Emissionshandel (ohne Emissionshandel sind es rund 46 %)

In Bezug auf den Individualverkehr besitzen vor allem Taxiflotten eine gewisse Sonderstellung. Sie stellen nicht nur eine wesentliche Ergänzung zum öffentlichen Verkehr dar, sondern können direkt als Teilmenge des öffentlichen Personennahverkehrs angesehen werden, da sie der Beförderungs- und Tarifpflicht unterliegen. Taxis bilden somit bei einer Umstellung auf rein elektrisch betriebene Fahrzeuge einen grundlegenden Baustein für die Erhöhung der Lebensqualität im urbanen Raum.

## 1.2 Forschungsfrage und Zielsetzung

In heutigen Taxiflotten werden bereits erfolgreich Hybridelektrofahrzeuge als Taxis eingesetzt. Bedingt durch den andauernden Stop-and-go-Verkehr im städtischen Gebiet und einem effizienten Einsatz des fossilen Treibstoffes erzielen Hybridelektrofahrzeuge im Vergleich zu konventionellen, dieselbetriebenen Taxi-Fahrzeugen niedrigere Fahrtkosten. Hybridelektrofahrzeuge sind deshalb im Taxibetrieb bereits heute wirtschaftlich abbildbar. Aus ökologischer Sicht kann diese Antriebstechnologie – vor allem wegen der Verursachung von lokalen Emissionen – lediglich einen Zwischenschritt zu einer emissionsfreien Mobilität darstellen. Um das volle Einsparungspotenzial auszuschöpfen, dürfen über kurz oder lang lediglich rein elektrisch betriebene Fahrzeuge und diese nur in Kombination mit erneuerbaren Energieträgern für den Taxiverkehr in den Städten eingesetzt werden. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit die Umstellung einer gesamten Taxiflotte mit ausschließlich rein batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen betrachtet.

Dabei sollen die hier erarbeiteten Ergebnisse einerseits einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis der Möglichkeiten und Potenziale leisten sowie andererseits auch die vorhandenen Rahmenbedingungen und Einschränkungen eines rein elektrischen Taxiverkehrs aufzeigen. Aus diesem Grund werden nicht nur die relevanten infrastrukturellen und technischen Aspekte analysiert, sondern ebenfalls die spezifischen Bedürfnisse der involvierten AkteurInnen (wie Taxiunternehmer, TaxilenkerInnen, Vermittlungsgesellschaften oder Ladestationsbetreiber) im Rahmen der Untersuchungen sowie bei der Formulierung der Schlussfolgerungen berücksichtigt.

Angesichts des für den Wiener Taxiverkehr vorhandenen umfangreichen Datenermaterials, das im Rahmen des Forschungsprojekts „ZENEM“<sup>7</sup> von der Vermittlungsgesellschaft TAXI 31300 für wissenschaftliche Zwecke zur Verfügung gestellt wurde, soll

---

<sup>7</sup> Das Projekt ZENEM „Zukünftige Energienetze mit Elektromobilität“ wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „NEUE ENERGIEN 2020“ durchgeführt.

folgende zweiteilige Kernfrage anhand des Beispiels „E-Taxis in der Stadt Wien“ beantwortet werden:

***Unter welchen Bedingungen und Einschränkungen ist rein elektrisch betriebener Taxiverkehr im urbanen Raum möglich und welche Erkenntnisse können für die involvierten AkteurlInnen abgeleitet werden?***

### 1.3 Vorgangsweise und Gliederung

Die vorliegende Arbeit ist grundsätzlich in drei wesentliche Blöcke aufgeteilt. Der erste besteht aus den Kapiteln „Einleitung“, „Ausgangssituation“ und „Mobilitätsdatengrundlage“ und spannt den begrifflichen und substanziellen Rahmen der darauffolgenden Untersuchungen auf. Er kann somit als Einführung in die beiden hier relevanten Themengebiete „Elektromobilität“ und „Taxibetrieb“ angesehen werden. Neben Ausführungen zum Stand der Technik (u. a. bezüglich Elektrofahrzeuge, Ladeinfrastruktur und Ladeverfahren) sind ebenfalls Erläuterungen zum Taxigewerbe und seiner Betriebsabläufe anhand des Beispiels „Stadt Wien“ enthalten. Die diesbezüglich notwendigen Kenntnisse stammen vorrangig aus Literaturrecherchen.

Der zweite Block umfasst die Kapitel „Modellbildung und Datenaufbereitung“ sowie „Generierung einer gesamten E-Taxiflotte“. In der vorliegenden Arbeit kommen zwei Datensätze zum Einsatz. Diese beinhalten Zeitreihen von Mobilitätsmerkmalen bzw. Statuswerten einer gesamten Wiener Funktaxiflotte über den Betrachtungszeitraum eines Kalenderjahres. Sie unterscheiden sich hauptsächlich in Bezug auf Umfang, Granularität und Detailgrad. Trotz des hohen Informationsgehaltes ist es für das Erreichen der gesteckten Zielsetzungen erforderlich, eine umfangreiche Datenaufbereitung bzw. -verarbeitung vorzunehmen. Diese bildet das methodische Kernstück der wissenschaftlichen Arbeit. Auf Basis des hier entwickelten, stochastischen Modells können die benötigten zusammenhängenden Mobilitätsdaten auf Fahrzeugebene und in hinreichender Qualität generiert werden. Die gewählte Methode inkludiert dabei die Approximation der Verteilungen u. a. für die Merkmale „Stand- und Fahrdauer“ sowie „Distanz“ und „Energiebedarf“ der Taxifahrten. Diesbezüglich werden die mathematischen Grundlagen und die konkrete Vorgehensweise schrittweise und detailliert dargestellt sowie die erzeugten Mobilitätsdaten validiert. Darüber hinaus wird eine klare Abgrenzung zu verwandten Publikationen gegeben, die stellenweise das Fundament der vorliegenden Arbeit bilden.

Der dritte Block dieser wissenschaftlichen Arbeit wird aus den Kapiteln „Technische Machbarkeitsanalyse“, „Auswirkungen auf das elektrische Verteilernetz“, „Umwelteffekte und Energiebereitstellung“ sowie „Zusammenfassung“ gebildet. Er enthält somit alle

relevanten Ergebnisse und Erkenntnisse, um eine Beantwortung der eingangs definierten Kernfrage zu ermöglichen. Dabei wird vor allem bei der Beschreibung der einzelnen Analysen und der zugrunde gelegten Annahmen ein Augenmerk auf deren Nachvollziehbarkeit gelegt. Des Weiteren wird bei der Darstellung der ermittelten Ergebnisse und bei der Formulierung der Schlussfolgerungen darauf geachtet, dass die einzelnen Sichtweisen der involvierten AkteurInnen angemessen behandelt werden.

Abgesehen von der zentralen Kernfrage kommt es im Rahmen der umfangreichen Untersuchungen u. a. zur Klärung der nachstehenden Detailfragen:

- Wo soll vorrangig Ladeinfrastruktur entstehen, wie muss diese beschaffen sein und welche Ausbaustufen sind in Bezug auf die Flottengröße relevant?
- Welcher Anteil der Taxifahrten ist mittels rein elektrisch betriebener Taxifahrzeuge durchführbar und wie viele Taxifahrten müssen aus Gründen der beschränkten Reichweite bzw. der Dauer der Ladevorgänge abgelehnt werden?
- Wie sind die Ladevorgänge u. a. bezüglich Anzahl, Dauer sowie geladener Energiemenge verteilt und welche Nutzungsgrade ergeben sich für die Ladestationen?
- Wie sehen die Ganglinien der resultierenden Summenladeprofile an den betrachteten Ladestationen aus und welche Auswirkungen ergeben sich daraus für das lokale elektrische Stromnetz?
- Welches Potenzial zur CO<sub>2</sub>-Reduktion kann bei der Umstellung einer Taxiflotte auf rein elektrisch betriebene Fahrzeuge generiert werden und wie groß ist der dafür notwendige Ausbau an erneuerbaren Energiequellen?

## 2 Ausgangssituation

Wie einleitend angedeutet, können Taxiflotten einen grundlegenden Baustein für die Erhöhung der Lebensqualität im urbanen Raum bilden, sofern diese auf rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen beruhen. Diese Chance haben bereits einige europäische Großstädte<sup>8</sup> erkannt und mit dem Aufbau und der Förderung erster Demonstrationsprojekte begonnen. Sie sollen im Rahmen ihrer Durchführung das Potenzial von E-Taxis demonstrieren, Lösungsansätze für bestehende Hürden aufzeigen und nachfolgenden Initiativen als Vorbilder dienen.

Bevor jedoch auf konkrete Ergebnisse eingegangen wird, sollen die nachfolgenden Erläuterungen dazu dienen, die wesentlichen Begriffe und Aspekte zur Elektromobilität im Allgemeinen sowie zum Taxigewerbe im Speziellen zu erörtern und somit eine fundierte Ausgangslage für die nachfolgenden Untersuchungen herzustellen.

Zu Beginn dieses Kapitels wird eine Abgrenzung des Begriffs „Elektromobilität“ im Hinblick auf den betrachteten Kontext vorgenommen und ein Überblick zu „Stand der Technik“ von Elektrofahrzeugen und Ladeinfrastruktur gegeben. Diesbezüglich werden primär die Aspekte rund um das Thema „Laden“ fokussiert. Da sich der Inhalt der vorliegenden Arbeit konkret mit der Umstellung konventioneller Taxis auf rein elektrisch betriebene Fahrzeuge beschäftigt, werden anhand des Beispiels „Stadt Wien“ eine grundlegende Charakterisierung des Taxigewerbes vorgenommen und die relevanten Begriffe erläutert. Eine Abgrenzung zu verwandten Publikationen wird an zweckmäßiger Stelle, am Ende des Kapitels 3 „Mobilitätsdatengrundlage“, nachgeholt.

### 2.1 Elektromobilität – Eine Begriffsabgrenzung

Für den Begriff „Elektromobilität“ gibt es keine allgemeingültige bzw. universell einsetzbare Definition, da die Art und Weise der Unterscheidung auf vielen Grundlagen/Merkmalen beruhen kann. Deshalb werden im Folgenden verschiedene Perspektiven des Begriffes „Elektromobilität“ vorgestellt und danach eine Begriffsabgrenzung im Kontext dieser Arbeit durchgeführt.

---

<sup>8</sup> Darunter sind auch die Großstädte Wien und Graz. Im Rahmen des Programms „E-Mobilität für alle: Urbane Elektromobilität“ wurden zwei Demonstrationsprojekte „KombiMo II“ (Graz) und „eTaxi für Wien“ mit rund 40 E-Taxis durchgeführt (2015-2018).

Wie im ersten Kapitel bereits einleitend beschrieben, stellt die „Elektromobilität“ in Bezug auf ein modernes, effizientes und bedarfsgerechtes Gesamtverkehrssystem einen wesentlichen Lösungsbaustein dar und kann ganz allgemein als Querschnittsmaterie der Themenfelder „Verkehr“, „Energie“ und „Umwelt“ angesehen werden [11].

Desgleichen umfasst der Begriff „Elektromobilität“ die Gesamtheit aller motorisierten Verkehrsmittel, die zur Gänze oder zumindest teilweise elektrisch angetrieben werden. Dabei ist es zunächst irrelevant, ob das Fahrzeug ein- oder mehrspurig ausgeführt ist, ob sich das E-Fahrzeug in der Luft, auf dem Wasser oder zu Lande fortbewegt und ob es zum Transport von Gütern oder Personen eingesetzt wird.

Im Kontext dieser Arbeit liegt der Fokus jedoch auf E-Taxis und somit auf straßengebundenen, mehrspurigen E-Fahrzeugen – insbesondere auf elektrisch angetriebenen PKW.

Einen weiteren, ebenfalls relevanten Aspekt im Rahmen der Begriffsbestimmung „Elektromobilität“ stellt die zugrunde gelegte Antriebstechnologie dar. Hier ist zwischen diversen Hybridkonzepten (HEV, PHEV & REEV) sowie rein elektrischen Antriebssträngen mit Batterien (BEV) und Brennstoffzellen (FCEV) zu unterscheiden. Demzufolge wird im anschließenden Kapitel ein Überblick der elektromobilen Antriebstechnologien gegeben.

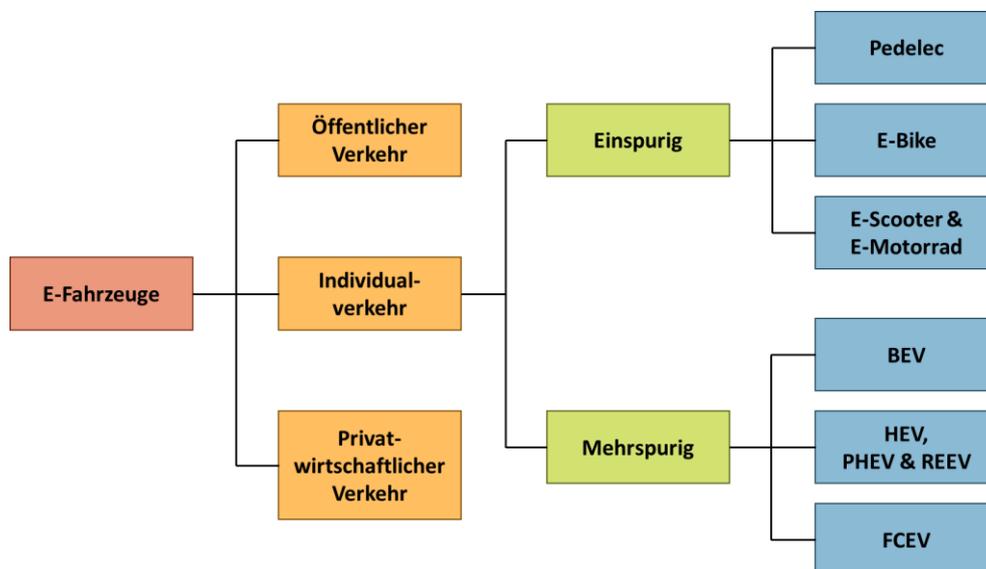


Abbildung 2-1: Begriffsabgrenzung „Elektrofahrzeuge“

In den nachfolgenden Analysen werden jedoch aufgrund der gesteckten Zielsetzungen ausschließlich batterieelektrische Taxis betrachtet. Hybridelektrofahrzeuge werden zwar

bereits erfolgreich im Taxibetrieb eingesetzt, weisen jedoch weiterhin lokale Emissionen auf und sind deshalb kein Teil der in der vorliegenden Arbeit angestrebten Untersuchungen. Brennstoffzellenfahrzeuge finden hingegen keine Berücksichtigung, da ihr spezieller Infrastrukturbedarf eine eigene spezifische Betrachtung erfordert und den hier aufgespannten Rahmen sprengen würde.

Bei rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ist darüber hinaus der gesamte Energiebedarf vorab „extern“ zuzuführen und kann nicht aus konventionellen Treibstoffen „intern“ während der Fahrt umgewandelt und zur Verfügung gestellt werden. Angesichts dieser Tatsache (der Notwendigkeit des Ladens) wird in den darauffolgenden Kapiteln ebenfalls der Stand der Technik aktuell eingesetzter Ladeinfrastruktur betrachtet und ein Abriss bezüglich Ladetechnologien und Ladesteckvorrichtungen sowie Antriebsbatterien und deren Ladeverfahren gegeben.

## 2.2 Elektrofahrzeuge

Wie im Absatz zuvor dargelegt, werden in der vorliegenden Arbeit ausschließlich batterieelektrische PKW berücksichtigt. Andere E-Fahrzeuge, die in Mobilitätskonzepten moderner Städte zwar ebenso wichtige Rollen spielen, wie z. B. U-Bahnen, Straßenbahnen, E-Busse, E-Scooter sowie E-Bikes und Padelecs (vergleiche Abbildung 2-1), werden allerdings – aufgrund des hier fokussierten Themenbereichs „E-Taxi“ – nicht weiter betrachtet.

Ungeachtet der Einschränkung auf batterieelektrische PKW werden zum Zweck einer klaren Abgrenzung die wichtigsten automobilen Antriebstechnologien charakterisiert. Grob lassen sie sich in die beiden Kategorien „konventionell“ und „elektromobil“ unterteilen. Dabei beziehen sich die konventionellen Antriebskonzepte auf jene Fahrzeuge, die mit herkömmlichen sowie verbrauchsoptimierten Verbrennungsmotoren ausgestattet sind.

Unter den Begriff „elektromobile Antriebstechnologien“ fallen hingegen alle Fahrzeuge, die zumindest teilweise elektrisch angetrieben werden. Durch die Kombination aus Verbrennungs- und Elektromotor ergeben sich viele Variationsmöglichkeiten, wie Hybridelektrofahrzeuge, batterieelektrische Fahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge (vergleiche Abbildung 2-2).

Dabei können elektromobile Antriebstechnologien nicht nur zum Umweltschutz beitragen (z. B. aufgrund ihres CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzials bei Nutzung erneuerbarer Energiequellen), sondern weisen noch weitere Vorteile auf [12]:

- Großes Drehmoment und max. Beschleunigung auch bei niedrigen Drehzahlen
- Geringere Betriebs- und Wartungskosten
- Sehr geringe Lärmbelastung vor allem im Stadtverkehr
- Bei rein elektrischen Fahrzeugen: Lokale Emissionsfreiheit
- Bei Hybridelektrofahrzeugen: Minimierung von Benzinverbrauch und Emissionen

Nachfolgend werden die charakteristischen Eigenschaften der einzelnen elektromobilen Antriebstechnologien dargestellt, die Vor- und Nachteile zusammengefasst und beispielhaft einige zugehörige Fahrzeugmodelle aufgelistet.

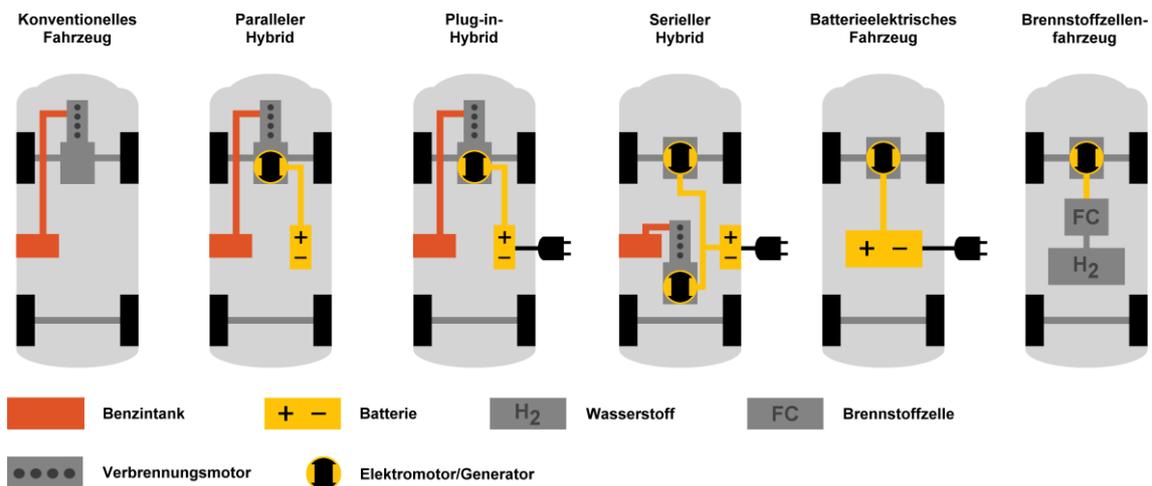


Abbildung 2-2: Varianten elektromobiler Antriebstechnologien (Quelle: [13], eigene Darstellung).

### 2.2.1 Hybridelektrofahrzeuge (HEV<sup>9</sup>)

Sie besitzen eine Kombination aus Verbrennungskraftmaschinen (VKM), Elektromotoren und Energiespeichern (zumeist Batterien<sup>10</sup>). Dabei erlauben die Hybridtechnologien u. a. eine Verbesserung der Effizienz, eine Verringerung des fossilen Kraftstoffverbrauchs und/oder eine Leistungssteigerung im niedrigen Drehzahlbereich [14].

<sup>9</sup> Hybrid electric vehicle

<sup>10</sup> Der Begriff „Batterie“ wird hier allgemein als Zusammenschaltung von Primär- oder Sekundärzellen verstanden.

In Bezug auf Hybridelektrofahrzeuge wird u. a. nach Antriebsweise bzw. Topologie des Antriebsstranges unterschieden und dabei von parallelen, seriellen und leistungsverzweigten Hybriden gesprochen. Darüber hinaus wird je nach Hybridisierungsgrad, dem Verhältnis aus elektrischer Leistung zur Gesamtleistung (Elektro- plus Verbrennungsmotoren), zusätzlich nach Mikro-, Mild- und Vollhybrid unterschieden.

Bei einem parallelen Hybrid werden VKM und Elektromotor entlang des Antriebsstranges verbunden. Sie arbeiten sozusagen nebeneinander. Damit können beide Motoren zugleich auf den Antriebsstrang wirken und die Zugkräfte, Drehmomente bzw. Drehzahlen der einzelnen Antriebe addieren sich [15]. Je nach Betriebszustand wird rein elektromotorisch, im Verbund oder nur mit dem Verbrennungsmotor gefahren. Aus diesem Grund kann die Leistung des E-Motors vergleichsweise gering ausfallen.

Beim seriellen Hybrid besteht hingegen zwischen Verbrennungsmotor und der eigentlichen Antriebsachse keinerlei mechanische Verbindung. Die VKM wird lediglich über einen Generator zum Laden des integrierten Energiespeichers verwendet und kann so in einem optimalen Drehzahlbereich betrieben werden. Demzufolge muss der Elektromotor alleine den Antrieb übernehmen und die dafür nötige Leistung auch kontinuierlich abgeben können. Der E-Motor muss somit entsprechend dimensioniert werden und fällt relativ zu jenen der parallelen Hybride stärker aus. [15]

Besitzen die eingebauten Verbrennungs- und Elektromotoren ähnliche Leistungswerte, so werden diese seriellen Hybridelektrofahrzeuge sinnbildlich als Leistungshybride bzw. serielle Eins-zu-Eins-Hybride bezeichnet. Wird hingegen ein entsprechendes Downsizing der VKM betrieben, dann muss der Elektroantrieb als Hauptaggregat agieren. Diese Variante wird dementsprechend als Elektrofahrzeug mit Reichweitenverlängerung (REEV<sup>11</sup>) genannt. Dabei bestimmt zwar weiterhin der Kraftstofftank die Gesamtreichweite des Fahrzeugs, jedoch steht bei annähernd leerer Batterie nur mehr die beschränkte Leistung des Verbrennungsmotors zur Verfügung. [16]

Die dritte Variante ist der sogenannte leistungsverzweigte Hybrid (oder Mischhybrid). Dabei wird die zu übertragende mechanische Leistung der VKM mittels leistungsverzweigenden Getriebes (z. B. Planetengetriebe) in einen mechanischen und einen elektrischen Pfad aufgeteilt. Gemeinsam mit einer automatisch betätigten Kupplung kann somit die serielle mit der parallelen Systemstruktur kombiniert und die Vorteile beider ausgenutzt werden. Hierbei wird die VKM entsprechend der gewählten Betriebsart und des aktuellen Fahrzustandes entweder mittels Generators zum Laden der Batterie genutzt und der Elektromotor übernimmt alleine den Antrieb (serieller Hybrid), oder

---

<sup>11</sup> Range-extended electric vehicle

beide Motoren sind mechanisch mit den Antriebswellen gekoppelt (paralleler Hybrid). Nachteile der leistungsverzweigten Hybriden sind hingegen die aufwendige Konstruktion und der Einsatz von zwei elektrischen Maschinen. [16]

Wie bereits angemerkt wird je nach Hybridisierungsgrad ebenfalls nach Mikro-, Mild- und Vollhybrid unterschieden. Dabei ist es im Prinzip belanglos ob der Hybridantrieb seriell oder parallel ausgelegt ist. Verfügt das E-Fahrzeug zusätzlich über eine Ladesteckvorrichtung zum externen Laden der Batterie an einer Ladestation, dann wird es allgemein als Plug-in-Hybrid bezeichnet.

Der Mikrohybrid verfügt lediglich über eine Start-Stopp-Automatik sowie zusätzlich über eine „Bremsenergieerückgewinnung“ (Rekuperation) zum Laden der Starterbatterie [16]. Da die elektrische Energie jedoch nicht zum Fahrzeugantrieb eingesetzt wird, ist der Mikrohybrid kein Hybridelektrofahrzeug im klassischen Sinn. Die beiden Modifikationen des Mikrohybrid werden primär zur Kraftstoffeinsparung von 5-10 % [14] und Schadstoffreduktion verwendet. Mikrohybride werden je nach Hersteller unter verschiedenen Bezeichnungen geführt, wie VW BlueMotion, BMW EfficientDynamics, Seat Ecomotive, Audi ultra oder Mercedes-Benz BlueEFFICIENCY.

Der Mildhybrid (z. B. Mercedes-Benz S 400 Hybrid, Peugeot 3008 Hybrid4, Honda Insight/CR-Z [15]) weist hingegen bereits eine begrenzte elektrische Antriebsleistung auf (5-15 kW [14]), jedoch noch ohne nennenswerter elektrischer Reichweite. Dabei wird ein relativ schwacher Elektroantrieb zur Leistungssteigerung der dominanten VKM genutzt und die rekuperierte Bremsenergie in einer eigenen Antriebsbatterie (zusätzlich zur Starterbatterie, < 5 kWh [16]) gespeichert. Der Mildhybrid verfügt ebenfalls über eine Start-Stopp-Automatik. Darüber hinaus besitzt er eine spürbare Verbrauchsreduktion. Die Kraftstoffeinsparung liegt bei etwa 5-20 % [14, 15] und hängt in erster Linie von der Leistung des E-Motors und der nutzbaren Batteriekapazität ab [16]. Nachteilig sind die höheren Batteriekosten sowie das Mehrgewicht und der größere Platzbedarf durch die zusätzlich benötigten Komponenten. Mildhybride werden vorwiegend mit einem parallelen Hybridantrieb ausgeführt [15].

Die nächste Erweiterung bezüglich Hybridisierungsgrad (mit ca. 10-50 % [15]) wird durch die Vollhybride dargestellt. Sie verfügen nicht nur über die Funktionalitäten des Mildhybrids sondern ebenfalls über einen leistungsstärkeren Elektromotor (> 25 kW [15]) und eine Batterie mit größerer Kapazität (< 8 kWh [16]). Damit wird die Durchführung von rein elektromotorischen Fahrten ermöglicht – wenn auch vorerst nur über geringe Distanzen.

Die Vollhybride besitzen grundsätzlich ein hohes Einsparungspotenzial in der Stadt und ermöglichen lokal emissionsfreies Fahren. Jedoch stehen den Vorteilen ein hoher

technischer und finanzieller Aufwand, ein geringes Einsparungspotenzial auf Langstrecken und zusätzlich benötigtes Gewicht gegenüber. [15]

Vollhybride können grundsätzlich mit seriellen, parallelen und leistungsverzweigten Hybridantrieben ausgestattet sein. Im E-PKW-Segment wird in erster Linie letztere Variante eingesetzt. Prominentestes Beispiel ist sicherlich der Toyota Prius (aktuelles Modell „IV“, Facelift seit 2019).

Beim sogenannten Plug-in-Hybridelektrofahrzeug (PHEV<sup>12</sup>) besteht außerdem die Möglichkeit die Batterie „extern“ mittels Ladestation zu laden. Somit muss die Energie zum rein elektromotorischen Fahren nicht mehr alleinig durch die VKM zur Verfügung gestellt werden. Daraus resultiert eine weitere Senkung des Kraftstoffverbrauchs (bis ca. 50 % [15]). Darüber hinaus liegen die Werte der Batteriekapazität mit 5-15 kWh und die des Hybridisierungsgrads (etwa 30-80 %) meist zwischen jenen der Vollhybride und jenen von batterieelektrischen Fahrzeugen. Damit können noch längere Strecken ausschließlich im Elektrobetrieb durchführen werden [15]. Dies hat andererseits jedoch ein entsprechendes Zusatzgewicht der größeren Batterie und höhere Herstellungskosten zur Folge. Aktuelle Beispiele für PHEV sind laut [17] z. B. Mitsubishi Outlander PHEV, Mini Countryman PHEV, VW Passat & Golf GTE, Mercedes E300e / de PHEV, BMW 530e, Volvo V60 PHEV oder Audi A3 eTron.

### 2.2.2 Brennstoffzellenelektrofahrzeuge (FCEV)

Wie beim seriellen Hybrid wird lediglich der Elektromotor zum Antrieb des Fahrzeuges herangezogen. Jedoch kommt zum Laden der Batterie kein Verbrennungsmotor, sondern ein Brennstoffzellensystem zum Einsatz. Dabei hat die Brennstoffzelle die Aufgabe, die elektrische Energie für den Antrieb bereitzustellen. Die Energie wird in Form von Wasserstoff im Fahrzeug gespeichert und bei Bedarf in der Brennstoffzelle in Strom umgewandelt. Die Speicherung des Wasserstoffs erfolgt hierbei entweder bei extrem niedrigen Temperaturen oder bei sehr hohem Druck. [18]

Analog zu den Varianten der Hybride werden die Batterien der FCEV ebenfalls unterschiedlich dimensioniert. Wird die Brennstoffzelle lediglich zur Reichweitenverlängerung eingesetzt, dann kommt eine größere Batterie meist mit Plug-in-Funktion zum Einsatz. Der Vorteil gegenüber VKM-basierten Range-Extendern liegt darin, dass mittels Brennstoffzelle auch lange Strecken lokal emissionsfrei zurückgelegt werden können. Die

---

<sup>12</sup> Plug-in hybrid electric vehicle

Nachteile der Brennstoffzellenelektrofahrzeuge sind weiterhin u. a. die teure Technologie, die energieintensive Wasserstoffherstellung und die fehlende Infrastruktur. [18]

Als aktuelle Beispiele für Brennstoffzellenfahrzeuge können u. a. der Hyundai ix35 Fuel Cell bzw. Nexo (1,56 kWh LiPo), der Toyota Mirai (1,6 kWh NiMH) und der Honda FCX Clarity bzw. Clarity Fuel Cell (1,7 kWh LiPo) genannt werden. Diese FCEV besitzen relativ kleine Batterien<sup>13</sup> ohne Plug-in-Funktion.

### 2.2.3 Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)

Diese besitzen im Gegensatz zu den Hybridelektrofahrzeugen und ebenso wie Brennstoffzellenelektrofahrzeuge keinen Verbrennungsmotor, wodurch sich zusätzliches Gewicht einsparen lässt. Darüber hinaus entfallen beim batterieelektrischen Fahrzeug herkömmliche Bestandteile wie Getriebe, Kupplung, Abgasanlage und Treibstofftank. Der Antrieb des E-Fahrzeugs erfolgt ausnahmslos mittels Elektromotor<sup>14</sup>. Es ergibt sich damit ein relativ einfacher Systemaufbau mit den Komponenten „E-Motor“, „Batteriespeicher“ und „Steuergerät“. Im Vergleich zum HEV kann beim BEV die Batterie nur mehr über „externe“ Ladestationen und nicht während der Fahrt „intern“ geladen werden. Daraus ergeben sich Nachteile wie die begrenzte Reichweite (u. a. aufgrund der gegebenen Kosten sowie der Energie- und Leistungsdichte der Antriebsbatterie), die relativ lange Ladedauer – im Vergleich zum Tanken von konventionellen Treibstoffen – sowie die (derzeit noch) eingeschränkte Verfügbarkeit von Ladeinfrastruktur. [14]

Diesen Nachteilen stehen jedoch deutliche Vorteile gegenüber. Zusätzlich zu den bereits genannten sind dies u. a. [14]:

- Einsatz nur einer Antriebsquelle – im Vergleich zu Hybridelektrofahrzeugen
- Hoher Wirkungsgrad entlang des Antriebsstrangs
- Geräusch- und vibrationsarm
- Bessere Zugkraft bei niedrigen Geschwindigkeiten – im Vergleich zur VKM
- Geringere Wartung aufgrund des einfacheren Fahrzeugaufbaus
- Niedrige variable Mobilitätskosten (Energie)
- Lokale Emissionsfreiheit
- Hohes CO<sub>2</sub>-Einsparungspotenzial bei Strombezug aus regenerativen Energiequellen.

---

<sup>13</sup> Die Batteriekapazitäten entsprechen den Herstellerangaben.

<sup>14</sup> Deshalb wird die Bezeichnung „batterieelektrisches Fahrzeug“ in der vorliegenden Arbeit mit dem Begriff „rein elektrisch angetriebenes Fahrzeug“ synonym gebraucht.

Abbildung 2-3 stellt die für das Jahr 2019 in Europa beliebtesten BEV nach ihrem Marktanteil dar (Neukauf). 2019 wurden in der EU insgesamt rund 240.000 BEV verkauft [17]. Die Batteriekapazitäten aktueller BEV liegen laut Herstellerangaben im Bereich zwischen 36 kWh (VW eGolf) und 62 kWh (Hyundai Kona BEV) bei einem Kaufpreis unter 50.000 € (ohne Förderung und bei Batteriekauf)<sup>15</sup>. In Bezug auf die maximale Reichweite ergeben sich laut den Angaben der Hersteller bei idealen Verkehrsbedingungen, Fahrzeugausstattungen und optimaler Fahrweise Größenordnungen zwischen 300 und 450 km (nach WLTP<sup>16</sup>).

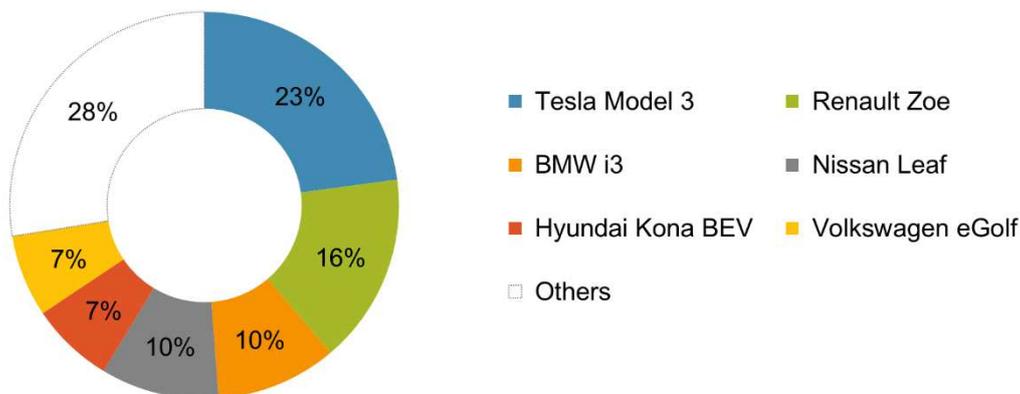


Abbildung 2-3 Marktanteile der fünf am häufigsten im Jahr 2019 gekauften batterieelektrischen Fahrzeuge der Klasse M1<sup>17</sup> in der EU (Quellen: [17], eigene Darstellung)

## 2.3 Ladeinfrastruktur

Ein zentraler Aspekt für die zeitnahe Verbreiterung der Elektromobilität und somit auch für eine erfolgreiche Integration von E-Taxis im urbanen Raum ist neben der Fahrzeugtechnik ebenfalls der Aufbau einer adäquaten Energieversorgung sowie die Bereitstellung der erforderlichen Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT). Darüber hinaus muss eine entsprechende Interoperabilität von E-Fahrzeugen verschiedener Hersteller und Ladeinfrastruktur unterschiedlicher Betreiber sichergestellt werden. Dies bedarf wiederum einer einheitlichen, technischen Spezifikation der Ladeinfrastruktur

<sup>15</sup> Im Umsetzungsprojekt "eTaxi für Wien" konnten mit E-Taxis im Realbetrieb Kostenreduktionen im Vergleich zu konventionellen, fossil-betriebenen Taxifahrzeugen derselben Fahrzeugklasse von etwa 10-15 % erzielt werden [34].

<sup>16</sup> [Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure](#)

<sup>17</sup> Personenkraftwagen (PKW) und Kombinationskraftwagen (Kombis)

einschließlich Ladesteckvorrichtungen und -betriebsarten, aber auch der Authentifizierungsvarianten, Bezahlmöglichkeiten und Abrechnungsarten. Dabei müssen die Normung und Standardisierung sicherstellen, dass zum Anwender bzw. zur Anwenderin hin eine einheitliche und komfortabel nutzbare sowie sichere Ladeschnittstelle geschaffen wird. [19]

Zu diesem Zweck wurde bereits im Jahr 2014 eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe verabschiedet. Darin sind Mindestanforderungen und gemeinsame technische Spezifikationen für die Errichtung der Infrastruktur für Elektrofahrzeuge sowie Vorgaben für die NutzerInneninformation festgelegt. [20]

Diesbezüglich wird nachfolgend ein Überblick der möglichen Ladetechnologien gegeben (wie konduktives und induktives Laden), die genormten Ladebetriebsarten (bezüglich AC- und DC-Laden) erläutert sowie die von der Europäischen Union empfohlenen Mindestanforderungen an Ladesteckvorrichtungen beschrieben.

Themen wie Roaming zwischen verschiedenen Betreibern, Verrechnung der Ladevorgänge, Kommunikation (u. a. zwischen E-Fahrzeug, Ladestation und Backendsystem) oder Ladesteuerung (Last- und Energiemanagement) werden im Verlauf der vorliegenden Arbeit an gegebenen Stellen erläutert, jedoch überwiegend am Rande behandelt.

### 2.3.1 Ladetechnologien für Elektrofahrzeuge

Wie zuvor definiert, werden im Verlauf der Arbeit ausschließlich batterieelektrische Fahrzeuge betrachtet. Da diese über keinen Verbrennungsmotor zum Laden der Antriebsbatterie verfügen, muss der gesamte Energiebedarf des elektrischen Antriebs von „extern“ zugeführt werden. Dabei kann das Laden der Antriebsbatterien grundsätzlich auf verschiedene Arten erfolgen [21]:

- Beim (kabelgebundenen, konduktiven) Wechselstromladen sitzt die Ladeeinheit im E-Fahrzeug. Diese wandelt den im Versorgungsnetz verfügbaren Wechselstrom in den zum Laden benötigten Gleichstrom um. Das E-Fahrzeug wird dabei mittels einer geeigneten Ladestation ein- oder dreiphasig mit dem Wechselspannungsnetz verbunden.
- Beim (kabelgebundenen, konduktiven) Gleichstromladen befindet sich die dafür notwendige Ladeeinheit außerhalb des E-Fahrzeuges. Das E-Fahrzeug wird direkt von der DC-Ladestation mit einem vom E-Fahrzeug angeforderten Gleichstrom versorgt.

- Beim induktiven Laden erfolgt die Energieübertragung kabellos mit Hilfe eines elektromagnetischen Feldes ähnlich wie bei einem Induktionskochfeld oder einer elektrischen Zahnbürste.

Darüber hinaus ist ebenfalls ein Batteriewechsel möglich. Hierbei wird das gesamte Batteriesystem aus dem Fahrzeug entfernt und durch ein geladenes Batteriesystem ersetzt. Diese Methode der Energiezufuhr ermöglicht das Ersetzen einer entladenen Batterie durch eine vollgeladene innerhalb weniger Minuten. Analoges gilt für das Laden mittels Elektrolytaustausch („Redox-Flow“). Die letzten beiden sowie andere Formen der Energieübertragung erscheinen laut [19] zurzeit jedoch nicht praktikabel bzw. besitzen noch kein funktionierendes Geschäftsmodell.

In der vorliegenden Arbeit wird primär kabelgebundenes Laden betrachtet, da für diese Technologie entsprechende Elektrofahrzeuge sowie Ladestationen (AC- und DC-Laden) kommerziell verfügbar sind und die Angebotspalette diesbezüglich kontinuierlich mit neuen Produkten ergänzt wird. Eine unmittelbare Umsetzung ist somit realisierbar.

Eine Ladestation<sup>18</sup> beinhaltet allgemein einen oder mehrere Ladepunkte mit identen oder unterschiedlichen Ausführungen. Da der Ladepunkt die kleinste Einheit darstellt, kann an ihm gleichzeitig jeweils nur ein E-Fahrzeug geladen werden. Bezüglich der Montage von Ladestationen können prinzipiell zwei verschiedene Arten unterschieden werden, die stehend montierte Ladesäule und die wandmontierte Wallbox. Diese bieten je nach Modell unterschiedliche Ladeleistungen. [21]

Dabei hat die Höhe der Ladeleistung direkten Einfluss auf die Ladedauer. Beim einphasigen AC-Laden mit einer max. Stromstärke von 16 A und einer Netzspannung von 230 V (Außen- zu Neutraleiter) können demzufolge höchstens 3,7 kWh je Stunde geladen werden. Damit bei Elektrofahrzeugen mit größeren Batteriekapazitäten dennoch akzeptable Reichweiten innerhalb einer angemessenen kurzen Ladedauer ermöglicht werden, kommen dreiphasiges AC-Laden oder DC-Laden zum Einsatz.

---

<sup>18</sup> In der englischsprachigen Fachliteratur werden für die Begriffe „Elektrofahrzeug“ und „Ladestation“ vorrangig die Bezeichnungen „electric vehicle“ (EV) und „electric vehicle supply equipment“ (EVSE) verwendet.

Eine mögliche Nomenklatur in Bezug auf die Unterscheidung nach Ladeleistungen bzw. Leistungsklassen kann wie folgt getroffen werden (unabhängig von den im Anschluss erläuterten Ladebetriebsarten):

- Normalladen: < 11 kW
- Beschleunigtes Laden: 11 kW bis < 22 kW
- Schnellladen: 22 kW bis < 150 kW
- Ultra-Schnellladen: 150 kW und darüber hinaus

Die unterschiedlichen Arten des kabelgebundenen AC- und DC-Ladens werden in der relevanten Europäischen Norm spezifiziert und auf nationaler Ebene in der unveränderten österreichischen Fassung ÖVE/ÖNORM EN 61851-1 [22]<sup>19</sup> als „Ladebetriebsarten“ (engl. charge mode) bezeichnet. Dabei beziehen sich die Ladebetriebsarten 1 bis 3 auf AC-Laden und die Ladebetriebsart 4 auf das DC-Laden. Nachfolgend werden die vier Ladebetriebsarten charakterisiert, wobei die Beschreibungen auf den Ausführungen von [21] beruhen und die Zusammenfassungen der Spezifikationen aus [19] entlehnt wurden.

### **Ladebetriebsart 1**

Das Laden mit Wechselstrom (AC-Laden) an einer „Haushaltssteckdose“ oder einer anderen ein- bzw. dreiphasigen CEE-Steckdose wird als Ladebetriebsart 1 bezeichnet. Bei dieser Ladebetriebsart findet keine Kommunikation zwischen (Haushalts-)Steckdose und E-Fahrzeug statt und es befinden sich keinerlei Schutzeinrichtungen im Ladekabel.

*Spezifikationen der Ladebetriebsart 1 (laut [19]):*

- AC-Laden an standardmäßiger Haushaltssteckdose mit bis zu 16 A
- 250 V (AC) einphasig oder 480 V (AC) dreiphasig<sup>20</sup>
- Keine Sicherheitseinrichtungen im Ladekabel vorgeschrieben
- Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD, engl. Residual Current Device) in der vorgelagerten Hausinstallation wird zwingend vorausgesetzt
- Ohne Rückspeisung und ohne Kommunikation

---

<sup>19</sup> Nachfolgenorm: OVE EN 62752 (teilweise) [23]

<sup>20</sup> Die angegebenen Spannungspegel beziehen sich auf die Normenreihen IEC 61851 und IEC 62196 (bzw. deren Nachfolgern). In Deutschland und Österreich gelten die Normspannungen 230 V / 400 V gemäß IEC 60038 [114].

Die Ladebetriebsart 1 wird durch europäische Automobilhersteller heutzutage nicht mehr unterstützt und wurde früher vorrangig bei Elektrofahrzeugen der ersten Fahrzeuggeneration eingesetzt. Sie ist hier nur der Vollständigkeit halber angeführt.

## **Ladebetriebsart 2**

Der wesentliche Unterschied zur Ladebetriebsart 1 besteht in der im Ladekabel integrierten Steuer- und Schutzeinrichtung („In Cable Control and Protection Device“ IC-CPD [23], siehe Abbildung 2-4). Dabei erfolgt über das Pilotsignal ein Informationsaustausch sowie die Überwachung der Schutzleiterverbindung (jeweils zwischen Infrastruktur und Elektrofahrzeug). Darüber hinaus bietet die IC-CPD z. B. beim Laden an einer unbekannt Installation Schutz vor elektrischem Schlag bei Isolationsfehlern.

Diese Ladebetriebsart ist lediglich für Fälle vorgesehen, in denen keine spezielle Ladestation der Ladebetriebsarten 3 oder 4 verfügbar ist, und ihre Anwendung stellt heutzutage bereits eine Ausnahme dar.

*Spezifikationen der Ladebetriebsart 2 (laut [19]):*

- AC-Laden an standardmäßiger Haushaltssteckdose mit bis zu 32 A
- 250 V (AC) einphasig oder 480 V (AC) dreiphasig<sup>20</sup>
- In-Cable Control and Protection Device (IC-CPD): Ladekabel mit folgenden Sicherheitseinrichtungen: IC-CPD, Control Pilot und Proximity
- Ohne Rückspeisung; Kommunikation jedoch über Control Pilot zwischen IC-CPD und Elektrofahrzeug möglich



Abbildung 2-4: Ladekabel für Ladebetriebsart 2 mit kabelintegrierter Schutz- und Steuereinrichtung IC-CPD (links) und für Ladebetriebsart 3 (rechts, Quelle: jeweils Fa. Mennekes, [24])

### **Ladebetriebsart 3**

Im Rahmen der Ladebetriebsart 3 findet das Laden ebenfalls mit Wechselstrom aber an einer zweckgebundenen („dedicated“) Ladesteckvorrichtung statt, die sich an einer am Stromnetz fest installierten Ladestation (Ladesäule oder Wallbox) befindet. Je nach Ausführung kann an der Ladestation auch ein fix montiertes Ladekabel vorhanden sein. Eine Steuerung des Ladevorgangs wird durch Datenaustausch zwischen der Ladestation und dem Elektrofahrzeug ermöglicht. Die Kommunikation erfolgt dabei entweder mittels Pulsweitenmodulation (PWM) gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61851-1 [22]<sup>21</sup> oder optional per „Power-Line-Kommunikation“ (PLC) gemäß ÖNORM EN ISO 15118-1 [25].

Die Ladebetriebsart 3 basiert auf einer speziell für Elektrofahrzeuge errichteten Infrastruktur und bietet ein hohes Maß an elektrischer Sicherheit. Deshalb wird diese Ladebetriebsart auch empfohlen und von allen aktuell am Markt verfügbaren elektrisch betriebenen PKW unterstützt (zumindest in Europa). Ein Ladekabel mit IC-CPD ist bei der Ladebetriebsart 3 nicht erforderlich (vergleiche Abbildung 2-4).

*Spezifikationen der Ladebetriebsart 3 (laut [19]):*

- AC-Laden an speziellen Ladestationen mit bis zu 63 A
- 250 V (AC) einphasig oder 480 V (AC) dreiphasig<sup>20</sup>
- Ladekabel mit Stecker nach OVE EN 62196-2 [26]
- Kein IC-CPD im Ladekabel erforderlich, da Sicherheitseinrichtungen fester Bestandteil der Ladestation sind
- Steckerverriegelung ermöglicht unbeaufsichtigten Betrieb auch im öffentlichen Umfeld<sup>22</sup>
- Im Gegensatz zu den Ladebetriebsarten 1 und 2 ist eine Rückspeisung vom E-Fahrzeug ins Stromnetz grundsätzlich möglich, da durchgehende bidirektionale Kommunikation, Steuerung und Steckerverriegelung vorhanden sind

### **Ladebetriebsart 4**

Sie bezeichnet das kabelgebundene DC-Laden und stellt eine Alternative zur Ladebetriebsart 3 dar. Bei dieser Ladebetriebsart wird das Ladegerät nicht im Elektrofahrzeug dauerhaft mitgeführt, wodurch sich eine deutliche Gewichtsreduktion und Bauraumeinsparung im Vergleich zum AC-Laden ergeben. Ein weiterer Vorteil der Ladebetriebs-

---

<sup>21</sup> Nachfolgenorm: OVE EN 62752 (teilweise) [23]

<sup>22</sup> Sie vermeidet darüber hinaus die Lichtbogenbildung beim Abziehen des Fahrzeugsteckers während des Ladevorganges.

art 4 besteht darin, dass mit der externen Ladetechnik eine größere Bauraumverfügbarkeit einhergeht und leistungsstärkere Komponenten verwendet werden können. Somit bieten DC-Ladestationen die Möglichkeit, höhere Ladeleistung zur Verfügung zu stellen und dadurch die Ladedauer wesentlich zu verkürzen. DC-Laden stellt zwar eine kostenintensive Ladetechnik dar, der Kaufpreis der einzelnen Elektrofahrzeuge wird dadurch aber nicht erhöht, sondern über die Nutzung der Ladestation auf viele E-FahrzeugnutzerInnen aufgeteilt.

Bei der Ladebetriebsart 4 existiert eine digitale Kommunikation zwischen Ladestation und E-Fahrzeug. Diese wird genutzt, um die Höhe der Ladespannung und des Ladestroms nach den Anforderungen des E-Fahrzeugs zu übertragen. Zusätzlich werden einerseits erweiterte Anforderungen an die Ladesteckvorrichtung bzw. das Kontaktsystem gestellt, damit es auch bei einer Stromstärke  $> 100 \text{ A}$  zu keiner unerlaubten Erwärmung kommt, und andererseits erweiterte Maßnahmen zur Vermeidung des Trennens unter Last vorgenommen.

Darüber hinaus muss beim DC-Laden die ladestationsseitige Ladesteckvorrichtung stets fest mit der Ladestation verbunden sein. Im Falle des AC-Ladens (Ladebetriebsart 3) kann hingegen das Ladekabel wahlweise transportabel oder fix an der Ladestation montiert ausgeführt werden.

*Spezifikationen der Ladebetriebsart 4 (DC-Laden mit Off-Board-Ladegerät, laut [19]):*

- DC-Laden an speziellen Ladestationen, zumeist (Ultra-)Schnellladestationen
- Ladespannung und Ladestrom systemabhängig, daher Standardisierungsbedarf
- Ladekabel mit Energie- und Steuerleitungen
- Komplexe Schutzfunktionen aufgrund DC erforderlich, z. B. Isolationsüberwachung

Abgesehen von den beschriebenen Ladebetriebsarten sind ebenfalls diverse Ladesteckvorrichtungen auf europäischer Ebene genormt sowie per EU-Richtlinie verordnet. Die aktuell wichtigsten Ladesteckvorrichtungen werden im folgenden Abschnitt näher betrachtet.

### **2.3.2 Ladesteckvorrichtungen für die Elektromobilität**

Das Laden eines Elektrofahrzeugs kann abhängig von der jeweiligen Ladebetriebsart mit unterschiedlichen Ladesteckvorrichtungen durchgeführt werden. Dabei beinhalten die verschiedenen Ladesteckvorrichtungen jeweils ein passendes Paar aus Stecker (plug) und Steckdose (socket outlet) bzw. Fahrzeugstecker (connector) und Fahrzeugkupplung (vehicle inlet). Diese Bezeichnungen wurden aus der mittlerweile dreiteiligen

Europäischen Norm ÖVE/ÖNORM EN 62196 [26, 27, 28] entliehen, in der die Anforderungen und Hauptmaße der Ladesteckvorrichtungen spezifiziert sind.

Die Normenreihe geht grundsätzlich auf eine Standardisierungsinitiative der International Electrotechnical Commission (IEC) zurück. Dies wurde im Jahr 2010 von der Europäischen Kommission aufgegriffen und die drei großen Normungsorganisationen in Europa – das Europäische Komitee für Normung (CEN), das Europäische Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC) und das Europäische Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) – beauftragt, einen europäischen Standard für eine adäquate Ladesteckvorrichtung zum Laden von Elektrofahrzeuge zu entwerfen. [29]

Abgesehen von den allgemeinen Anforderungen, die im Teil 1 der Norm beschrieben werden und sich auf Themen wie Berührungsschutz, Nennspannung und Stromstärke sowie Auslegung der Kontaktstifte für Signalisierungs- und Steuerungszwecke beziehen, widmen sich die Teile 2 und 3 speziell dem Laden mit Wechselstrom (AC-Laden) bzw. Gleichstrom (DC-Laden).

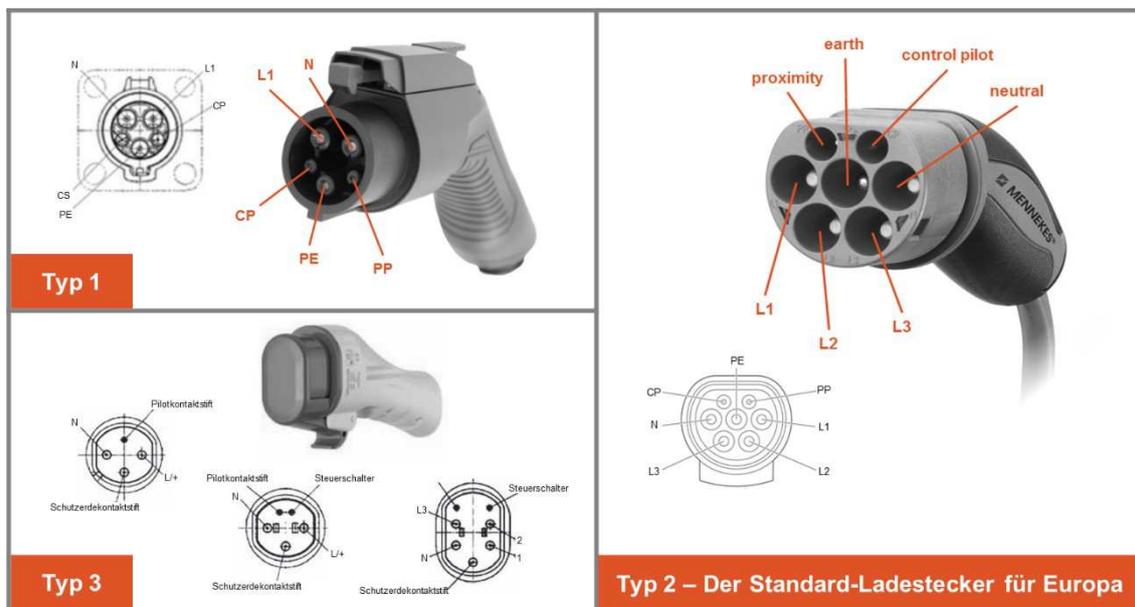


Abbildung 2-5: Übersicht der Ladesteckvorrichtungen Typ 1 bis 3 aus der zugehörigen Norm ÖVE EN 62196-2 [26] (Quelle: [30], eigene Darstellung)

### **Ladesteckvorrichtungen für AC-Laden**

Teil 2 (ÖVE EN 62196-2 [26]<sup>23</sup>) definiert u. a. die Dimensionen und die Kompatibilität zwischen den enthaltenen Ladesteckvorrichtungen für AC-Laden. Es werden dabei drei Ladesteckvorrichtungen unterschieden: Typ 1, Typ 2 und Typ 3 (siehe Abbildung 2-5).

Die Ladesteckvorrichtung Typ 1 wurde für Länder konzipiert, die im Gegensatz zu Europa kein dreiphasiges Drehstromnetz besitzen, sondern in denen die Niederspannungsnetze z. B. als Einphasen-Dreileiternetze realisiert sind. Aus diesem Grund ist die Ladesteckvorrichtung Typ 1 lediglich für einphasiges Laden konzipiert und wird bevorzugt am amerikanischen, koreanischen und japanischen Markt eingesetzt.

Die Ladesteckvorrichtung Typ 1 besitzt dabei insgesamt fünf Pins. Jeweils einen für die stromführende Phase L1, den Neutralleiter (N) und den Schutzleiter (PE, engl. protective earth). Die beiden anderen Pins dienen einerseits der Überprüfung, ob ein Ladekabel eingesteckt wurde (PP für „Proximity Pilot“ oder „Plug Present“)<sup>24</sup> sowie andererseits für die Kommunikation zwischen Elektroauto und Ladestation (CP für „Control Pilot“). [19]

Im Rahmen der bereits erwähnten Beauftragung der Europäischen Kommission wurde die Ladesteckvorrichtung Typ 2 konzipiert und genormt. Da das Europäische Niederspannungsnetz drei Phasen aufweist, erlaubt Typ 2 zusätzlich zum einphasigen auch ein dreiphasiges Laden. Deshalb besitzt die Ladesteckvorrichtung Typ 2 sieben Pins (L1, L2, L3, N, PE, PP und CP). Mittels Typ 2 können daher höhere Ladeleistungen und somit kürzere Ladezeiten erzielt werden. Bei einer Netzspannung von 230 V und einer max. zulässigen Stromstärke von 63 A je Phase ergeben sich via Typ 2 bis zu 43,5 kW an übertragener Leistung. Hingegen sind es beim Typ 1 max. 1,9 kW (L1-N, 120 V und 16 A) bzw. 19,2 kW (L1-L2, 240 V und 80 A).

Der Typ 3 beschreibt ebenso wie der Typ 2 eine Ladesteckvorrichtung für ein- und dreiphasiges Laden. Jedoch kommt dieser Typ nicht mehr zum Einsatz und ist hier nur der Vollständigkeit halber angeführt.

### **Ladesteckvorrichtungen für DC-Laden**

Teil 3 (ÖVE/ÖNORM EN 62196-3 [28]) spezifiziert vier verschiedene Ladestecksysteme für Gleichstromladen und beschäftigt sich darüber hinaus mit kombinierten AC/DC-Lade-

---

<sup>23</sup> Ersatz für ÖVE/ÖNORM EN 62196-2: 2015 01 01

<sup>24</sup> Der PP ist ebenfalls in ein „Wegfahrsperrenkonzept“ eingebunden. Damit sollen unbeabsichtigte Schäden am E-Fahrzeug, dem Ladekabel und der Ladestation verhindert werden.

schnittstellen. Die enthaltenen Ladesteckvorrichtungen tragen die technischen Bezeichnungen „Konfiguration AA“ (CHAdeMO), „Konfiguration BB“ (GB China Type), „Konfiguration EE“ (CCS Typ 1) und „Konfiguration FF“ (CCS Typ 2).

Dabei stellt die „Konfiguration BB“ eine in China verbreitete Ladesteckvorrichtung zum DC-Laden dar. Gemeinsam mit der „Konfiguration EE“ hat sie keinerlei Relevanz für den europäischen Markt. Daher werden diese beiden Ladesteckvorrichtungen in der vorliegenden Arbeit auch nicht weiter behandelt.

Hingegen entspricht die „Konfiguration AA“ dem in Japan entwickelten CHAdeMO-System, das aufgrund der frühzeitigen Markteinführung bis dato die weltweit häufigste Ladesteckvorrichtung für DC-Laden darstellt. Sie spielt in Europa in Bezug auf den aktuellen E-Fahrzeugbestand ebenfalls noch eine wesentliche Rolle. Darüber hinaus unterstützen vor allem asiatische Automobilhersteller (wie Nissan, Toyota, Honda und Mitsubishi) diese Ladesteckvorrichtung.

CHAdeMO weist neben den zwei Leistungspins weitere Signal- und Kommunikationspins auf. Aktuell ist diese Ladesteckvorrichtung für Leistungen bis 150 kW (< 350 A) definiert. Jedoch sind beim CHAdeMO-System derzeit Ladestationen mit einer max. Ladeleistung von 50 kW gängig. [29]

Da das DC-Ladestecksystem „CHAdeMO“ ohne Schutzleiter PE realisiert ist, wird für AC-Laden eine zusätzliche Ladesteckvorrichtung zwingend erforderlich [19]. Diese kann als Typ 1 oder Typ 2 ausgeführt sein.

Hingegen sind bei den CCS-Ladestecksystemen („Combined Charging Systems“) die Ladesteckvorrichtungen für AC- und DC-Laden direkt in einem System kombiniert, wodurch ein klarer Vorteil gegenüber CHAdeMO entsteht. Darüber hinaus wird eine synergetische Nutzung der Pins „CP“, „PP“ und „PE“ des AC-Teils ermöglicht (u. a. zu Kommunikationszwecken).

Für hohe DC-Ladeströme werden die bereits beschriebenen Ladesteckvorrichtungen Typ 1 bzw. Typ 2 (AC-Teil) mit zwei zusätzlichen, entsprechend stark dimensionierten Pins (DC-Teil) erweitert. Diese sind unterhalb des AC-Teils angebracht (siehe Abbildung 2-6). Für CCS Typ 1 ergibt sich derzeit eine maximale Ladeleistung von 120 kW (< 200 A) und für CCS Typ 2 max. 350 kW (< 500 A)<sup>25</sup>. Derzeitige DC-Ladestationen besitzen großteils Ladeleistungen von max. 50-150 kW (CCS Typ 2).

---

<sup>25</sup> Für die beiden CCS-Varianten sind ebenfalls die Bezeichnungen „Combo 1“ (USA, Japan) und „Combo 2“ (Europa, China) geläufig.

In Bezug auf die verwendeten Kommunikationsprotokolle ergeben sich ebenfalls Unterschiede: CHAdeMO ist CAN-basiert und CCS nutzt „Power Line Communication“ (PLC). Die digitale Kommunikation zwischen DC-Ladestation und Elektrofahrzeug wird für beide Ladesteckvorrichtungsarten CHAdeMO (als „System A“) und CCS (als „System C“) in der ÖVE/ÖNORM EN 61851-24 [31] beschrieben.

	Europa		USA		Japan		China
	Combined Charging System						China GB/T
AC-Laden	Typ 2		Typ 1		Typ 1		China GB/T
Komm.	PWM/PLC <sup>1)</sup>		PWM/PLC <sup>1)</sup>		PWM/PLC <sup>1)</sup>		PWM <sup>2)</sup>
Ladeleistung	Max.43 kW AC 3ph		Max.19,2 kW AC 1ph		Max.19,2 kW AC 1ph		Max.12,8 kW AC 1ph
DC-Laden	Combo 2		Combo 1		CHAdeMO		China GB/T
Komm.	PWM / PLC		PWM / PLC		CHAdeMO		China GB/T
Ladeleistung	Max.350 kW Perspektivisch Max.500 kW		Max.120 kW Perspektivisch Max.240 kW		CAN		CAN <sup>3)</sup>
					Max.150 kW Perspektivisch Max. 400 kW		Max.187 kW Perspektiv. <sup>4)</sup> Max.900 kW

<sup>1)</sup> PLC optional    <sup>2)</sup> Ähnlich IEC 61851    <sup>3)</sup> Herstellerspezifisch unterschiedlich, inkompatible Varianten    <sup>4)</sup> Neuer GB/T-Standard (2020)

Abbildung 2-6: Übersicht der internationalen Ladesteckvorrichtungen  
(Quelle: [32], eigene Darstellung)

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass DC-Laden auch ohne CCS direkt über Typ 1 bzw. Typ 2 möglich ist. Die Nutzung von zwei Pins des AC-Teils zur Gleichstromübertragung wird dabei als „DC-Low“ bezeichnet (im Gegensatz zu „DC-High“ mit CCS) [19]. Aufgrund der geringeren Dimensionierung sind jedoch bei der „DC-Low“-Variante lediglich Ladeleistungen bis max. 38 kW (< 80 A) genormt [27]. TESLA verwendet in Europa diese Möglichkeit zum DC-Schnellladen<sup>26</sup>. Hierbei kommen modifizierte „Typ 2“-Ladesteckvorrichtung mit „verstärkten“ Pins zum Einsatz, um TESLA-Fahrzeugmodelle an den proprietären „Supercharger“-Ladestationen mit bis zu 120 kW zu laden [33].

<sup>26</sup> Seit 2019 liefert TESLA in Europa seine Fahrzeugmodelle ebenfalls mit dem CCS-Ladestecksystem Combo 2 aus und das bestehende „Supercharger“-Netzwerk wird von TESLA entsprechend mit CCS nachgerüstet. [32]

### **Europäischer Standard und perspektivische Entwicklungen**

Im Jahr 2013 wurde die Mitteilung „Saubere Energie für den Verkehr: Eine europäische Strategie für alternative Kraftstoffe“ von der Europäischen Kommission veröffentlicht. Diese mündete in die bereits angeführte Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe. Darin werden die Ladesteckvorrichtungen Typ 2 sowie das CCS-Ladestecksystem Combo 2 als europäische Mindeststandards für alle öffentlichen Ladestationen definiert, die nach Inkrafttreten dieser Richtlinie aufgebaut werden [20].

Andere Standards wie das DC-Ladestecksystem CHAdeMO werden in der Richtlinie jedoch nicht dezidiert ausgeschlossen. Damit Elektrofahrzeuge beider Ladestecksysteme (Combo 2 und CHAdeMO) an öffentlichen DC-Schnellladestationen ansteckbar sind, werden häufig sogenannte „Tripel Charger“ errichtet. Diese ermöglichen ein gleichzeitiges Laden mittels AC sowie DC. Wobei für DC-Laden jeweils ein Ladekabel mit „Combo 2“- und „CHAdeMO“-Stecker an der Schnellladestation fix montiert ist. Damit nur geringe Mehrkosten u. a. für Ladeprotokoll, -verfahren und -kabel entstehen, wird zumeist lediglich ein Umrichter in die Schnellladestationen („Fast Charger“) integriert. Somit kann natürlich nur eine der beiden DC-Ladesteckvorrichtungen gleichzeitig genutzt werden. Aktuell sind viele der Bestandsanlagen als „Tripel Charger“ mit max. Anschlussleistungen von 43 kW für AC-Laden (Typ 2) und 50 kW für DC-Laden (Combo 2 und CHAdeMO) installiert.

Im Rahmen des Demonstrationsprojekts „eTaxi für Wien“ konnten 11 solcher „Tripel Charger“ errichtet werden. Dabei beliefen sich die Investitionskosten im Mittel auf rund 90.000 € je DC-Schnellladestation (ohne Förderung) [34]. Überschlagsmäßig ergeben sich damit für die drei Hauptkostentreiber „Netzanschlusskosten“ (inkl. Erdkabel und Netzzugang), „Errichtungskosten“ (Planung, Bau und Inbetriebnahme) und „Ladeinfrastrukturkosten“ (Hardware) jeweils ein Drittel der Gesamtkosten<sup>27</sup> [34, 35].

Aufgrund der technologisch bedingten Weiterentwicklungen werden zukünftig jedoch vermehrt sogenannte „Ultra Fast Charger“ bzw. „High Power Charger“ an neuralgischen Punkten z. B. entlang von Autobahnen errichtet ( $\geq 150$  kW je Ladepunkt). Diese weisen je Ladestation nicht nur mehrere simultan nutzbare DC-Ladepunkte auf, sondern stellen ebenfalls höhere Ladeleistungen je DC-Ladepunkt modular zur Verfügung.

---

<sup>27</sup> Generell hängen die Netzanschluss- und Errichtungskosten stark von den Gegebenheiten des jeweiligen Ladestandorts ab und unterliegen damit einer hohen Schwankungsbreite.

Wie bereits erwähnt, sind gegenwärtig z. B. für Combo 2 max. 350 kW je Ladepunkt in Verwendung. Um dabei den Kabelquerschnitt gering zu halten und trotzdem thermische Grenzen nicht zu verletzen, werden mitunter die Ladekabel bzw. die Steckkontakte aktiv gekühlt.

Dennoch werden perspektivisch noch höhere Ladeleistungen angestrebt. Laut der Initiative CharIn e.V.<sup>28</sup>, die maßgeblich durch deutsche Automobilhersteller getrieben wird, soll das Ladestecksystem „Combo 2“ auf Ladeleistungen bis zu 500 kW<sup>29</sup> weiterentwickelt werden [36]. Dies gilt aber nicht nur für die Bestrebungen von CharIn e.V. für CCS. Analoges gilt ebenso für die Erweiterungen des Ladestecksystems „CHAdeMO“ [37].

### 2.3.3 Ladecharakteristik

Für die technische Machbarkeitsanalyse von rein elektrisch angetriebenen E-Taxis, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt wird, sind all jene fahrzeug- und ladeinfrastrukturspezifischen Eigenschaften von Interesse, die einen relevanten Einfluss auf die resultierende Reichweite der betrachteten E-Taxis und somit auf die erfolgreiche Durchführbarkeit von Taxifahrten haben.

In diesem Zusammenhang spielt daher auch der zeitliche Leistungsverlauf der Ladevorgänge eine wesentliche Rolle. Dieser ist mitunter nicht über die gesamte Dauer des Ladevorgangs konstant, auch wenn eine Bereitstellung von Seiten der Ladeinfrastruktur möglich wäre. Grund für die zustandsabhängige Leistungs- bzw. Ladestromreduktion ist das vom Batteriemanagementsystem<sup>30</sup> (BMS) eingesetzte Ladeverfahren. Dieses soll vor thermischen Überlastungen und vor Überladungen schützen und damit irreversible Schäden durch unsachgemäßes Aufladen der Antriebsbatterie verhindern.

Dadurch entstehen – vor allem im Bereich höherer Ladezustände – deutlich längere Ladezeiten, die in der Machbarkeitsanalyse nicht außer Acht gelassen werden sollen. Deshalb wird in diesem Abschnitt das Prinzip des zugrundeliegenden Ladeverfahrens

---

<sup>28</sup> Charging Interface Initiative e.V. ([www.charinev.org](http://www.charinev.org))

<sup>29</sup> Zwei Jahre vor der geplanten Markteinführung ging Porsche bereits in Vorleistung und eröffnete im Juni 2017 in Berlin zwei DC-Ladepunkte auf CCS-Basis mit je 350 kW.

<sup>30</sup> Das BMS ist eine elektronische Schaltung zur Überwachung und Regelung der E-Fahrzeug-Antriebsbatterie.

erläutert und mittels Messergebnisse untermauert. Die Berücksichtigung in der Modellierung selbst wird im Kapitel 6 „Technische Machbarkeitsanalyse“ entsprechend dargestellt.

Da das Ladeverfahren u. a. von der gewählten Batterietechnologie abhängt, wird zuerst ein grober Überblick zum Stand der Technik heutiger Antriebsbatterien gegeben und erst danach auf die resultierenden Ladecharakteristiken eingegangen. In den folgenden Ausführungen werden dabei in erster Linie Technologieeigenschaften wie Energie- und Leistungsdichte, Lebensdauer sowie Investitionskosten behandelt. Für nähere Informationen zu weiteren Aspekten wie Alterungsmechanismen, Batterienachnutzung, Recycling, Umwelteinflüsse, Rohstoffvorkommen etc. wird an dieser Stelle u. a. auf [38, 39] verwiesen.

Tabelle 2-1: Anforderungen an eine Antriebsbatterie (Quelle: [14])

Anforderungsart	Spezifische Anforderung	
<b>Energetische Qualität</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Energiedichte</li> <li>- Hohe Leistungsdichte</li> <li>- Niedriger kumulierter Energieaufwand</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringe Selbstentladung</li> <li>- Geringer Hilfsenergieverbrauch</li> <li>- Hoher Systemnutzungsgrad</li> <li>- Wenig Verluste</li> </ul>
<b>Physikalische Eigenschaften</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringes Gewicht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringes Volumen</li> </ul>
<b>Sicherheit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Betriebssicherheit (Explosionsgefahr)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringes Schadenspotenzial</li> </ul>
<b>Lebensdauer</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe kalendarische Lebensdauer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hohe Zyklenfestigkeit (Anzahl Lade- und Entladezyklen)</li> </ul>
<b>Umweltfreundlichkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Herstellung</li> <li>- Nutzung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recyclingfähigkeit</li> </ul>
<b>Wirtschaftlichkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringe Wartungskosten</li> <li>- Niedrige Betriebskosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringe Herstellungskosten</li> <li>- Niedrige Investitionskosten</li> </ul>

Ganz allgemein hängt der erfolgreiche Einsatz von Antriebsbatterien in batterieelektrischen Fahrzeugen von der Erfüllung einer ganzen Palette von Anforderungen ab. In Tabelle 2-1 sind die wesentlichsten Anforderungen nach ihrer Art aufgelistet. Dabei sind für die Performance eines E-Fahrzeuges in erster Linie eine hohe Energiedichte für genügend Reichweite und eine hohe Leistungsdichte (u. a. zur angemessenen Reku- peration) von Interesse sowie die sich letztendlich ergebenden Batteriekosten. [14]

Wie Abbildung 2-7 zeigt, hat die Lithium-Ionen-Technologie in Bezug auf Energie- und Leistungsdichte klare Vorteile. Dadurch lassen sich höhere Reichweiten realisieren, ohne Nachteile bezüglich Volumen oder Masse in Kauf nehmen zu müssen (derzeit rund 150-200 Wh/kg [40]). Andere Batterietechnologien (wie Blei, Ni-MH oder ZEBRA), die in früheren E-Fahrzeug-Generationen zum Einsatz kamen, weisen diesbezüglich deutlich geringere Werte auf und werden deshalb heute für E-PKW immer weniger bis gar nicht mehr genutzt, auch wenn sie teilweise u. a. bei den Eigenschaften wie „Lebensdauer“ oder „spezifische Kosten“ aktuell gleich oder sogar noch besser abschneiden.

Für Transaktionsbatterien der Lithium-Ionen-Technologie lassen sich für die kalendrische Lebensdauer Werte von ca. 10 Jahre und bezüglich Zyklenfestigkeit rund 3.000 Vollzyklen<sup>31</sup> als obere Grenze angeben [39]. In Bezug auf Investitionskosten liegt der aktuelle Marktpreis für Li-Ionen-Antriebsbatterien bei 150-200 €/kWh [40].

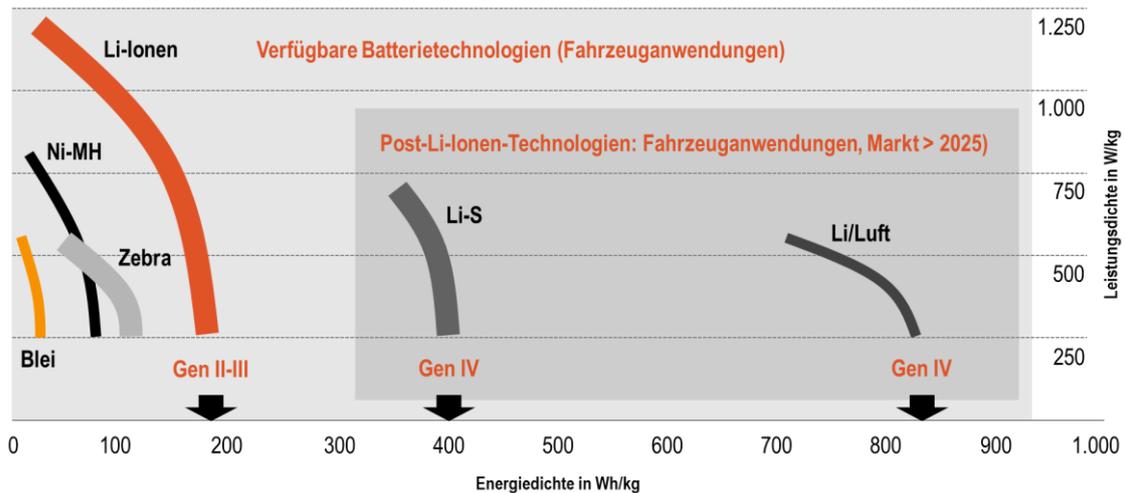


Abbildung 2-7: Größenordnungen bezüglich Energie- und Leistungsdichte diverser Batterietechnologien für E-Fahrzeuge (Quelle: [41], eigene Darstellung)

Damit sich eine weitere Kostenreduktion bei gleichzeitiger Steigerung der nutzbaren Energie erzielen lässt, werden kontinuierlich umfangreiche Aktivitäten im Forschungsbereich „Li-Ionen-Technologie“ betrieben. Laut [40] lassen sich Batterie-Pack-Preise bis 2030 sogar unter 100 €/kWh ermöglichen. Hierfür werden Innovationen auf allen Ebenen (Zelle, Modul, Pack und System) vorangetrieben. Dazu gehört neben der Erforschung

<sup>31</sup> Vollzyklus: Einmaliger Entlade- und Ladevorgang über die max. nutzbare Batteriekapazität.

neuer Anoden- und Kathodenmaterialien ebenso die Verbesserung des Zelldesigns und die Weiterentwicklung u. a. hinsichtlich Verschaltung, Steuerung und Klimatisierung [38].

Zusammen sollen diese Forschungsaktivitäten in Richtung sogenannter Post-Li-Ionen-Technologien, wie Li-Schwefel- und Li-Luft-Batterien, führen (vergleiche Abbildung 2-7). Da sie sich jedoch noch jenseits der Marktreife befinden, werden in der vorliegenden Arbeit lediglich Batterien aktueller Lithium-Ionen-Technologien berücksichtigt.

Abbildung 2-8 skizziert den typischen Ladevorgang einer handelsüblichen Li-Ionen-Batterie auf Zellebene. Neben den zeitlichen Verläufen des Ladestroms (in Ampere) und der zugehörigen Spannung (in Volt) sind der korrespondierende Batterieladezustand (SOC, State-of-Charge) und ein beispielhafter Entladevorgang dargestellt.

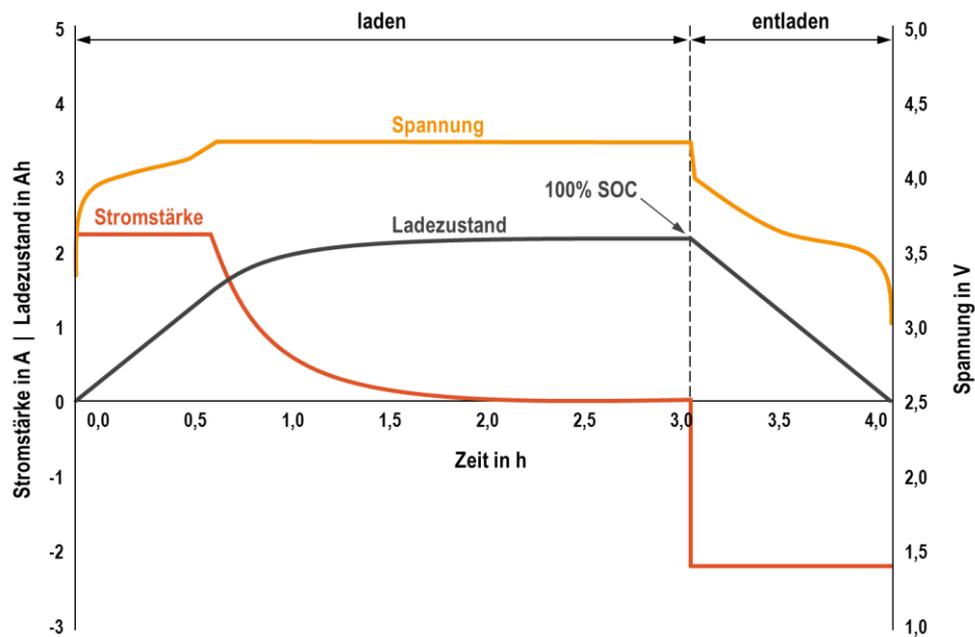


Abbildung 2-8: Schematische Darstellung der Lade- und Entladekurven einer Lithium-Ionen-Zelle (Quelle: [13], eigene Darstellung)

Die Grafik repräsentiert dabei recht anschaulich das Prinzip des vorwiegend eingesetzten, zweistufigen Ladeverfahrens von Li-Ionen-Batterien<sup>32</sup>. In der Fachliteratur wird es mit CCCV (Constant Current/Constant Voltage) bezeichnet. Dabei wird in der ersten

<sup>32</sup> Weitere Bestandteile, die dem Ladeprozess zugeordnet werden können, wie Verfahren zum Ladungsausgleich (Balancing), finden hier keine explizite Berücksichtigung.

Phase des Ladevorgangs der Strom konstant gehalten (Constant Current) und die Spannung<sup>33</sup> steigt kontinuierlich mit zunehmendem Batterieladezustand an. Die CC-Phase dauert bis zum Erreichen einer maximal zulässigen Spannungsgrenze (Ladeschlussspannung<sup>34</sup>) und ermöglicht ein rasches gleichmäßiges Laden. Danach geht das Ladeverfahren in eine „Konstantspannungsphase“ über (Constant Voltage). Während der CV-Phase sinkt der Ladestrom allmählich ab, bis schlussendlich der Vollladezustand der Batterie erreicht ist. Dieser Zustand wird meist durch das Unterschreiten einer bestimmten unteren Ladestromgrenze verifiziert und der Ladevorgang beendet<sup>35</sup>. [38]

Die „Konstantspannungsphase“ verhindert allgemein eine Überladung der Antriebsbatterie (Überspannung). Da der Innenwiderstand der Batterie vor allem mit höherem Batterieladezustand ansteigt, ergibt sich bei konstanter Spannung auf physikalischem Wege ein adäquater Abklingterm des Ladestromes und somit der Ladeleistung. Dies hat jedoch zur Folge, dass nicht nur die Ladeleistung – in der „Konstantspannungsphase“ – mit steigendem Batterieladezustand abnimmt, sondern ebenfalls die Dauer pro geladener Kilowattstunde entsprechend anwächst.

Um das beschriebene Ladeverhalten zu validieren, wurden im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung zur Modellregion „e-pendler in niederösterreich“ [42] Messungen an diversen E-Fahrzeugen (Renault ZOE, Nissan Leaf, BMW i3 etc.) mit verschiedenen Ladeleistungsklassen durchgeführt. Zum einen wird in [42] die Verwendung des CCCV-Ladeverfahrens für alle betrachteten E-Fahrzeuge bestätigt und zum anderen die Leistungsabhängigkeit des Umschaltpunktes<sup>36</sup> verifiziert.

Zusammengefasst kann Folgendes festgehalten werden: Höhere maximale Ladeleistungen bewirken allgemein eine Verschiebung des Umschaltpunkts in Richtung geringere Batterieladezustände (vergleiche dazu ebenfalls [29]).

---

<sup>33</sup> Sie ist u. a. abhängig von der zugrundeliegenden Zellchemie, der Alterung, des Innenwiderstandes und der Zelltemperatur.

<sup>34</sup> Oberhalb bestimmter Spannungen kommt es zu Zerfalls- und nachgelagerten Zersetzungsreaktionen (Überladung der Batterie).

<sup>35</sup> Alternativ kann auch eine fest definierte Zeit als Abschaltkriterium herangezogen werden.

<sup>36</sup> Zeitpunkt bzw. Batterieladezustand beim Erreichen der Ladeschlussspannung.

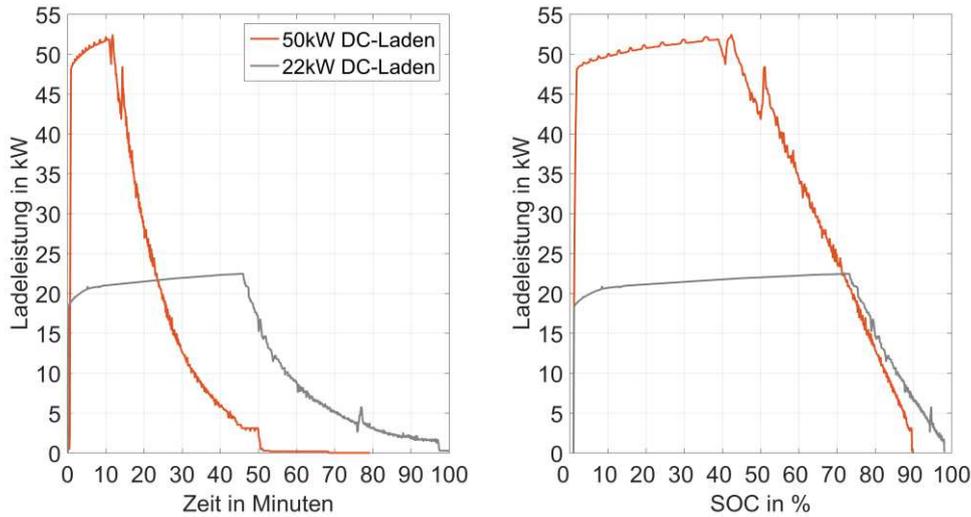


Abbildung 2-9: Gemessene Ladevorgänge eines Nissan Leaf bei 22 und 50 kW; Leistungsverläufe über die Zeit (links) und über den ermittelten SOC (rechts)

Zur beispielhaften Veranschaulichung stellt Abbildung 2-9 zwei netzseitig gemessene DC-Ladevorgänge für einen Nissan Leaf mit einer Batteriekapazität von 24 kWh (brutto) bei unterschiedlichen Ladeleistungsklassen dar (22 und 50 kW). Sie repräsentieren mit einer aufgenommenen Energiemenge von jeweils ca. 20 kWh annähernd ein Vollladen der Batterien (~0 bis 100 % der nutzbaren Batteriekapazität).

Die abgebildeten Ladevorgänge lassen den zweistufigen Charakter des CCCV-Ladeverfahrens deutlich erkennen und visualisieren die Abhängigkeit des Ladeumschaltpunktes von der Ladeleistungsklasse. In der Praxis kann die Lage des Umschaltpunktes z. B. durch aktive Kühlung der Batterie beeinflusst und damit der Beginn der zweiten Phase hinausgezögert werden. Dies ist jedoch beim vorliegenden Nissan Leaf, wie auch bei vielen E-Fahrzeugmodellen, noch nicht der Fall. Damit ergibt sich eine relativ lange CV-Phase mit geringerer Ladeleistung und die Ladedauer steigt entsprechend an. Dabei nimmt mit Erhöhung des Batterieladezustandes die Ladeleistung annähernd linear ab (vergleiche Abbildung 2-9).

Wäre es hingegen möglich durchgängig mit z. B. 50 kW zu laden, dann würde ein Vollladen der betrachteten Batterie nur ca. 23 Minuten dauern. Die gemessene Ladedauer beträgt jedoch 50 Minuten und entspricht ungefähr einer Verdopplung. Analoges gilt für den betrachteten „22 kW“-Ladevorgang.

Werden die beiden DC-Ladevorgänge der Abbildung 2-9 miteinander verglichen, so zeigt sich ein entsprechender, zeitlicher Vorteil bei der Verwendung von höheren Lade-

leistungsklassen. Dieser Vorzug ist vor allem bei geringen SOC-Werten stark ausgeprägt und reduziert sich, wenn lediglich im oberen SOC-Bereich geladen wird. Verantwortlich dafür ist einerseits der Abklingterm in der CV-Phase und andererseits die Verschiebung des Umschaltpunktes bei variierenden Ladeleistungsklassen. Dies kann unmittelbar beim Vergleich der beiden Ladeverläufe im rechten Teil der Abbildung 2-9 nachvollzogen werden. Dieses Diagramm stellt die zugehörigen Leistungsverläufe über den entsprechenden SOC dar.

Dabei bezieht sich der eingetragene SOC-Bereich (0 bis 100 %) auf die nutzbare Batteriekapazität (netto) und daher auf jene Batterieladezustandswerte, die auf der Anzeige des Armaturenbretts sichtbar sind (vergleiche dazu Abbildung 2-10). Aus Performance-Gründen sowie um negative Einflüsse auf die Lebensdauer zu reduzieren bzw. das Risiko für Überladungen zu minimieren, wird nicht die gesamte, verbaute Batteriekapazität (brutto) für die Energiebereitstellung ausgenutzt, sondern gewisse Bereiche an den Kapazitätsgrenzen ausgespart. Bei batterieelektrischen Fahrzeugen bleibt dadurch ein etwa 10-20 % geringerer, nutzbarer Batteriebereich übrig [42].

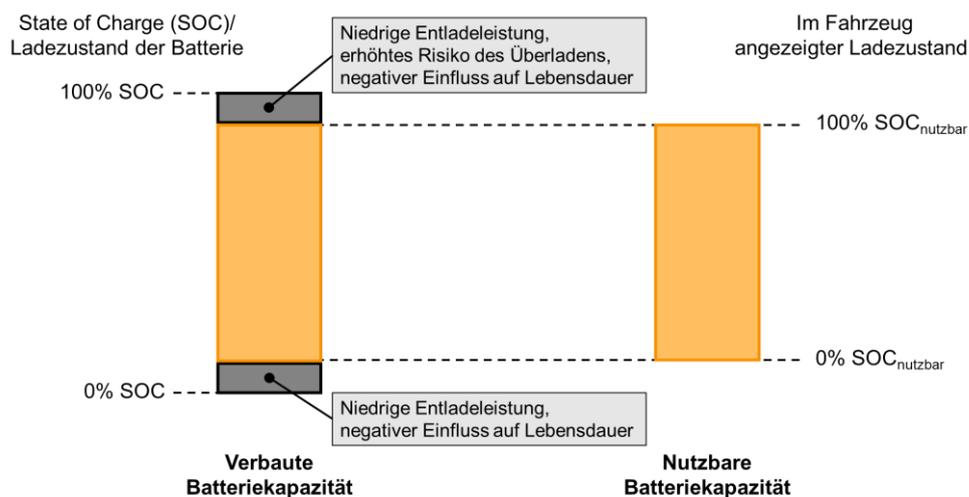


Abbildung 2-10: Zusammenhang von verbauter und nutzbarer Batteriekapazität  
(Quelle: [43], eigene Darstellung)

Die in Abbildung 2-9 dargestellten, gemessenen Ladevorgänge wurden überdies direkt nach einer längeren Fahrt vorgenommen und somit mit einer bereits „erwärmten“

Batterie begonnen<sup>37</sup>. In Bezug auf E-Taxis kann analog davon ausgegangen werden, dass die Ladevorgänge hauptsächlich im Anschluss an Taxifahrten und daher mit „warmer“ Batterie stattfinden. Darüber hinaus sind Schnellladevorgänge für die erfolgreiche Nutzung von Elektrofahrzeugen im Taxigewerbe äußerst relevant (vergleiche Kapitel 6 „Technische Machbarkeitsanalyse“).

Aus den genannten Gründen bzw. aufgrund der bereits erläuterten Aspekte findet das in Abbildung 2-9 dargestellte Batterieladeverhalten in der vorliegenden Arbeit Berücksichtigung. Die Überführung der Messwerte in Modellparameter wird jedoch nicht hier, sondern an gegebener Stelle im Rahmen des Kapitels 6 behandelt.

## 2.4 Das Taxigewerbe am Beispiel „Stadt Wien“

Aus technischer Sicht beschreibt der Begriff „E-Taxi“ in erster Linie eine Elektrifizierung des Antriebsstranges im Taxifahrzeug und betrifft somit vor allem die zuvor behandelten Bereiche „Elektrofahrzeug“ und „Ladeinfrastruktur“. Jedoch beeinflusst eine Umstellung auf rein elektrisch betriebene Taxis darüber hinaus auch jene Bereiche und AkteurInnen<sup>38</sup>, die im Speziellen dem Taxigewerbe zugeordnet sind. Aus diesem Grund werden nachfolgend die wesentlichen Charakteristika des Taxigewerbes am Beispiel „Stadt Wien“ in Anlehnung an [44] definiert und im Kontext der vorliegenden Arbeit erläutert.

Das Taxigewerbe in Österreich umfasst die gewerbsmäßige Personenbeförderung mit Personenkraftwagen (PKW). Dabei werden die Taxifahrzeuge an öffentlichen Orten bereitgehalten oder mit Fernmeldeeinrichtungen angefordert. Abgesehen von der Personenbeförderung werden von TaxilenkerInnen vereinzelt auch kleinere Besorgungs- und Botenfahrten übernommen. Dies ist ebenfalls im Rahmen der gesetzlichen Regelung erlaubt, sofern die beförderten Sachen ohne Zuhilfenahme technischer Hilfsmittel getragen werden können. [45]

---

<sup>37</sup> Die Batterietemperatur lag zu Beginn der Ladevorgänge mit rund 30°C deutlich über der Umgebungstemperatur von weniger als 8°C. Weitere Details zu den Messungen können aus [42] entnommen werden.

<sup>38</sup> Die wesentlichen AkteurInnen sind u. a. Taxiunternehmen, Vermittlungsgesellschaften, Aus- und Weiterbildungszentren, Fahrzeuglieferanten und Werkstätten sowie LenkerInnen und KundInnen

Allgemein sind für das Taxigewerbe in Österreich folgende Gesetze und Verordnungen wesentlich<sup>39</sup>:

- Gelegenheitsverkehrs-Gesetz [45]
- Berufszugangsverordnung Kraftfahrlinien- und Gelegenheitsverkehr [46]
- Bundesbetriebsordnung für den nichtlinienmäßigen Personenverkehr [47]
- Entsprechende Betriebsordnungen der Bundesländer

Diese werden nachstehend im Hinblick auf die Zielsetzungen der vorliegenden Arbeit auszugsweise beschrieben.

### 2.4.1 Taxiunternehmen

In Österreich ist die Gründung eines Taxiunternehmens und damit die Ausführung eines Taxigewerbes konzessionspflichtig. Wird eine Konzession von der zuständigen Behörde (Bezirkshauptmannschaft bzw. Magistrat) erteilt, dann ist diese auf eine bestimmte Fahrzeuganzahl beschränkt und eine nachträgliche Vermehrung der Fahrzeuganzahl ist wiederum genehmigungspflichtig. Laut [48] besitzen in Wien für das Jahr 2019 rund 2.000 Unternehmen eine Taxi-Konzession.

Die allgemeinen Voraussetzungen für eine positive Beurteilung werden im Gelegenheitsverkehrs-Gesetz [45] geregelt und umfassen folgende Schwerpunkte:

- Allgemeine Voraussetzungen (z. B. Vollendung des 18. Lebensjahres)
- Zuverlässigkeit (u. a. positive Strafregisterbescheinigung)
- Österreichische Staatsbürgerschaft oder EWR-Bürger
- Fachliche Eignung (Befähigungsnachweis)
- Finanzielle Leistungsfähigkeit (Eigenkapital und Rücklagen)
- Abstellplätze

Laut den derzeit gültigen Bestimmungen muss für jedes zugelassene Taxifahrzeug und über die gesamte Ausübungsdauer des Taxigewerbes ein Abstellplatz außerhalb von Straßen mit öffentlichem Verkehr nachgewiesen werden (z. B. Eigengrund, eigene Garage, angemieteter Abstell- oder Garagenplatz). Für die nachfolgenden Untersuchungen ist dies deshalb von Relevanz, da die Abstellplätze mögliche Standorte für „betriebliche“ Ladestationen darstellen und deshalb im Rahmen der Modellierung entsprechend berücksichtigt werden (siehe Kapitel 4.1).

---

<sup>39</sup> Die gültigen Fassungen können im Rechtsinformationssystem des Bundeskanzleramts (RIS) online nachgelesen werden: [www.ris.bka.gv.at](http://www.ris.bka.gv.at)

Neben den beschriebenen Voraussetzungen für die Ausübung des Taxigewerbes werden u. a. auch Ausbildung, Gesundheit und Zuverlässigkeit der im Fahrdienst tätigen Personen gesetzlich geregelt. Die dazu geltenden Vorschriften können laut [44] wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Personen müssen vertrauenswürdig sein
- Sie dürfen nicht an einer ansteckenden Krankheit leiden
- Beim Fahrdienst dürfen diese nicht durch Alkohol, Medikamente oder sonstige Einwirkungen beeinträchtigt sein
- Die Personen müssen über einen von der zuständigen Behörde ausgestellten TaxilenkerInnenausweis in Verbindung mit einer gültigen LenkerInnenberechtigung für die Klasse B verfügen

Zum Erlangen des TaxilenkerInnenausweises („Taxischein“) bedarf es einer entsprechenden Ausbildung („TaxilenkerInnenkurs“) mit anschließender Prüfung. Dabei gilt der TaxilenkerInnenausweis stets für eine bestimmte Region (z. B. „Gesamt-Wien“). Für die Ausstellung des TaxilenkerInnenausweises ist die Behörde an jenem Ort zuständig, in dem die Tätigkeit des Taxilenkers/der Taxilenkerin ausgeübt werden soll (z. B. das Verkehrsamt Wien<sup>40</sup>).

Abgesehen von den Bestimmungen auf Bundesebene (wie Gelegenheitsverkehrs-Gesetz und Bundesbetriebsordnung), die den allgemeinen rechtlichen Rahmen für das Taxigewerbe vorgeben, gibt es zusätzlich für jedes Bundesland individuelle Verordnungen. In diesen werden u. a. die Voraussetzungen für das Fahrzeug, die Bestimmungen zu den Taxistandplätzen und die Taxitarife<sup>41</sup> bundeslandspezifisch geregelt.

Darüber hinaus bestehen für Taxis ebenfalls Sonderregelungen im Straßenverkehrsrecht, die unter bestimmten Umständen zum Tragen kommen. Zu diesen zählen u. a. eine bedingte Befreiung der Gurt- oder Kindersitzpflicht, eine Erlaubnis zum Halten in „zweiter Reihe“, das Befahren von Fußgängerzonen sowie die Benutzung der Busspuren. [44]

## 2.4.2 Taxikraftfahrzeuge

Für das Beispiel „Stadt Wien“ gilt die sogenannte „Wiener Taxi-Betriebsordnung“ [48]. Sie beschreibt u. a. die in Wien geltenden fahrzeugbezogenen Kriterien, wie Anzahl an

---

<sup>40</sup> Nähere Informationen unter <https://www.wko.at/Wien/Taxi>

<sup>41</sup> Ergänzende Beschreibungen zu den Taxitarifen sind im Anhang C zu finden.

Türen und Sitzplätzen, Außenmaße des Fahrzeuges, Innenraum- und Taxischildbeleuchtung, Kofferraumangebot, Klimaanlage, Taxameter und Abgasnormen. Darüber hinaus sind allgemeine Richtlinien zum Fahrzeugzustand (wie Sauberkeit und Beschädigungen) enthalten.

Soll ein konkreter Elektrofahrzeugtyp im Taxibetrieb eingesetzt werden, dann muss dieses Fahrzeug nicht nur den kraftfahrrechtlichen Vorschriften entsprechen, sondern ebenso die in der Taxi-Betriebsordnung angeführten Voraussetzungen erfüllen. Dies ist durch die zuständige Zulassungsbehörde mit Bescheid festzustellen. In Wien ist derzeit die Nutzung u. a. folgender rein elektrischer Fahrzeuge als Taxis erlaubt: Nissan Leaf, Nissan e-NV200, Hyundai IONIQ Electro, Mercedes B-Klasse Electric Drive, Tesla Model S und Kia Soul EV.

Laut [49] sind in Wien für das Jahr 2019 etwas mehr als 4.500 Taxis konzessioniert. Dabei beläuft sich der Anteil an Hybridelektrofahrzeuge auf rund 25 % sowie der Anteil der rein elektrisch betriebenen Fahrzeuge auf etwa 1 % [34].

### 2.4.3 Taxistandplätze

Die „Wiener Taxi-Betriebsordnung“ beinhaltet ebenfalls alle relevanten Regelungen zu den speziell für Taxis vorgesehenen Taxistandplätzen. Darin ist u. a. vermerkt, dass betriebsbereite Taxis nur an Taxistandplätzen aufgestellt werden dürfen<sup>42</sup>. Somit fahren TaxilenkerInnen nach der Beförderung einer Person in der Regel wieder einen Taxistandplatz an. Sie sind jedoch bei der Auswahl des Taxistandplatzes nicht eingeschränkt, da der Grundsatz der freien Standplatzwahl gilt. Weiters dürfen bei der Fahrt zu einem Taxistandplatz zwar allgemein Fahrgäste aufgenommen werden, jedoch nur sofern diese das Taxi anhalten. Das „Umherfahren“, um Fahrgäste zu gewinnen, ist jedoch nicht gestattet. Neu eingetroffene Fahrzeuge haben sich am Taxistandplatz hinten einzureihen. Fährt ein Taxi vom Taxistandplatz weg, dann sind die übrigen Fahrzeuge verpflichtet platzsparend anzuschließen. Da der Fahrgast jedoch ein beliebiges Taxi am Taxistandplatz wählen kann, ist jedem Taxilenker/jeder Taxilenkerin zur Annahme eines Auftrages (auch per Funk) das Herausfahren aus der Reihe ohne Behinderung und ohne Gefährdung zu ermöglichen.

---

<sup>42</sup> Anlässlich der Abhaltung von Großveranstaltungen ist das Auffahren mit Taxikraftfahrzeugen und das Aufstellen dieser Kraftfahrzeuge auch außerhalb von Taxistandplätzen gestattet.

Tabelle 2-2: Anzahl der Wiener Taxistandplätze und Auffahrmöglichkeiten [50]

Bezirk	Anzahl der Taxistandplätze	Anzahl der Auffahrmöglichkeiten 0 - 24 Uhr	Anzahl der Auffahrmöglichkeiten zeitlich beschränkt
1.	38	175	61
2.	23	97	33
3.	17	96	16
4.	6	30	11
5.	6	41	10
6.	7	39	0
7.	6	29	4
8.	4	26	0
9.	13	68	16
10.	19	111	16
11.	11	50	5
12.	13	74	6
13.	12	59	7
14.	7	35	6
15.	10	71	0
16.	9	45	7
17.	5	30	0
18.	6	33	7
19.	14	66	5
20.	7	47	4
21.	15	73	0
22.	24	106	13
23.	8	48	4
<b>Gesamt Wien</b>	<b>280</b>	<b>1.449</b>	<b>231</b>

In Wien gibt es rund 280 Taxistandplätze mit etwa 1.680 Auffahrmöglichkeiten<sup>43</sup> [50]. Eine Aufteilung nach Gemeindebezirken ist in Tabelle 2-2 gegeben. Von den Wiener Taxistandplätzen besitzen rund ein Viertel eine zeitliche Beschränkung und ca. 40 % verfügen nach wie vor über ein Standplatztelefon<sup>44</sup>. Neubauten sowie Verlegungen von Taxistandplätzen werden von der zuständigen Bezirksvertretung gemeinsam mit der „Taxi-Innung“ (Fachgruppe der Wirtschaftskammer Wien für die Beförderungsgewerbe mit Personenkraftwagen) geplant und umgesetzt (aktuelle Neuerungen zu den Taxistandplätzen siehe [51]).

Dies gilt gleichermaßen für die drei ersten E-Taxistandplätze, die im Rahmen des Umsetzungsprojektes „eTaxi für Wien“<sup>45</sup> exklusiv für E-Taxis geschaffen wurden und nur von E-Taxis angefahren werden dürfen. Mit den speziellen E-Taxistandplätzen soll für alle Fahrgäste der Zugang zu E-Taxis erleichtert und die Sichtbarkeit der E-Fahrzeuge in der Stadt erhöht werden [52]. Die drei E-Taxistandplätze für zumindest je drei E-Taxis befinden sich in der Philharmonikerstraße Nr. 2 (1. Bezirk), in der Schönbrunner Straße Nr. 54 (5. Bezirk) und in der Karl-Popper-Straße 4 (10. Bezirk).

#### 2.4.4 Taxifunkvermittlung

Da die wesentlichen Datengrundlagen der vorliegenden Arbeit auf den Mobilitätsmerkmalen von Funktaxis in Wien beruhen (siehe Kapitel 3), werden in diesem Abschnitt die relevanten Begriffe und Abläufe der Funkvermittlung erläutert.

In Wien gibt es zumindest zwei große Taxifunkzentralen: Die TAXI 31300 VermittlungsgmbH mit der Rufnummer (01) 31300 und die Taxi 40100 Taxifunkzentrale GmbH mit den Rufnummern (01) 40100 und (01) 60160<sup>46</sup>. Von den etwas mehr als 4.500 Taxis in Wien fährt etwa die Hälfte mit und die andere Hälfte ohne Funk [34].

Dabei verfügen die Taxifunkzentralen über keine eigenen Taxifahrzeuge, auch wenn die Summe der bei einer Taxifunkzentrale registrierten Taxis als Funktaxiflotte bezeichnet

---

<sup>43</sup> Die Anzahl der Auffahrmöglichkeiten je Taxistandplatz entspricht der max. Kapazität des TSP (z. B. fünf Taxis).

<sup>44</sup> Standplatztelefone verfügen über eine Signallampe. Blinkt diese, dann öffnet der Taxilenker bzw. die Taxilenkerin die Gehäusetür mit dem sog. „Telefonschlüssel“, hebt den Hörer ab und spricht persönlich mit dem Kunden/der Kundin. [122]

<sup>45</sup> Eröffnung 2016 bzw. 2018. Nähere Informationen zum Projekt „eTaxi für Wien“: <https://www.tanke-wienenergie.at/etaxi/> (letzter Zugriff: 20.04.2017)

<sup>46</sup> Die Marke „TAXI 60160“ gehört zur CC Taxicenter GmbH, die eine 100%-ige Tochter der Taxi 40100 Taxifunkzentrale GmbH darstellt. [122]

wird. Sie vermitteln lediglich Aufträge an die TaxilenkerInnen der bei ihnen angeschlossenen Taxiunternehmen. Für die Vermittlung benötigt jedes Funktaxi ein entsprechendes Datenübertragungsgerät, das die digitale Kommunikation zwischen Fahrzeug und Funkzentrale ermöglicht [44]. Das Gerät sendet laufend Statuswerte (u. a. „angemeldet“, „besetzt“, „am Standplatz“) sowie Positionsdaten der Taxis in pseudonymisierter Form über Funk zu einem zentralen Server. Danach werden die GPS-Positionen der Fahrzeuge zur Vermittlung weiterverarbeitet. In Wien wird zumindest von den beiden größten Taxifunkzentralen ein einheitliches Flottenmanagementsystem (FMS)<sup>47</sup> genutzt. Darüber werden ebenfalls bargeldlose Zahlungstransaktionen übertragen und die Sprachkommunikation ermöglicht [44].

In Bezug auf den Ablauf der Vermittlung gibt es ebenfalls eine klare Vorgehensweise. Sobald ein Auftrag über Telefon, Internet oder mobiler App in der Taxifunkzentrale eingeht wird in der Nähe der Auftragsadresse nach verfügbaren Fahrzeugen gesucht. Dabei werden Sonderwünsche des Fahrgastes möglichst berücksichtigt. Es können Wunschmerkmale wie z. B. Tiertransport, Englisch sprechende/r FahrerIn, Luxus Class, Kombifahrzeug oder auch ÖKO-Taxi bzw. E-Taxi<sup>48</sup> angegeben werden.

Die Funktaxis, die den gewünschten Merkmalen entsprechen, werden in der Regel nach den folgenden Prioritäten absteigend gereiht [44]:

1. Prioritätsposition am Standplatz
2. Prioritätsposition in der Umgebung<sup>49</sup>
3. Position am Standplatz
4. Position in der unmittelbaren Umgebung
5. Position in einer angrenzenden Umgebung
6. Position in einer weiter entfernten Umgebung
7. Wagen im „Besetzt-Zustand“ mit eingegebenem Fahrziel in der jeweiligen Umgebung oder in angrenzender oder naher Umgebung

Das Taxi mit der höchsten Priorisierung erhält als erstes den Auftrag. Solange niemand diesen verbindlich annimmt, wird der Auftrag an das Fahrzeug mit der nächst niedrigeren

---

<sup>47</sup> Firma Austrosoft® Weiss Datenverarbeitung Gesellschaft m.b.H. (Wien)

<sup>48</sup> Im Rahmen des Umsetzungsprojekts „eTaxi für Wien“ [34] wurde das zusätzliche Bestellmerkmal „E-Taxi“ eingeführt, um ein (lokal) CO<sub>2</sub>-freies Taxifahrzeug direkt anfordern zu können.

<sup>49</sup> Der Begriff „Umgebung“ bezeichnet in der Taxivermittlung den jeweiligen Raumbereich um einen Taxistandplatz.

Priorität weitergegeben [44]. Dabei wird je nach abgeschlossenem Vertrag dem Taxilenker/der Taxilenkerin für das Vermittlungsservice eine monatliche Pauschale oder eine Gebühr je vermitteltem Auftrag verrechnet.

An dieser Stelle soll jedoch angemerkt werden, dass es auch Alternativen zu den großen Taxifunkzentralen gibt. In Wien besteht zum Beispiel die Möglichkeit über die App-basierte Vermittlungsplattform „free now“ (ehemals „myTaxi“)<sup>50</sup> als Fahrgast Taxis zu bestellen bzw. als TaxilenkerIn zusätzlich Fahrten zu bekommen. Dabei bestellt der Fahrgast nicht bei einer Zentrale, sondern wählt ausschließlich per App direkt ein gewünschtes Taxi von der „free now“-Flotte aus. Ebenfalls über eine mobile App können „Uber“-Fahrten bestellt werden. Bis dato musste ein/eine „Uber“-FahrerIn lediglich einen gültigen Führerschein besitzen. Durch eine Gesetzesänderung sind ab September 2020 jedoch Taxi-FahrerInnen und „Uber“-FahrerInnen in Österreich an die gleichen Regeln gebunden [45]. Zum Beispiel müssen dann auch „Uber“-FahrerInnen einen TaxilenkerInnenausweis besitzen und ihre Preise mit den Taxitarifen gleichsetzen.

#### 2.4.5 Der Betriebsablauf von Taxis

Die allgemeinen Eigenschaften der primären Betriebsabläufe und die möglichen Betriebsarten/Schichtmodelle stellen für die nachfolgende Modellierung der E-Taxis und die darauf aufsetzenden Untersuchungen weitere wesentliche Punkte dar. Diese werden in Anlehnung an [44] nachfolgend erläutert.

Je nachdem, wann die Arbeitszeit des Taxilenkers/der Taxilenkerin stattfindet, kann ganz allgemein zwischen Tages- und Nachtbetrieb unterschieden werden. In der Regel ergeben sich hierbei für das Wiener Taxigewerbe folgende Betriebszeiten:

1. Tagesschichten (Tagesbetrieb): 6:00 bis 18:00 Uhr
2. Nachtschichten (Nachtbetrieb): 18:00 bis 6:00 Uhr
3. Mischwerte: Diese besitzen sowohl Tages- als auch Nachtschichtcharakter

Trotz Unterteilung in verschiedene Betriebszeiten zeigt sich allgemein ein relativ zyklischer Betriebsablauf. Das in Abbildung 2-11 dargestellte Schema beschreibt diesen wiederkehrenden Betriebsablauf mit den zugehörigen Wartezeiten am Taxistandplatz sowie bei der Auftragsadresse und die dazwischenliegenden Leer- und Besetztfahrten. Für Taxis ohne Funk reduzieren sich hierbei die Möglichkeiten für die Annahme eines Auftrags auf die Punkte „einsteigender Fahrgast am TSP“ und „anhaltender Fahrgast am Weg zum nächsten TSP“.

---

<sup>50</sup> Firma „mytaxi Austria GmbH“ (<https://free-now.com>, letzter Zugriff: 24.11.2019)

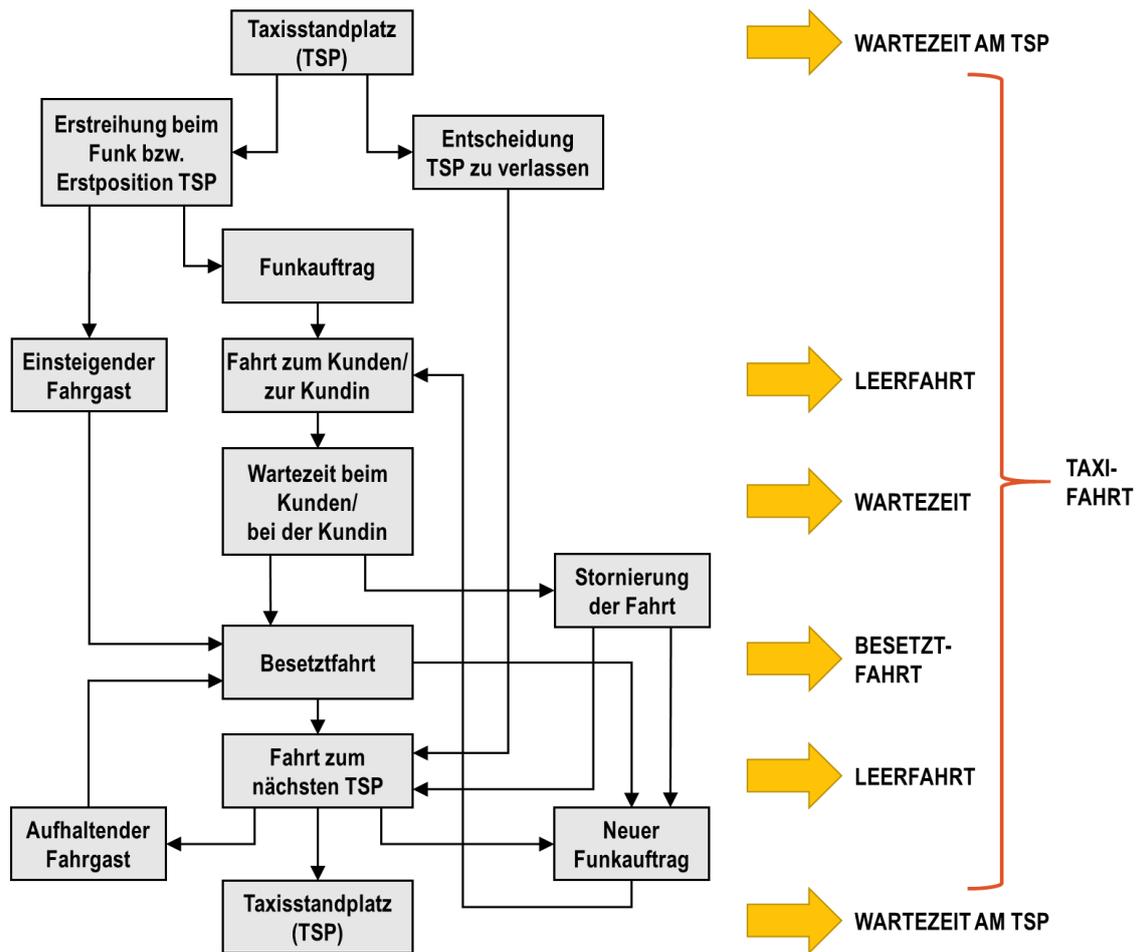


Abbildung 2-11: Der Bedarfsablauf eines Funktaxis (Quelle: [44], eigene Darstellung)

Als „Besetztfahrten“ werden primär Fahrten mit einem Fahrgast bezeichnet. Dabei wird der Taxameter in den Modus „besetzt“ geschaltet. Abgesehen von den angeführten Wartezeiten am Taxistandplatz sowie bei der Auftragsadresse ergeben sich ebenfalls Standzeiten während der Personenbeförderung. Diese werden größtenteils durch Verkehrshindernisse sowie Ampeln verursacht und in der Regel mittels Zeittaxe dem Fahrgast verrechnet. „Leerfahrten“ hingegen werden betriebsbedingt ohne Fahrgäste durchgeführt und stellen vor allem die Fahrt zum Kunden/zur Kundin bzw. zum nächsten TSP dar. Bei Leerfahrten befindet sich der Taxameter im Modus „frei“. [44]

In der vorliegenden Arbeit wird aufgrund der Struktur der vorhandenen Datengrundlage (vergleiche Kapitel 3) die gesamte Zeitdauer vom Verlassen eines Taxistandplatzes (TSP) bis zur Ankunft am nächsten TSP zusammengefasst und nachfolgend konsistent unter dem Begriff „Taxifahrt“ geführt. Somit inkludiert die Dauer einer Taxifahrt – über den Zeitraum der „Besetztfahrt“ hinaus – alle zugehörigen Leerfahrten und die Wartezeit

beim Kunden/bei der Kundin. Zusammengefasst bedeutet dies, dass sich im Taxibetrieb „Wartezeiten am TSP“ und „Taxifahrten“ kontinuierlich abwechseln (vergleiche Abbildung 2-11).

### 3 Mobilitätsdatengrundlage

Die vorliegende Arbeit basiert auf der Annahme, eine gesamte Taxiflotte modellhaft von konventionell betriebenen Fahrzeugen auf rein elektrisch angetriebene Taxis umzurüsten. Diesbezüglich gibt das vorangegangene Kapitel an Hand des Beispiels „Stadt Wien“ einen ersten Überblick der strukturellen Grundlagen des Taxigewerbes.

Um jedoch detaillierte Aussagen über eine mögliche Machbarkeit treffen zu können, sind, über die allgemeinen Kenntnisse des Taxigewerbes hinaus u. a. fundierte Informationen zum Mobilitätsverhalten der Taxis von großer Bedeutung. Unter dem Begriff „Mobilitätsverhalten“ werden in der vorliegenden Arbeit in erster Linie Eigenschaften wie Verweildauer<sup>51</sup> am Taxistandplatz, zurückgelegte Kilometer während eine Taxifahrt und die dafür benötigte Zeit bzw. der resultierende Energiebedarf verstanden. Dabei sind jedoch nicht nur die auftretenden Mittelwerte, sondern ebenfalls die Streuungen der entsprechenden Verteilungen von Interesse.

Im Rahmen des abgeschlossenen Forschungsprojekts „ZENEM“ stellte die Vermittlungsgesellschaft Taxi 31300 dem Projektkonsortium zwei umfangreiche, anonymisierte Datensätze für wissenschaftliche Zwecke zur Verfügung. Diese wurden vom Projektpartner AIT (Austrian Institute of Technology GmbH) entsprechend der Projektziele weiterverarbeitet und aufbereitet. Beide Datensätze beruhen auf empirischen Aufzeichnungen über ein gesamtes Jahr. Sie beinhalten zwar ausschließlich Taxis mit Verbrennungskraftmotoren, geben jedoch Auskunft über das Mobilitätsverhalten einer Funktaxiflotte von über 800 Fahrzeugen.

Die wesentlichsten Unterschiede der beiden vorhandenen Datensätze bestehen in deren Granularität bzw. in deren Blickwinkel. Dabei gibt der eine Datensatz die enthaltenen Positions- und Statuswerte auf Basis einzelner Taxifahrten wieder. Hingegen werden im anderen Datensatz die Vermittlungsparameter als kumulierte Flottendaten dargestellt.

Die beiden folgenden Kapitel beschreiben die zur Verfügung gestellte Datengrundlage, ihre Aufbereitung, die vorhandenen Einschränkungen und notwendigen Annahmen sowie die daraus extrahierten Mobilitätsmerkmale. Die enthaltenen Erläuterungen basieren im Wesentlichen auf dem publizierten Endbericht des Forschungsprojekts „ZENEM“ [53] sowie diverser aus dem Projekt heraus entstandenen Publikationen [54, 55, 56, 57].

---

<sup>51</sup> Begriffe wie Standdauer, Verweildauer oder Wartezeit werden synonym verwendet.

Darüber hinaus folgt zum Abschluss des Kapitels 3 eine klare Abgrenzung zum Forschungsprojekt „ZENEM“ sowie zu einer themenverwandten Diplomarbeit, auf denen die vorliegende Arbeit inhaltlich aufsetzt.

### 3.1 GPS-basierte Fahrzeugdaten

Funktaxifahrzeuge sind – wie bereits angemerkt – mit einem Datenübertragungsgerät ausgestattet. Im Fall der beiden größten Wiener Taxifunkzentralen senden die registrierten Funktaxis im Betrieb laufend deren Statuswerte (u. a. „angemeldet“, „besetzt“, „am Standplatz“) und Positionsdaten in pseudonymisierter Form<sup>52</sup> über Funk zu einem zentralen Server<sup>53</sup>. Danach werden die GPS-Positionen der Fahrzeuge zur verbesserten Vermittlung oder z. B. zur Bestimmung der aktuellen Verkehrslage im Wiener Stadtgebiet weiterverarbeitet<sup>54</sup>. Für diese Anwendungsfälle ist jedoch keine kontinuierliche, stetige Datenübertragung erforderlich. Aus diesem Grund bestehen die verfügbaren Originaldaten<sup>55</sup> jeder Taxifahrt aus mehreren Teilabschnitten und werden im konkreten Fall mit unregelmäßigen, zum Teil lückenhaften Berichtsintervallen (ca. 25 bis 60 s) übermittelt. Abbildung 3-1 veranschaulicht dieses Prinzip. Dabei repräsentieren die Start- und Endpositionen jeweils den Taxistandplatz zu Beginn und am Ende einer Taxifahrt.

Wie in Kapitel 2.4 (Das Taxigewerbe am Beispiel „Stadt Wien“) veranschaulicht, wechseln sich während des zyklischen Betriebsablaufs „Taxifahrten“ und „Wartezeiten an den Taxistandplätzen“ kontinuierlich ab. Die einzelnen Taxifahrten stellen aufgrund des Prinzips der GPS-Datenaufzeichnung wiederum Glieder einer gesamten Kette aus gespeicherten Zwischenpositionen dar.

---

<sup>52</sup> Vom Begriff „Pseudonymisierung“ aus dem Datenschutzgesetz DSG abgeleitet [104].

<sup>53</sup> In Wien wird zumindest von den beiden größten Taxifunkzentralen (Taxi 31300 und CC Taxicenter GmbH) einheitlich das Flottenmanagementsystem (FMS) der Firma Austrosoft® Weiss Datenverarbeitung Gesellschaft m.b.H. genutzt.

<sup>54</sup> Nähere Informationen dazu sind in den Publikationen [122, 121] zu finden.

<sup>55</sup> Es werden lediglich zeitliche und räumliche Eigenschaften des Taxis aufgezeichnet. Alle Daten stehen ausschließlich in anonymisierter Form zur Verfügung. Es sind somit keine personenbezogenen Informationen vorhanden (darunter fällt u. a. auch das KFZ-Kennzeichen).

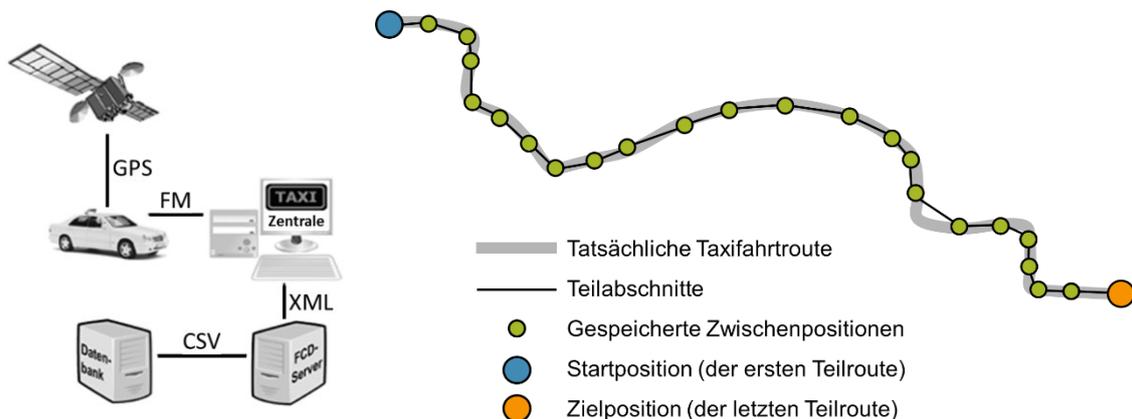


Abbildung 3-1: Prinzip der GPS-Datenaufzeichnung (links) und skizzierte Darstellung der gespeicherten GPS-Positionen einer Taxifahrt (rechts) (Quelle: [53], eigene Darstellung)

Durch die Entwicklung einer speziellen Synthesemethode des Projektpartners AIT konnten im Rahmen des Forschungsprojekts „ZENEM“ aus den gestückelten Mobilitätsdaten komplette Taxifahrten rekonstruiert werden<sup>56</sup>. Damit beinhalten die aufbereiteten „GPS-basierten Fahrzeugdaten“ über den Betrachtungszeitraum von einem Jahr insgesamt 1,7 Mio. Taxifahrten<sup>57</sup>. Laut [53] wurden dazu im wesentlichen Map-Matching, Routing, Filteralgorithmen und Aggregationsfunktionen angewendet (siehe Abbildung 3-2). Der zugehörige Datensatz wird in weiterer Folge als „GPS-basierte Fahrzeugdaten“ bezeichnet.

Zusätzlich zur Aufbereitung der Mobilitätsdaten wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „ZENEM“ für jede der enthaltenen Taxifahrten ein entsprechender Energiebedarf in kWh ermittelt. Dabei wurde vom Projektpartner AIT ein Fahrzeugmodell herangezogen, das sowohl die Masse (Fahrzeug, Personen plus Gepäck), als auch den Strömungswiderstand ( $c_w$ -Wert) und die Stirnfläche des Elektrofahrzeuges berücksichtigt<sup>58</sup> (vergleiche Tabelle 3-1). Unter Einberechnung der Verkehrslage (Anzahl und Intensität von Beschleunigungen) sowie der gegebenen Routenwahl (Abfolge der

<sup>56</sup> Die Zwischenpositionen der Teilrouten werden im System als Punktpaare abgespeichert.

<sup>57</sup> Je rekonstruierter Taxifahrt wurde ebenfalls ein entsprechender Qualitätsindikator ermittelt [53]. Taxifahrten mit einem Indikator unter 60 % werden aus Gründen der Qualitätssicherung verworfen (vergleiche dazu Kapitel 4.4.1).

<sup>58</sup> Als Referenzfahrzeug ist ein Mercedes-Benz der Baureihe 211 gewählt.

befahrenen Straßen) konnten mittels Simulation die zugehörigen Beschleunigungszyklen berechnet und der ermittelte Energiebedarf den Taxifahrten zugeordnet werden. [53]



Abbildung 3-2: Funktionen des Floating-Car-Servers zur Aufbereitung der Mobilitätsdaten  
(Quelle: [53], eigene Darstellung)

Wie zuvor erläutert konnte im Rahmen des Forschungsprojekts „ZENEM“ der Großteil der Teilrouten den entsprechenden Taxifahrten<sup>59</sup> zugeordnet werden, dennoch kam es bedingt durch die Qualität bzw. Art der Datenarchivierung u. a. bei den Tagesübergängen zu Datenverlusten. Da die Informationsqualität – vor allem im Hinblick auf die Verkettung von Taxifahrten – eine wesentliche Rolle für die weitere Aufbereitung sowie die anschließende Modellierung spielt, folgt im Kapitel 3.3 „Abgrenzung zu verwandten Arbeiten“ noch ein eigener Abschnitt diesbezüglich.

Davor werden jedoch die im Datensatz „GPS-basierte Fahrzeugdaten“ enthaltenen Mobilitätsmerkmale, wie Fahrt- und Standdauer sowie der ermittelte Energiebedarf der Taxifahrten und die Nutzungshäufigkeiten der Taxistandplätze dargestellt.

<sup>59</sup> Eine Taxifahrt als Summe aller Wege zwischen zwei Taxistandplätzen repräsentiert in der Realität eine Kombination aus Besetzt- und Leerfahrten. Eine Unterscheidung kann nach der Aggregation im Forschungsprojekts „ZENEM“ jedoch nicht mehr getroffen werden.

Tabelle 3-1: Berücksichtigung der Einflussfaktoren zur Energiemodellierung [53]

Einfluss/Kriterium	Einflussgröße/Parameter	Modellierung
Fahrzeugmodell	Gewicht und Luftwiderstand der Stirnfläche	Masse, $c_w$ -Wert und Stirnfläche
Besetzungsgrad, Beladungszustand	Gewicht	(zusätzliche) Masse
Nebenverbraucher	Zusätzlicher Energiebedarf	-
Verkehrszustand	Beschleunigungen	Beschleunigungszyklen
Routenwahl	Beschleunigungen	Beschleunigungszyklen

### 3.1.1 Extraktion relevanter Mobilitätsmerkmale

An dieser Stelle soll nochmals explizit darauf hingewiesen werden, dass eine Taxifahrt die Summe aller Fahrten zwischen zwei Taxistandplätzen charakterisiert und somit den gesamten Zeitbereich vom Verlassen des aktuellen TSP (Start) bis zum Ankommen am darauffolgenden TSP (Ziel) inkludiert (vergleiche Abbildung 2-11). Eine Taxifahrt beinhaltet nach dieser Definition sowohl Besetzt- als auch Leerfahrten sowie Zeitabschnitte, während denen das Taxi gar nicht in Bewegung ist (wie z. B. während der „Rotphase“ an einer Ampel oder beim Warten auf den Fahrgast bei der vereinbarten Abholadresse). Eine Taxifahrt kann aber ebenso nur aus einer einzigen Leerfahrt bestehen, wenn sich z. B. der/die TaxifahrerIn dazu entschließt, den aktuellen Taxistandplatz zu verlassen und einen neuen Taxistandplatz aufzusuchen.

Die gesamte Zeitspanne, die für die Durchführung einer Taxifahrt notwendig ist, wird nachfolgend als Fahrdauer bezeichnet. Jede Taxifahrt besitzt neben den zeitlichen Informationen, wie die Fahrdauer, räumliche Informationen bezüglich der zurückgelegten Distanz bzw. des ermittelten Energiebedarfs sowie der Taxistandplätze als Start- und Zielort. Darüber hinaus beinhalten die „GPS-basierten Fahrzeugdaten“ die Wartezeiten an den TSP, die zwischen zwei Taxifahrten auftreten. Diese werden nachfolgend schlicht als Standdauer bezeichnet.

In Bezug auf die Fahrt- und Standdauer sowie die zugehörigen Distanzen der Taxifahrten ergeben sich rechtsschiefe, nicht-negative Häufigkeitsverteilungen [53]. In Abbildung 3-3 ist die prozentuale Verteilung der auftretenden Distanzen je Taxifahrt über alle Wochentage dargestellt. Die dafür gewählte Klassenbreite beträgt zwei Kilometer. Wie schon erwähnt, bestehen Taxifahrten aus Besetzt- und/oder Leerfahrten. Somit bezieht sich die zurückgelegte Distanz jedenfalls nicht nur auf reine Besetztfahrten. Für die

„GPS-basierten Fahrzeugdaten“ zeigt sich eine durchschnittliche Distanz von 12,8 km (arithmetisches Mittel)<sup>60</sup>. Dabei liegen die mittleren 50 % aller Distanzen, also jene zwischen dem 0,25- und 0,75-Quantil, in einem Bereich von 4,8 bis 15,2 km. Das 0,9-Quantil (90 % aller Werte) beträgt 27,7 km und das Maximum ergibt sich zu rund 500 km.

Die relative sowie die kumulierte Häufigkeitsverteilung der Standdauer am Taxistandplatz sind in Abbildung 3-4 dargestellt. Zum Vergleich sind zusätzlich die Verteilungen der Fahrdauern eingetragen. Diese zeigen, analog zu den Distanzen, die prozentualen Anteile der empirisch erhobenen Fahrt- und Standdauern über alle Wochentage. Die Klassenbreite beträgt dabei fünf Minuten. Der arithmetische Mittelwert der Standdauern liegt bei 18,6 Minuten, wobei 50 % der Werte (0,25- bis 0,75-Quantil) in einem Bereich von 6,5 bis 25,8 Minuten anzufinden sind. Abhängig von Tageszeit und Lage des Taxistandplatzes sind bis zu 50 % der Wartezeiten sogar kürzer als 10 Minuten [53].

In Bezug auf die Fahrdauer je Taxifahrt ergibt sich ein arithmetischer Mittelwert von 36,3 Minuten und somit im Durchschnitt eine deutlich längere Zeitspanne für die Taxifahrt als für das Verweilen am Taxistandplatz. Das 0,25- und 0,75-Quantil der Fahrdauern beträgt 14,7 sowie 43,2 Minuten und 90 % aller Taxifahrten besitzen eine Dauer unter 76,2 Minuten. Hingegen sind 90 % der Standdauern am TSP kleiner als 40,6 Minuten.

Wie beim motorisierten Individualverkehr (MIV) – bei dem etwa 95 % der Wege kleiner als 50 km ausfallen [58] – sind es im Allgemeinen nicht die Distanzen der einzelnen Taxifahrten, die ein Hindernis für den Umstieg auf Elektrofahrzeuge darstellen [53]. Reichweitenprobleme ergeben sich vor allem durch die Summe aufeinanderfolgender Taxifahrten und des Fehlens von Lademöglichkeiten zwischen diesen. Beim MIV zeigen sich zudem beträchtliche Standzeiten über mehrere Stunden, z. B. an den Standorten „Zuhause“ bzw. „am Arbeitsplatz“ (siehe u. a. [58, 59, 60]), die ohne Weiteres für das Laden der Antriebsbatterie mit geringen Leistungen ausreichen. Im Taxigewerbe hingegen ergeben sich während des Taxibetriebs – wie u. a. die mittlere Standdauer am TSP zeigt – deutlich kürzere durchgängige Standzeiten. Deshalb muss für einen rein elektrischen Taxiverkehr die notwendige öffentliche Ladeinfrastruktur ausreichend dimensioniert werden. Diese Thematik wird vor allem ab dem Kapitel 6.2 „Ladeinfrastrukturausbau“ aufgegriffen und im Detail untersucht.

---

<sup>60</sup> Im Forschungsprojekt „ZENEM“ [53] zeigen sich etwas andere Werte, da die Simulationen modellbedingt auf „Ketten von Taxifahrten“ anstatt – wie in dieser Arbeit – auf den individuellen Taxifahrten basieren. Der im Forschungsprojekt „ZENEM“ gewählte Ansatz hatte eine weitaus stärkere Reduktion der Daten zur Folge.

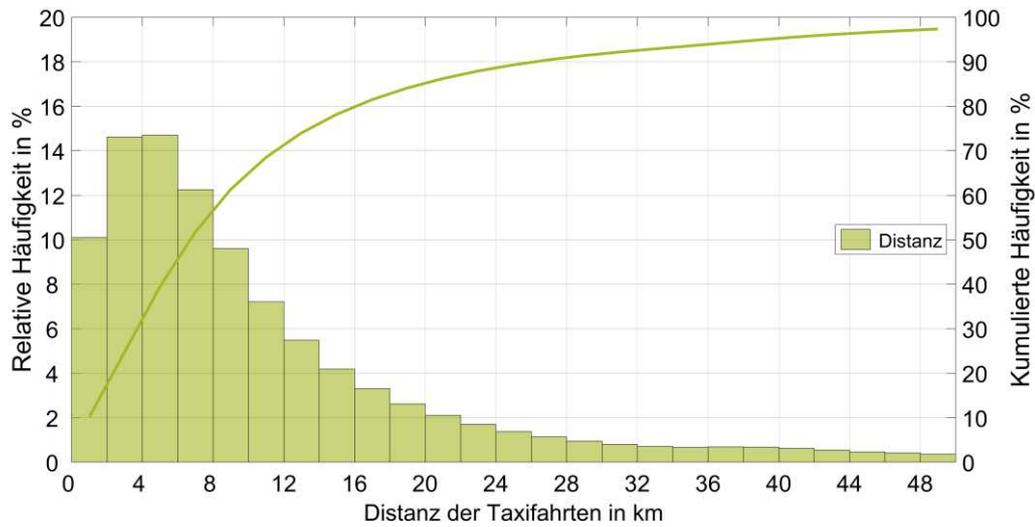


Abbildung 3-3: Prozentuale Verteilung der Distanz der Taxifahrten zwischen zwei Taxistandplätzen (alle Wochentage)

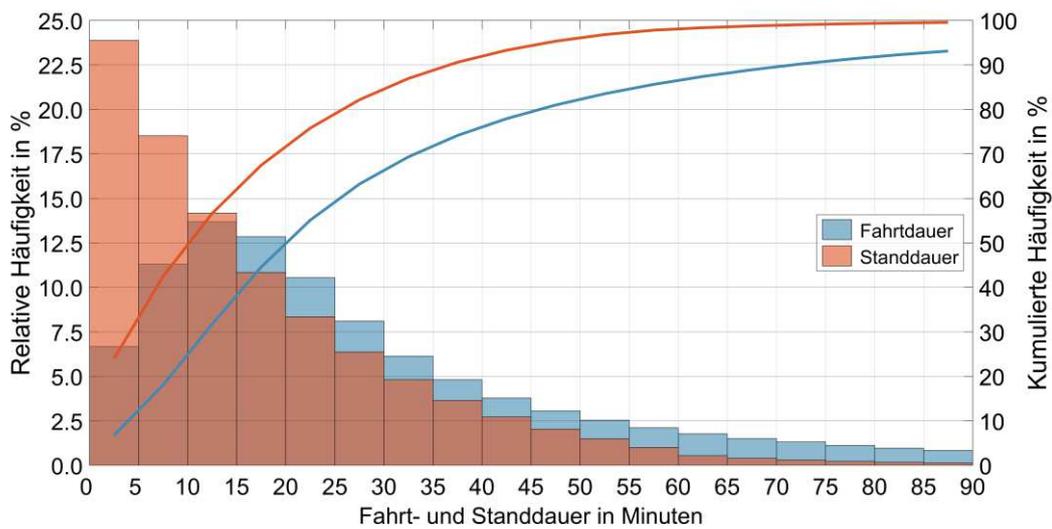


Abbildung 3-4: Prozentuale Verteilung der Fahrtdauer je Taxifahrt sowie der Standdauer an den Taxistandplätzen (alle Wochentage)

Abbildung 3-5 bis Abbildung 3-7 stellen die Verteilung der Standdauern sowie jene der Fahrtdauern und der zurückgelegten Distanzen der Taxifahrten neuerlich dar, jedoch diesmal in Form von Boxplots und je Wochentag aufgetragen. Die Werte in diesen Diagrammen sind je Stunde gemittelt und auf die maximal auftretende Dauer (aus Fahrt- und Standdauern) bzw. auf die max. Distanz normiert.

Für die Wochentage „Montag“ bis „Donnerstag“ zeigen sich betreffend der enthaltenen Stand- und Fahrdauern ähnliche Niveaus. Tendenziell längere Fahrdauern ergeben sich vor allem freitags und niedrigere an Sonntagen. Im Hinblick auf die Länge der Standdauern fällt der Mittelwert von Wochenbeginn in Richtung Samstag ab und steigt am Sonntag wieder an. Auch die Interquartilsabstände werden von Montag bis Freitag geringer. Dies lässt sich durch eine zum Wochenende hin steigende Frequenz an KundInnen erklären. [53]

Darüber hinaus sind die Standdauern an den Taxistandplätzen im Mittel deutlich kürzer als jene Zeitspannen, in denen die Taxifahrzeuge unterwegs sind (also nicht am Taxistandplatz stehen). Jedoch schwankt das Verhältnis stark mit der Tageszeit. Die längsten Standdauern ergeben sich an Wochentagen nachmittags. [53]

Die zurückgelegten Distanzen aller Taxifahrten, also jene Wegstrecken zwischen zwei Taxistandplätzen, sind in Abbildung 3-5 je Stunde zu mittleren Wegelängen zusammengefasst und den Wochentagen zugeordnet. Die Wegelängen sind mit dem im Datensatz enthaltenen Maximalwert skaliert. Der Mittelwert je Wochentag steigt dabei geringfügig in Richtung Sonntag an. Hingegen nehmen die Maximalwerte im Laufe der Woche von Montag bis Sonntag sukzessive ab. [53]

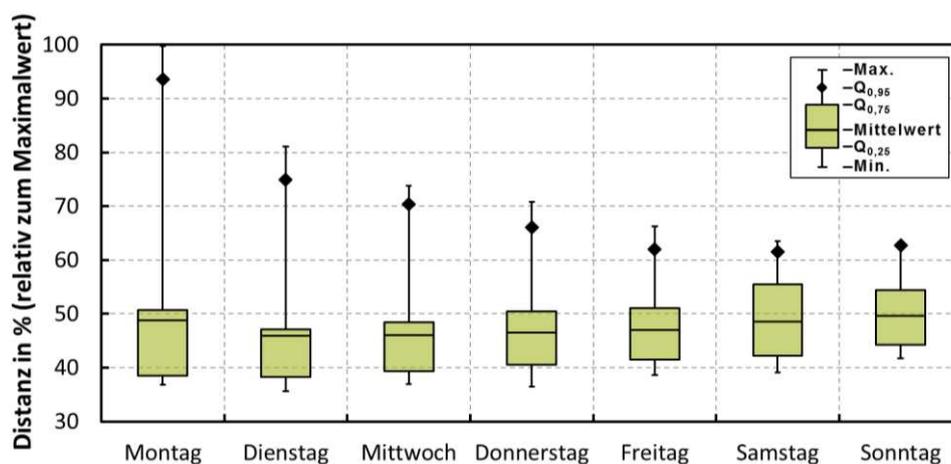


Abbildung 3-5: Mittlere relative Distanz der Taxifahrten zwischen zwei Taxistandplätzen pro Stunde und Wochentag (bezogen auf den Maximalwert; Quelle: [53], eigene Darstellung)

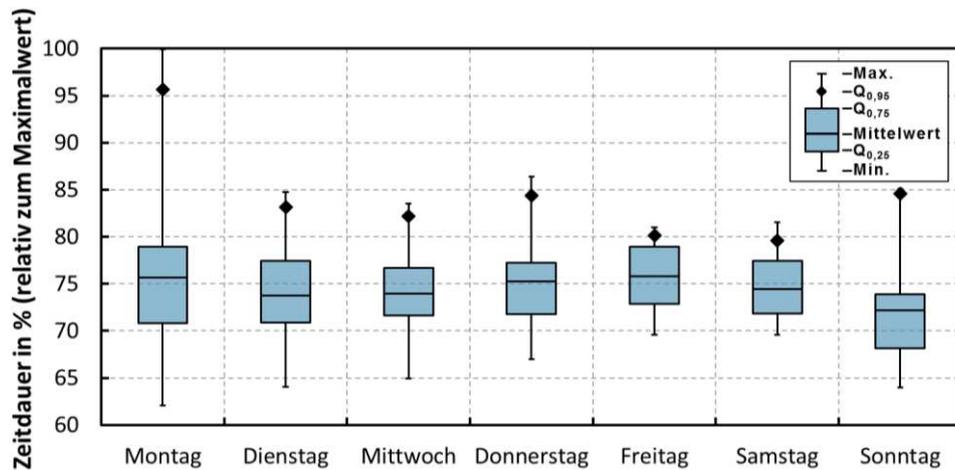


Abbildung 3-6: Mittlere relative Dauern der Taxifahrten zwischen zwei Taxistandplätzen pro Stunde und Wochentag (bezogen auf den Maximalwert; Quelle: [53], eigene Darstellung)

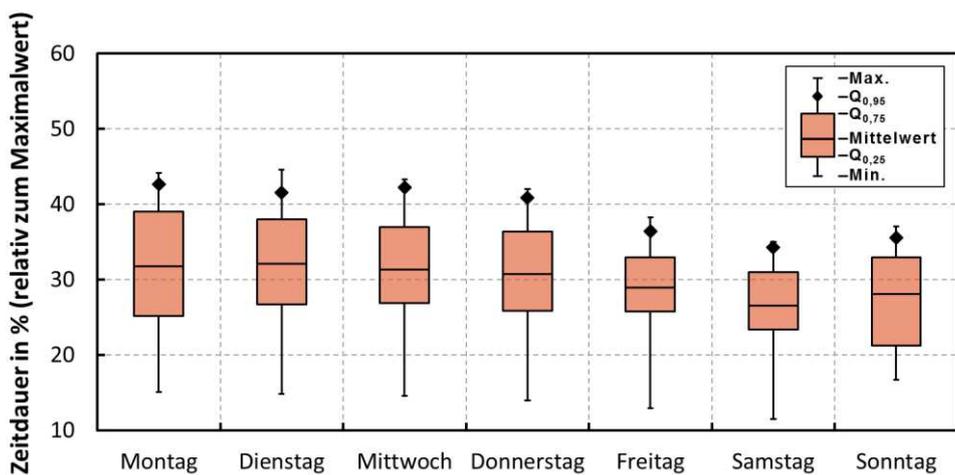


Abbildung 3-7: Mittlere relative Standdauern an den Taxistandplätzen pro Stunde und Wochentag (bezogen auf den Maximalwert; Quelle: [53], eigene Darstellung)

In den zuvor gezeigten Abbildungen lässt sich die Schwankungsbreite des arithmetischen Mittelwerts für „Standdauer“, „Fahrtdauer“ und „Distanz“ je Wochentag bereits klar erkennen. Um darüber hinaus die Abhängigkeit der Mobilitätsmerkmale von der Uhrzeit zu verdeutlichen, ist in Abbildung 3-8 beispielhaft die mittlere „Fahrtdauer“ je Stunde dargestellt. Gerade am Wochenende ist der Unterschied der Mittelwerte zwischen Nacht- und Tagesstunden deutlich sichtbar. Die Merkmale „Standdauer“ (am TSP) sowie „Distanz“ (der Taxifahrten)<sup>61</sup> weisen ebenfalls ähnliche Schwankungsbreiten

<sup>61</sup> Die zugehörigen Abbildungen sind im Anhang A „Ergänzende Abbildungen“ zu finden.

auf und untermauern die Notwendigkeit einer gebührenden Berücksichtigung der zeitlichen Abhängigkeiten. Aus diesem Grund werden die Mobilitätsmerkmale – wie dargestellt – auf Basis von Stunden und Wochentagen unterteilt und dementsprechend getrennt voneinander in die Modellierung der Mobilitätsdaten integriert (siehe Kapitel 4.3 „Approximation der Verteilungen – Angewandte Methodik“).

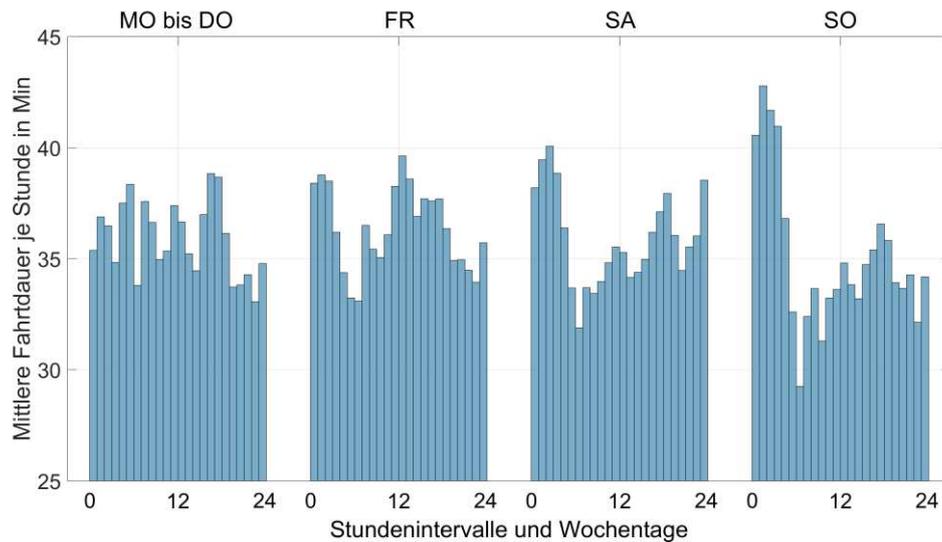


Abbildung 3-8: Abhängigkeit des Merkmals „Fahrdauer“ von der Uhrzeit und je Wochentag (Mittelwerte der Daten je Stunde)

Abgesehen von Distanz und Dauer je Taxifahrt spielt in Bezug auf die technische Machbarkeit und die resultierenden Netzauswirkungen vor allem der Energiebedarf eine wesentliche Rolle. Die Verteilung des ermittelten Energiebedarfs je Taxifahrt ist in Abbildung 3-9 ersichtlich. Da der zusätzliche Energieaufwand durch Nebenverbraucher im Forschungsprojekt „ZENEM“ noch nicht beziffert wurde, beinhalten die dargestellten Werte vorerst noch keine Nebenverbraucher. Für die Klimatisierung im Fahrzeug (Heizung bzw. Klimaanlage) wird zu einem späteren Zeitpunkt der zusätzliche Energieaufwand addiert (siehe Kapitel 5.1.2 „Realisierung“).

Für den absoluten Energiebedarf je Taxifahrt ergibt sich ein arithmetischer Mittelwert von 2,5 kWh (exkl. Nebenverbraucher). Die zugehörigen 0,25- und 0,75-Quantile betragen 1,0 sowie 3,0 kWh und 90 % aller Taxifahrten benötigen weniger als 5,4 kWh (vergleiche dazu Abbildung 3-9).

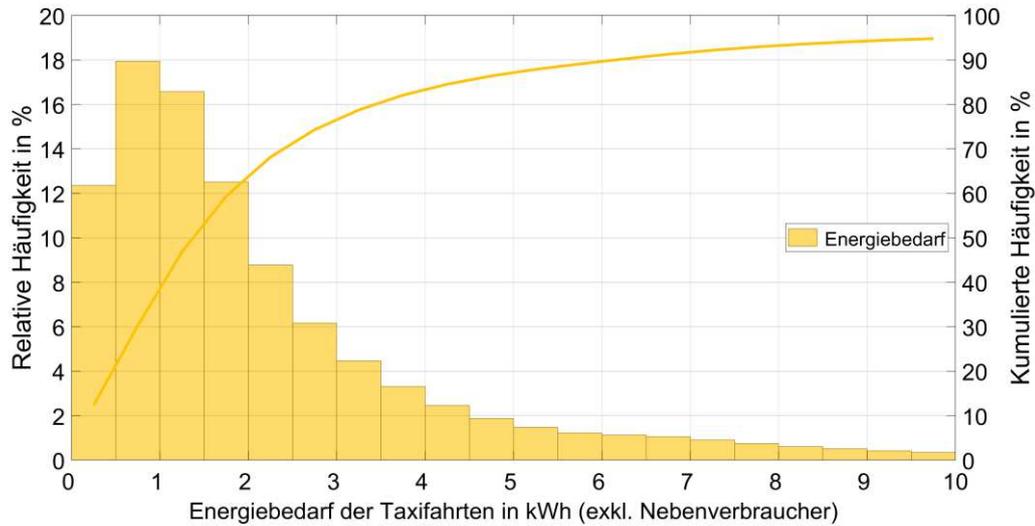


Abbildung 3-9: Prozentuale Verteilung des Energiebedarfs der Taxifahrten zwischen zwei Taxistandplätzen (alle Wochentage)

### 3.1.2 Nutzungshäufigkeit der Taxistandplätze

Wie bereits im Kapitel 2.4 erläutert, gibt es in Wien aktuell ca. 280 Taxistandplätze mit insgesamt etwa 1.680 Auffahrmöglichkeiten. Diese sind mit einer entsprechenden Verdichtung in Richtung Innenstadt über das Stadtgebiet verteilt (siehe Abbildung 3-10). Dabei besitzt die Hälfte der Taxistandplätze zumindest sechs Stellplätze. Der aktuell größte TSP befindet sich beim Hauptbahnhof mit Platz für insgesamt 28 Taxis. [50]

Die hier zugrunde gelegten „GPS-basierten Fahrzeugdaten“ beinhalten insgesamt 1,7 Mio. Taxifahrten und beziehen sich auf eine Flotte von mehr als 800 Taxis sowie über den Betrachtungszeitraum eines Jahres. Die „GPS-basierten Fahrzeugdaten“ besitzen dabei einerseits Informationen darüber, wann die Taxistandplätze angefahren bzw. verlassen werden, und andererseits wo die Taxisstandplätze positioniert sind. Daraus lässt sich u. a. die Nutzungshäufigkeit der Taxistandplätze ableiten.

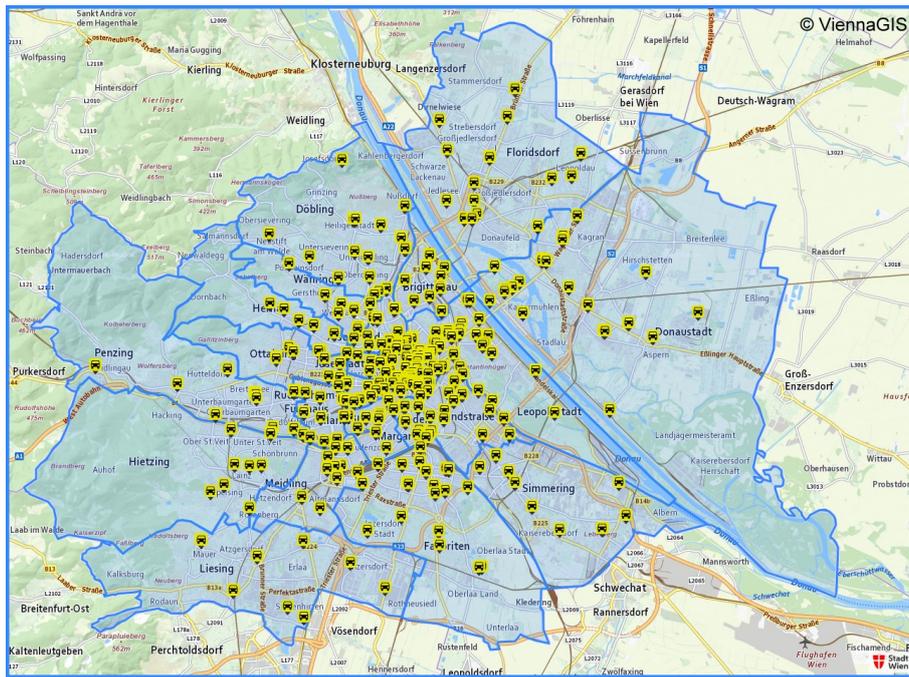


Abbildung 3-10: Wien.at-Stadtplan mit Darstellung der Wiener Taxistandplätze (gelb markiert; Quelle: [61], eigene Darstellung)

In Tabelle 3-2 ist der Anteil aller Taxifahrten aufgelistet, die von einem Taxisstandplatz im Bezirk  $x$  startet. Jene Bezirke, in denen jeweils über 6 % und zusammen mehr als ein Drittel aller betrachteten Taxifahrten beginnen, sind der 1., 2., 3., 10. und 19. Wiener Gemeindebezirk (Stadtbezirk). Dabei führt der 3. Bezirk (Landstraße) mit 8,2 % die Liste an. Die wenigsten Taxifahrten (2,2 %) starteten im Betrachtungszeitraum aus dem 8. Bezirk (Josefstadt).

Tabelle 3-2: Anteil der Taxifahrten in %, die im Bezirk  $x$  starten (TSP als Ausgangspunkt)

<b>Bezirk</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>Anteil in %</b>	6,1	6,3	8,2	2,6	4,7	2,4	2,8	2,2	4,8	7,8	2,5	4,6
<b>Bezirk</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	
<b>Anteil in %</b>	3,4	3,1	3,8	4,5	2,7	3,6	7,1	4,1	4,4	5,0	3,3	

Darüber hinaus beginnt und endet rund ein Drittel der betrachteten Taxifahrten im selben Bezirk. 16 % aller Taxifahrten haben sogar den identen Taxistandplatz als Start und Ziel.<sup>62</sup>

Die in Tabelle 3-2 angeführten Werte stellen die arithmetischen Mittelwerte über den gesamten Betrachtungszeitraum dar. Generell ergeben sich natürlich entsprechende Schwankungen in der Nutzungshäufigkeit für unterschiedliche Wochentage und Uhrzeiten. Diese lassen sich jedoch nicht nur auf Ebene der Bezirke, sondern vielmehr auf Ebene der einzelnen Taxistandplätze erkennen. Grund dafür ist einerseits der räumlich und zeitlich fluktuierende Bedarf auf KundInnenseite sowie andererseits die zeit- bzw. bedarfsabhängige Beschränkung diverser Taxistandplätze. Etwa ein Viertel der Wiener Taxisstandplätze besitzt Auffahrmöglichkeiten, die nicht uneingeschränkt 24 Stunden pro Tag genutzt werden können [62]. Deshalb ist es notwendig die Nutzungshäufigkeit der Taxistandplätze im Rahmen der anschließenden Modellbildung für alle Stundenintervalle je Wochentage getrennt voneinander zu berücksichtigen.

### 3.2 Kumulierte Flottendaten

Wie bereits erwähnt, nutzen die Taxifunkzentralen zur Vermittlung von Aufträgen die Statuswerte und Positionsdaten aller am Vermittlungssystem angemeldeten Funktaxis. Dabei verändern sich die Statuswerte laufend je nachdem, ob das Funktaxi gerade besetzt ist, sich am Weg zum Fahrgast befindet bzw. beim Kunden/bei der Kundin wartet oder am Taxistandplatz verweilt (vergleiche Tabelle B-1 im Anhang). Die zugehörigen Zeitreihen der Statuswerte geben in kumulierter Form u. a. darüber Auskunft, wie viele Funktaxis zeitgleich am Vermittlungssystem an- bzw. abgemeldet sind. Weiters lässt sich davon ableiten, wie viele Funktaxis gerade am Taxistandplatz stehen oder gerade eine Taxifahrt durchführen. Die Summe aus ab- sowie angemeldeten Funktaxis repräsentiert zudem die aktuelle Größe der Funktaxiflotte, die überdies einer natürlichen Fluktuation unterliegt. In Bezug auf den einjährigen Betrachtungszeitraum<sup>63</sup> der zugrunde

---

<sup>62</sup> Die FahrerInnen, die stets zum Ausgangspunkt (Start-TSP) zurückkehren, werden im Taxi-gewerbe liebevoll als „Brieftauben“ bezeichnet.

<sup>63</sup> Die von TAXI 31300 zur Verfügung gestellten „Kumulierten Flottendaten“ (Statuswerte) umfassen den Zeitraum von 16.03.2011 bis 15.03.2012 (gesamt 366 Kalendertage) und besitzen eine Auflösung zwischen 10 und 20 Minuten (33.691 einzelne Zeitstempel).

liegenden „Kumulierten Flottendaten“ ergibt sich im Mittel eine Flottengröße von 825 Funktaxis<sup>64</sup>.

Der Verlauf der gleichzeitig angemeldeten Funktaxis weist, abgesehen von einer starken „Wochentag“-Charakteristik, saisonale Schwankungen auf (z. B. aufgrund von Urlaubszeiten). In Abbildung 3-11 ist der saisonale Verlauf der gleichzeitig am Vermittlungssystem angemeldeten Funktaxis dargestellt. Vor allem in den Monaten Juli und August zeichnet sich ein deutlicher Rückgang ab. Ein ähnliches Bild ergibt sich außerdem in den Zeiträumen um Ostern und nach Neujahr.

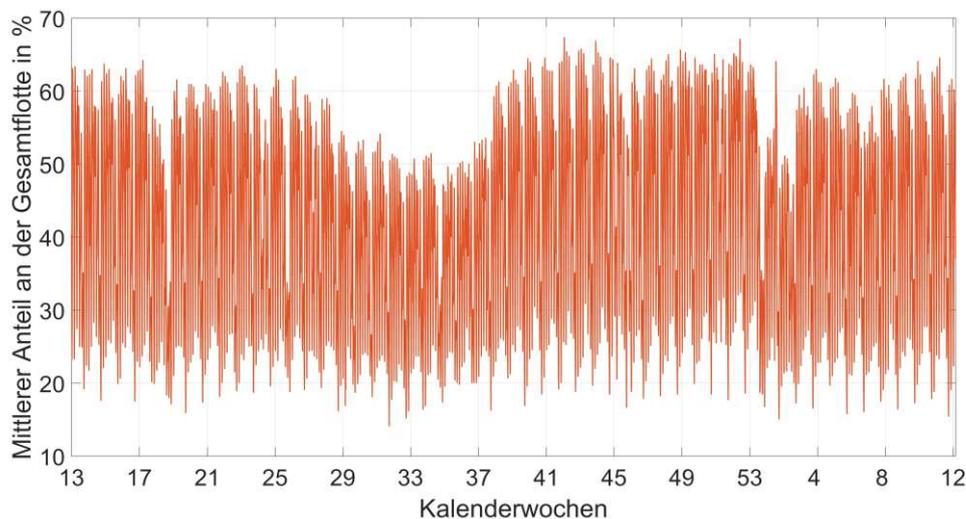


Abbildung 3-11: Saisonaler Verlauf der gleichzeitig angemeldeten Funktaxis (gesamte Funktaxiflotte, 03/11-03/12<sup>65</sup>)

Werden für die gesamte Funktaxiflotte die mittleren Verläufe der gleichzeitig angemeldeten, wartenden und fahrenden Funktaxis gebildet, so ist eine klare Wochentagscharakteristik erkennbar. Abbildung 3-12 erläutert diesen Sachverhalt. Dabei bezeichnet der Begriff „Warten“ das Verweilen am TSP (Standdauer) und „Fahren“ den Zeitraum der Taxifahrten (Fahrdauer). Es zeigt sich, dass von Montag bis Donnerstag um etwa 9 Uhr vormittags die meisten Taxis gleichzeitig „fahren“ (Taxifahrten durchführen). An Samstagen sowie vor Feiertagen verschiebt sich das Maximum der gleichzeitig „fahrenden“ Taxis Richtung Mitternacht und nimmt in den Nächten auf Samstage sowie

<sup>64</sup> Diese Fahrzeuge sind jedoch nicht im Besitz von TAXI 31300 (vergleiche Kapitel 2.4 „Das Taxigewerbe am Beispiel „Stadt Wien““).

<sup>65</sup> Die erste Kalenderwoche startet hierbei mit 1. Jänner.

Sonn- und Feiertage einen Wert von bis zu 45 % an. Für die nicht gemittelten Zeitwerte bedeutet dies, dass im einjährigen Betrachtungszeitraum maximal 62 % der Fahrzeuge simultan Taxifahrten durchführten.

Der Verlauf der zeitgleich angemeldeten Funktaxis besitzt ähnliches Verhalten. In den späten Nachtstunden noch vor Tagesanbruch ist nachfragebedingt im Betrachtungszeitraum regelmäßig weniger als ein Viertel der Funktaxiflotte am Vermittlungssystem angemeldet. An den Vormittagen von Montag bis Donnerstag sind hingegen im Allgemeinen die meisten Taxis am Vermittlungssystem eingeloggt (siehe Abbildung 3-12). Der genaue Zahlenwert ist stark von der Jahreszeit bzw. Saison abhängig (vergleiche Abbildung 3-11). Das Wochenmaximum schwankt hierbei im Betrachtungszeitraum zwischen 50 % und 66 % der gesamten Funktaxiflotte.

Sonntags und an Feiertagen ist eindeutig die geringste Anzahl an Funktaxis in Betrieb. Weiters zeigt sich, dass der Anteil der gleichzeitig am TSP wartenden Funktaxis stets geringer ist als jener der simultan durchgeführten Taxifahrten (gleichzeitig „fahrende“ Funktaxis). Es ergibt sich dabei ein mittleres Verhältnis von ca. 1:3. Dieses ist jedoch stark von der Uhrzeit und vom betrachteten Wochentag abhängig (vergleiche dazu Kapitel 3.1 „GPS-basierte Fahrzeugdaten“).

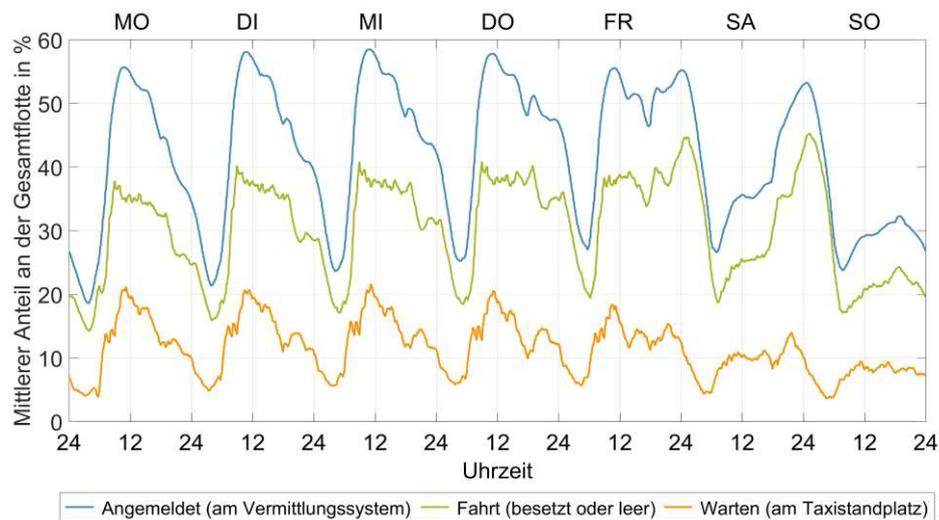


Abbildung 3-12: Gemittelte Wochenverläufe der gleichzeitig angemeldeten, fahrenden und stehenden Funktaxis (gesamte Funktaxiflotte, 03/11-03/12)

In der vorliegenden Arbeit werden die „Kumulierten Flottendaten“ analog zu den „GPS-basierten Fahrzeugdaten“ für die Modellierung der Mobilitätsdaten herangezogen (siehe Kapitel 4 „Modellbildung und Datenaufbereitung“). Bevor jedoch das zentrale Thema

„Modellierung“ näher behandelt wird, erfolgt zuvor noch eine Abgrenzung zu verwandten Arbeiten.

### 3.3 Abgrenzung zu verwandten Arbeiten

Auf den beiden zuvor ausführlich beschriebenen Mobilitätsgrundlagen „GPS-basierte Fahrzeugdaten“ und „Kumulierte Flottendaten“ basieren zwei weitere wissenschaftlich Arbeiten, an deren Ergebnisse die hier gesteckten Zielsetzungen und gewählten Methoden direkt anknüpfen. Dadurch wird es ermöglicht, weiterführende und vertiefende Untersuchungen in Bezug auf eine systemtechnische Integration von E-Taxis im urbanen Raum durchzuführen. Darüber hinaus werden, wie im Kapitel 1 „Einleitung“ angeführt, vor allem noch offene technische und organisatorische Fragen beantwortet.

Eingangs erfolgt eine Erläuterung zu den enthaltenden Informationslücken der gegebenen Mobilitätsdaten und zur Notwendigkeit einer umfassenden Datenverarbeitung und -aufbereitung. Basierend auf den folgenden Ausführungen wird im Anschluss eine deutliche Abgrenzung zu beiden Studien gegeben und die wesentlichen Anknüpfungspunkte dargelegt.

#### Informationsqualität der GPS-basierten Fahrzeugdaten

Trotz der Informationsvielfalt beider Datensätze (GPS-basierte Fahrzeugdaten und kumulierte Flottendaten) und den unterschiedlichen Blickwinkeln, die damit auf das Mobilitätsverhalten von Funktaxifloten ermöglicht werden, bleiben dennoch gewisse Informationslücken bestehen. Die damit einhergehenden Schwierigkeiten werden im Folgenden näher beleuchtet.

Generell kann davon ausgegangen werden, dass sich ein/eine LenkerIn eines Funktaxi zu Beginn der Taxischicht am Vermittlungssystem anmeldet (authentifiziert) und am Ende wieder abmeldet. Dabei wird vom Flottenmanagementsystem automatisch eine fortlaufende ID-Nummer vergeben. Diese wird gemeinsam mit den Statuswerten und Positionsdaten der Funktaxi für die Auftragsvermittlung eingesetzt und beim Trennen vom Vermittlungssystem wieder zurückgezogen. Wobei ein Trennen vom Vermittlungssystem gewollt mittels manueller Abmeldung erfolgen kann (u. a. am Ende der Taxischicht bzw. im Rahmen einer Pause) oder aber auch systembedingt z. B. durch einen Übertragungsfehler oder mitunter an den Tagesgrenzen. Dies ist für die Vermittlung nicht weiter dramatisch.

Beim darauffolgenden Wiederanmelden wird dem Funktaxi eine neue ID-Nummer zugewiesen. Es kommt dadurch vor, dass einem Taxi im Laufe einer einzelnen Taxischicht mehrere ID-Nummern zugewiesen werden. Im Rahmen des Forschungsprojekts

„ZENEM“ wurde u. a. diese ID-Nummer genutzt, um die Teilabschnitte der Originaldaten zu ganzen Taxifahrten zusammenzufügen. Über den Zeitbereich einer aktiven ID-Nummer können die zugehörigen Taxifahrten eindeutig einem Fahrzeug zugeordnet und somit verkettet werden. Ändert sich jedoch die ID-Nummer aus den genannten Gründen, dann kann eine eindeutige Zuordnung nicht mehr erfolgen<sup>66</sup> und die Kette endet. Somit geht durch ungewollte Änderungen der ID-Nummern der essentielle Zusammenhang zwischen Schichtgrenzen (An- und Abmelden) und Vergabe bzw. Rücknahme der ID-Nummern verloren.

Demzufolge besitzen die im Rahmen des Forschungsprojekts „ZENEM“ reproduzierten Ketten von einzelnen Taxifahrten eine relativ kurze Zeitspanne. Rund 50 % umfassen eine Dauer von weniger als 2,5 Stunden und stellen höchstwahrscheinlich keine vollständigen Taxischichten dar.

Da jedoch diese Information essentiell für das Erreichen der hier gesteckten Zielsetzung ist, machen es diese Umstände erforderlich, den Beginn und das Ende der Taxischichten auf andere Weise zu ermitteln sowie die gesamte Datengrundlage neu aufzubereiten. Als Ergebnis soll eine lückenlose Verknüpfung aller Taxifahrten über einen beliebigen Zeitraum hinweg ermöglicht werden (siehe dazu Kapitel 4 "Modellbildung und Datenaufbereitung").

### 3.3.1 Abgrenzung zum Forschungsprojekt „ZENEM“

Im Rahmen des abgeschlossenen Forschungsprojekts „ZENEM“<sup>67</sup> wurden für unterschiedliche Szenarien die Auswirkungen von zukünftigen E-Taxis auf das Verteilernetz in Wien untersucht. Um dabei grundlegende Aussagen bezüglich einer Umstellung von konventionell betriebenen Fahrzeugen auf E-Taxis treffen zu können, wurden die vorhandenen Mobilitätsdaten entsprechend ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Erweiterung des derzeitigen Funktaxibetriebs auf Elektrofahrzeuge prinzipiell möglich ist.

---

<sup>66</sup> Bei entsprechender zeitlicher und räumlicher Nähe zwischen Rückzug der alten und Vergabe der neuen ID-Nummer kann mitunter eine eindeutige Zuordnung auf Basis der GPS-Daten des zugehörigen Funktaxis durchgeführt werden.

<sup>67</sup> Das Forschungsprojekt „ZENEM“ (Zukünftige Energienetze mit Elektromobilität) wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „NEUE ENERGIEN 2020“ im Zeitraum von Mai 2011 bis April 2013 durchgeführt.

Konkret sind 25 % aller betrachteten Taxischichten elektrisch bewältigbar, wenn die folgenden Annahmen und Rahmenbedingungen eingehalten werden [53]:

- Jedes elektrisch betriebene Funktaxi ist mit einer Batteriekapazität von 24 kWh ausgestattet.
- An 20 Taxistandplätzen (50 kW je Ladepunkt) bzw. an 26 Taxistandplätzen (22 kW je Ladepunkt) sind (Schnell-)Ladestationen errichtet.
- Ladevorgänge werden ausschließlich während der Wartezeit auf neue Aufträge/Fahrgäste durchgeführt.
- Damit unerlaubte Leitungsbelastungen vermieden werden, ist eine dezentrale sowie bedarfsgerechte Ladesteuerung aktiviert.

Bei Verdopplung des Ladestationenausbaus, des Ladeleistungslevels und der Batteriekapazität könnten sogar 75 % aller Funktaxischichten elektrisch durchgeführt werden [53].

Wie diese beiden ausgewählten Beispiele demonstrieren, lassen die Ergebnisse des Forschungsprojektes „ZENEM“ deutliche Potenziale für E-Taxis im urbanen Raum erkennen und geben wesentliche Anhaltspunkte für weitere Schritte in Richtung Umsetzung. Jedoch sind sie für eine tatsächliche Realisierung noch zu wenig konkret.

Für einen/eine zukünftigen E-TaxilenkerIn stellen sich – abgesehen von den finanziellen Gesichtspunkten wie Investitions-, Energie- und Wartungskosten – ganz allgemeine Fragen wie:

- Wo besteht überhaupt die Möglichkeit, die Fahrzeugbatterie aufzuladen?
- Welche Dauer wird zum Laden einer bestimmten Energiemenge benötigt?
- Wie viele Ladevorgänge sind während einer Taxischicht erforderlich?
- Wie viele Taxifahrten können wegen der begrenzten Reichweite bzw. der Dauer der Ladevorgänge nicht angenommen werden und gehen verloren?

Die ersten beiden Fragen hängen natürlich stark von der räumlichen Verteilung der Ladestationen, der Anzahl an Ladepunkten, den verbauten Ladesteckvorrichtungen sowie der verfügbaren Ladeleistung der errichteten Infrastruktur ab.

Verglichen mit den gewählten Annahmen im Forschungsprojekt „ZENEM“ können diesbezüglich u. a. folgende Erweiterungen aufgelistet werden, die in der vorliegenden Arbeit Anwendung finden:

- Die optimierte Ausbauplanung der benötigten Ladeinfrastruktur verteilt die notwendigen Ladestandorte bedarfsgerecht im Stadtgebiet (siehe Kapitel 6 „Technische Machbarkeitsanalyse“). Die ermittelten Ladestandorte sind somit von den vorhandenen Taxistandplätzen entkoppelt.

- Ladevorgänge finden daher nicht notwendigerweise am Taxistandplatz während der vorgegebenen Wartezeiten statt, sondern werden batterie-ladezustandsabhängig und bedarfsorientiert vorgenommen.
- Zusätzlich wird die Möglichkeit einer Reservierung der Ladepunkte und ein entsprechendes Leitsystem berücksichtigt, um unnötige Fahrten zu besetzten Ladestationen zu vermeiden und dadurch Wartezeiten an den Ladestationen zu reduzieren.

In Bezug auf die Beantwortung der zuvor formulierten dritten sowie vierten Frage spielt zweifelsohne die nutzbare Batteriekapazität eine ausschlaggebende Rolle. Verglichen mit konventionellen Fahrzeugen ergeben sich bei rein elektrisch angetriebenen Taxis relativ eingeschränkte Reichweiten. Dadurch können einzelne Aufträge womöglich nicht durchgeführt werden und führen somit zu finanziellen Einbußen beim Taxilenker/bei der Taxilenkerin. Jedoch liegen, wie sich im Forschungsprojekt „ZENEM“ bereits gezeigt hat, nur rund 3 % aller Taxifahrten<sup>68</sup> über 50 km und wenige Promille erreichen überhaupt eine Distanz größer 100 km. Diesen Werten zufolge stellen für eine erfolgreiche E-Taxi-Nutzung nicht die Taxifahrten selbst die entscheidende Hürde dar, sondern die Verkettung aufeinanderfolgender Fahrten. Ein weiterer relevanter Parameter, der direkten Einfluss auf die Reichweite besitzt, ist natürlich der spezifische Energiebedarf in kWh pro 100 km. Dieser wird u. a. von der Masse und der Form des Fahrzeugs, der Fahrweise des Lenkers bzw. der Lenkerin sowie von der Nutzung diverser Nebenverbraucher (wie z. B. die Klimaanlage) beeinflusst. Im Gegensatz zu den Analysen in „ZENEM“ wird der Nebenverbrauch in den nachfolgenden Simulationen ebenfalls berücksichtigt (siehe u. a. Kapitel 5 „Generierung einer gesamten E-Taxiflotte“).

Die Ermittlung der reichweitenbedingten Anzahl an abzulehnenden Taxifahrten und der Anzahl an notwendigen Ladevorgängen je Taxischicht hängt jedoch nicht nur von der Batteriekapazität bzw. dem Energiebedarf ab, sondern setzt implizit auch die Kenntnis über Beginn und Ende der jeweiligen Taxischichten sowie Detailwissen über alle während einer Taxischicht vorkommenden Fahrten voraus.

---

<sup>68</sup> Zur Erinnerung: Als Taxifahrt wird hier die Summe aller Fahrten (Besetzt- und Leerfahrten) zwischen zwei Taxistandplätzen (TSP) bezeichnet.

Da strukturbedingt Informationen bezüglich Betriebszeiten in der vorhandenen Datengrundlage gänzlich fehlen und darüber hinaus die Datenqualität im Hinblick auf Vollständigkeit und Genauigkeit gewisse Mängel aufweist<sup>69</sup>, muss die Datengrundlage völlig andersartig aufbereitet werden.

Tabelle 3-3: Zusammenfassung der wesentlichen Unterscheidungsmerkmale zum Forschungsprojekt „ZENEM“

	Forschungsprojekt „ZENEM“	Vorliegende Arbeit
<b>Datengrundlage</b>	Empirische Erhebung	Stochastische Generierung
<b>Betriebsarten</b>	Keine Berücksichtigung	Tages-, Nacht- und Doppelschicht
<b>Betrachtungszeitraum</b>	Kette aus Taxifahrten	Kalenderjahr
<b>Ladedauer</b>	abhängig von der Standdauer am TSP	batterieladezustandsabhängig
<b>LIS-Standorte</b>	nur an TSP	gesamtes Stadtgebiet und betriebliche Standorte
<b>LIS-Reservierung</b>	keine	vorhanden
<b>Fahrverhalten</b>	keine Änderung	u. a. Zusatzfahrten zur LIS; Wegfall einzelner Taxifahrten <sup>a)</sup>
<b>Granularität der Ergebnisse</b>	auf Ebene einzelner Taxischichten	zusätzlich auf Fahrzeugebene
<b>Schwerpunkt</b>	Auswirkungen auf das Verteilernetz	plus Entscheidungshilfe für involvierte AkteurInnen

<sup>a)</sup> SOC-bedingt sowie aufgrund von Ladevorgängen.

Im Fall des Forschungsprojekts „ZENEM“ genügte es, Analysen auf Basis einzelner, nicht zusammenhängender Taxischichten durchzuführen. Dabei wurden jene Ketten von Taxifahrten als ganze Taxischicht angesehen, die eine Gesamtdauer von über sechs

<sup>69</sup> Vergleiche Abschnitt „Informationsqualität der GPS-basierten Fahrzeugdaten“ sowie Kapitel 3 „Mobilitätsdatengrundlage“.

Stunden aufweisen. Aufgrund dieser Annahme konnten jedoch nur 20 % der vorhandenen Ketten von Taxifahrten für die Berechnungen herangezogen werden.

Zur Erfüllung der hier gesteckten Zielsetzungen ist es hingegen erforderlich, Berechnungen auf Fahrzeugebene und durchgängig über einen längeren Betrachtungszeitraum vorzunehmen (z. B. über Wochen hinweg). Nur so können belastbare und weiterführende Erkenntnisse u. a. im Hinblick auf TaxiunternehmerInnen, TaxilekterInnen und Ladeinfrastrukturbetreiber gewonnen werden. Die diesbezüglich gewählte, weiterentwickelte Vorgangsweise wird in Kapitel 4 „Modellbildung und Datenaufbereitung“ ausführlich behandelt.

Eine Zusammenfassung der wesentlichen Unterscheidungsmerkmale und Abgrenzungen zum Forschungsprojekt „ZENEM“ sind in Tabelle 3-3 angeführt.

### **3.3.2 Abgrenzung zur Diplomarbeit „Synthetische Modellierung und Ladeprofilbildung einer elektrischen Taxi-Flotte“**

Die angeführte Diplomarbeit [63] beschäftigt sich mit der synthetischen Modellierung einer E-Taxiflotte, um u. a. die vorhandenen Informationslücken des GPS-basierten Datensatzes zu schließen. In der Diplomarbeit wird eine Methode beschrieben, die vereinfacht ausgedrückt alle in der Datengrundlage vorhandenen Taxifahrten<sup>70</sup> mittels Zufallsgeneratoren neu verkettet und durch ein mitunter wiederholendes Einfügen von bestehenden Taxifahrten ergänzt. Um die Problematik der fehlenden Zeitpunkte für Beginn und Ende der Taxischichten zu umgehen, wird der zeitliche Verlauf der gleichzeitig am Vermittlungssystem angemeldeten Taxis als Benchmark herangezogen (vergleiche Abbildung 3-12) und die Anzahl der betrachteten E-Taxis gemäß der gegebenen Flottengröße festgelegt. Beides kann aus den Zeitreihen der kumulierten Flottendaten ermittelt werden<sup>71</sup>. Damit der zeitliche Verlauf bestmöglich nachgebildet werden kann, wird in jedem Simulationsschritt die Anzahl der angemeldeten Taxis mit dem Benchmark verglichen und je nach Fehlbetrag eine entsprechende Anzahl an Taxis in Betrieb genommen bzw. außer Betrieb gesetzt.

Durch die herangezogene Vorgangsweise ergibt sich eine angemessene Übereinstimmung zwischen Modell und Datengrundlage – vor allem im Hinblick auf die Verteilungen

---

<sup>70</sup> Ohne Veränderung der zugehörigen Fahrdauer, der Distanz, des Energiebedarfs und der anschließenden Standdauer am TSP.

<sup>71</sup> Vergleiche dazu Abbildung 3-12 „Gemittelte Wochenverläufe der gleichzeitig angemeldeten, fahrenden und stehenden Funktaxis (gesamte Funktaxiflotte, 03/11-03/12)“ im Kapitel 3.2 „Kumulierte Flottendaten“.

der Mobilitätsmerkmale (wie Standdauer, Fahrdauer und Distanz) und den zeitlichen Verlauf der gleichzeitig am Vermittlungssystem angemeldeten Taxis. Jedoch stößt die gewählte Methodik in Bezug auf die enthaltenen Längen der Taxischichten an ihre Grenzen. Annähernd 22 % der generierten Taxischichten dauern über 40 Stunden und weisen somit unverhältnismäßig hohe Werte auf. Dadurch werden die Interpretation und Gewichtung der Ergebnisse problematisch.

Tabelle 3-4: Zusammenfassung der wesentlichen Unterscheidungsmerkmale zur Diplomarbeit „Synthetische Modellierung und Ladeprofilbildung einer elektrischen Taxi-Flotte“

	Verwandte Diplomarbeit	Vorliegende Arbeit
<b>Datengrundlage</b>	Wiederholende Verkettung einzelner Taxifahrten	Stochastische Generierung
<b>Betriebsarten</b>	Keine Berücksichtigung	Tages-, Nacht- und Doppelschicht
<b>Betrachtungszeitraum</b>	Kalenderwoche	Kalenderjahr
<b>Betriebsarten</b>	Keine Berücksichtigung	Tages-, Nacht- und Doppelschicht
<b>Ladedauer</b>	abhängig von der Standdauer am TSP	batterieladezustandsabhängig
<b>LIS-Standorte</b>	TSP und betriebliche Standorte	gesamtes Stadtgebiet und betriebliche Standorte
<b>LIS-Reservierung</b>	keine	vorhanden
<b>Fahrverhalten</b>	keine Änderung	u. a. Zusatzfahrten zur LIS; Wegfall einzelner Taxifahrten <sup>a)</sup>
<b>Schwerpunkt</b>	Technische Machbarkeitsanalyse	plus Entscheidungshilfe für involvierte AkteurInnen

<sup>a)</sup> SOC-bedingt sowie aufgrund von Ladevorgängen.

Um dies in der vorliegenden Arbeit zu vermeiden, werden vorab gebräuchliche Betriebsarten und -zeiten definiert und danach im Rahmen der stochastischen Generierung der Mobilitätsdaten separat berücksichtigt. Des Weiteren werden die Taxifahrten nicht aus dem gegebenen Datensatz gezogen, sondern – aus Gründen der Flexibilität – die Verteilungsfunktionen und deren Parameter für alle Merkmale (wie Distanz, Fahrt- und Standdauer) separat approximiert und daraus die einzelnen Taxifahrten erzeugt.

Darüber hinaus ergeben sich noch zusätzliche Abgrenzungen in anderen Bereichen. Eine Zusammenfassung weiterer Unterscheidungsmerkmale ist in Tabelle 3-4 ersichtlich.

## 4 Modellbildung und Datenaufbereitung

Bevor auf die eigentliche Modellbildung eingegangen wird, sind die relevanten Begriffe zu erläutern. Im Hinblick darauf ist zunächst der Begriff „Modell“ zu bestimmen. Ein Modell lässt sich verallgemeinert als beschränkte Abbildung der Wirklichkeit definieren. Als anschauliches Beispiel wird in [64] das analoge Medium „Landkarte“ angeführt, die – vereinfacht ausgedrückt – eine bestimmte, reale Landschaft auf einem Blatt Papier beschreibt. Dabei wird das Gelände weitgehend durch Höhenlinien dargestellt und mittels markanten Höhenpunkten (wie z. B. Gipfel) sowie dem Verlauf der Gewässer ergänzt. Für diese Art der Charakterisierung sind Angaben (Daten) notwendig, die u. a. durch Messung oder Beobachtung zu gewinnen sind.

Solche empirisch erhobenen Daten stellen somit die Grundlage der Statistik dar, wobei unter „Statistik“ die Vielzahl an Methoden verstanden werden kann, die eine systematische Verbindung zwischen Erfahrung (Empirie) und Theorie ermöglicht. Statistische Modelle werden – basierend auf den vorhandenen Daten – allgemein in Form von mathematischen Formeln repräsentiert, durch Zahlen gegeben oder als Grafik dargestellt. Daraus lässt sich die Definition des Modells etwas präziser formulieren:

*„Ein Modell ist die Beschreibung eines quantitativ erfassbaren Phänomens.“ [64]*

Treten nun bei den betrachteten Phänomenen zufällige Schwankungen auf, so ist damit stets der Begriff „Wahrscheinlichkeit“ verbunden und ein stochastisches Modell ist zur Beschreibung erforderlich. [64]

Dabei haben stochastische, d.h. zufallsabhängige Phänomene eine große Bedeutung in verschiedensten Bereichen des täglichen Lebens. Es gibt dafür unzählige Beispiele. Deshalb wird folgend lediglich eine überblicksartige Auflistung für stochastische Probleme und Modelle laut [65] gegeben:

- Warteschlangen (auch Netzwerke von Warteschlangen)
- Lagerhaltung
- Ausbreitung von Epidemien
- Populationsentwicklung
- Ausbreitung von Genen
- Wasserstand in einem Staudamm
- Aktienkurse
- Kapital eines Versicherungsunternehmens
- Belastung eines Bauteils eines Fahrzeugs während der Fahrt
- Temperaturverteilung auf der Erdoberfläche

## 4.1 Die Taxistandplätze – Ein Netzwerk von Warteschlangen

Aus den zuvor aufgelisteten Beispielen für stochastische Modelle sind – im Zusammenhang mit dem Betrieb von Taxis – vor allem Warteschlangen sowie Netzwerke von Warteschlangen zu nennen<sup>72</sup>, da sich mit der Warteschlangentheorie das System von Taxistandplätzen sowie die zugrundeliegenden Abläufe anschaulich darstellen lassen.

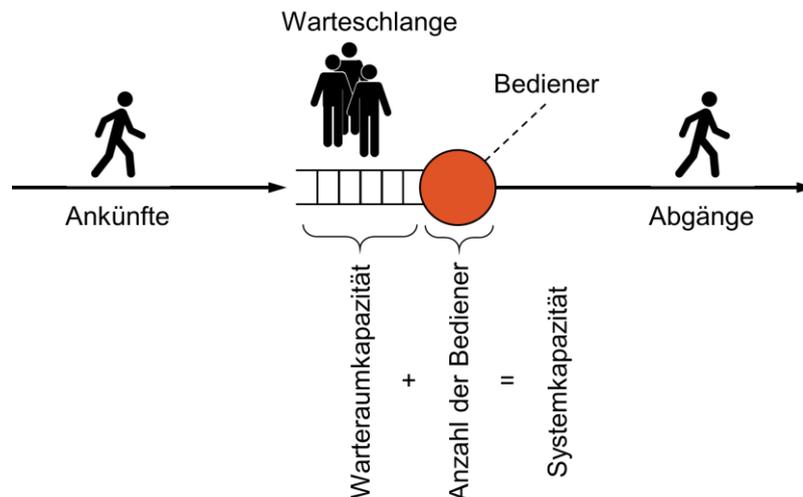


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung eines Warteschlangenprozesses  
(Quelle: [66], eigene Darstellung)

Allgemein treten Warteschlangen dann auf, wenn die aktuelle Nachfrage von einem Service oder einer Bedienung die momentane Kapazität dieser Serviceeinrichtung übersteigt (vergleiche Abbildung 4-1).

Dies gilt in gleicher Weise für das bildhafte Beispiel „Fahrkartenschalter“ (nicht zu verwechseln mit Fahrkartenautomaten). „Fahrkartenschalter sind u. a. an Bahnhöfen anzufinden und es können an ihnen Fahrkarten erworben oder auch Auskünfte erfragt werden. In der Regel hängen die Anzahl der am Fahrkartenschalter wartenden KundInnen, die Zeitpunkte ihres Eintreffens sowie deren Bedienungszeit vom Zufall ab. Wird beispielsweise angenommen, dass die mittlere Zeitspanne zwischen dem Eintreffen zweier aufeinanderfolgender KundInnen ident ist mit ihrer mittleren Bedienungszeit, so ist das System prinzipiell im Gleichgewicht. Es kommen also im Mittel genauso viele

<sup>72</sup> Dies gilt natürlich nur für Städte, die ortsfeste Taxistandplätze besitzen, wie eben Wien oder auch München. New York besitzt z. B. keine Taxistandplätze. Die gelben „NYC Taxi Cabs“ werden üblicherweise direkt von der Straße „herangewunken“.

KundInnen an, wie bedient werden können. Dies gilt jedoch nur bei deterministischer, aber keinesfalls bei stochastischer Betrachtungsweise. Für die stochastische Betrachtung kann die Warteschlange nämlich beliebig lang oder kurz werden. [67]

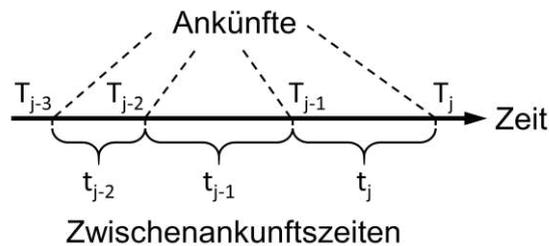


Abbildung 4-2: Zusammenhang von Ankunftszeiten und Zwischenankunftszeiten  
(Quelle: [66], eigene Darstellung)

Ganz allgemein können Warteschlangenmodelle durch vier mittels Schrägstrich getrennte Symbole charakterisiert werden [65]:

$$V_A / V_B / A_B / K_{max} \quad (4.1)$$

$V_A$ ... Verteilung der Zwischenankunftszeiten,

$V_B$ ... Verteilung der Bedienzeiten,

$A_B$ ... Anzahl der „Bediener“<sup>73</sup>,

$K_{max}$ ... maximale Kapazität.

Dabei gibt die Zwischenankunftszeit jene Zeitspanne an, die zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kundenankünften<sup>73</sup> liegt (vergleiche u. a.  $t_j = T_j - T_{j-1}$  in Abbildung 4-2). Je nachdem, welches System betrachtet wird, ergeben sich unterschiedlich verteilte Zwischenankunftszeiten. Dabei kann für  $V_A$  entweder direkt die zugrundeliegende Verteilung angeschrieben oder eine Klasse von Verteilungen angegeben werden<sup>74</sup>. Analoges gilt für die Angabe der Verteilung der Bedienzeiten  $V_B$ . [65]

<sup>73</sup> Da sich die Modellparameter „Bediener“ und „Kunde“ keinesfalls nur auf Personen beziehen, sondern auch Gegenstände repräsentieren (wie z. B. gestapelte Anträge), wird in diesem Zusammenhang auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet.

<sup>74</sup> Wie z. B. G für „general“ also beliebig, D für „deterministisch“, M für „Markovsch“, d.h. exponentialverteilt oder Ek für „Erlangverteilung mit Formparameter k“.

Die dritte Position stellt die Anzahl der „Bediener“  $A_B$  in Form einer natürlichen Zahl dar. Diese kann unter Umständen auch  $\infty$  gesetzt werden, wenn ein Verzögerungsknoten eingebunden werden soll (z. B. das Zusammenstellen der Waren im Supermarkt). [66]

In der vierten Position steht ebenfalls eine natürliche Zahl. Sie gibt die maximal erlaubte Anzahl von „Kunden“ in der Warteschlange  $K_{max}$  an. Dabei wird angenommen, dass Ankünfte bei vollem System abgewiesen werden. Besitzt die Warteschlange keine Kapazitätsbeschränkung, dann wird – anstatt  $\infty$  einzutragen – die vierte Position meist leer gelassen. [65]

Neben einer Festlegung der Parameter muss ebenfalls die Reihenfolge definiert werden, in der die „Kunden“ zu bedienen sind (als Warteschlangendisziplin bezeichnet). Die gängigste Regel hierfür ist FIFO (“first in first out”). Seltener wird LIFO (“last in first out”, z. B. Stapel am Schreibtisch) verwendet. Es ist aber auch eine zufällige Auswahl bzw. eine Reihenfolge nach Prioritäten denkbar. [65]

Wird nun das Warteschlangenmodell auf das konkrete Beispiel eines Taxistandplatzes (TSP) umgelegt und die Betrachtung aus Sicht der TaxilenkerInnen vorgenommen, so ergeben sich analoge Eigenschaften: Am TSP ist eine endlich lange Warteschlange von Taxis vorhanden, die einerseits durch die Ankunft von neuen Fahrgästen abgebaut und andererseits durch das Eintreffen weiterer Taxis „gespeist“ wird.

Sind die Taxistellplätze (wie z. B. in Wien) parallel zum Gehsteig angeordnet und besteht darüber hinaus für die TaxilenkerInnen die Verpflichtung, stets zum nächsten Taxi anzuschließen<sup>75</sup>, also keine Lücken am TSP entstehen zu lassen, so ergibt sich eine eindeutige Warteschlange. Jedoch sind Funktaxis im Vermittlungssystem ebenfalls in einer virtuellen Warteschlange gereiht. Kommt es zu einem Auftrag, dann verlässt der/die TaxilenkerIn unabhängig von der physikalischen Reihung am TSP seine/ihre Position und die nachfolgenden Taxis rücken auf. Dadurch ergibt sich eine Kombination aus zwei Warteschlangen, die jeweils für sich nach der FIFO-Regel abgebaut werden.

Da die Ankunftszeiten der Fahrgäste bzw. Aufträge sowie das Eintreffen der Taxis in erster Linie vom Zufall abhängen, bildet sich je nach Nachfrage bzw. Taxiverfügbarkeit eine längere oder kürzere Warteschlange am TSP.

Wie bereits erwähnt, werden Warteschlangenmodelle durch vier Parameter charakterisiert, die Verteilung der Zwischenankunfts- und der Bedienungszeiten, die Anzahl der „Bediener“ und die maximale Kapazität.

---

<sup>75</sup> Siehe z. B. § 34. (1) der Wiener Taxi-, Mietwagen- und Gästewagen-Betriebsordnung [48]

Die maximale Kapazität stellt die am TSP gekennzeichnete maximal erlaubte Anzahl an Taxifahrzeugen dar. In Bezug auf den Bedienprozess am TSP kommt es hingegen zu einem Rollentausch.

In der Praxis werden natürlich die Fahrgäste eher als KundInnen bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch der Taxibetrieb aus der Perspektive des Taxis betrachtet. Dabei besteht auf der Seite des Taxis bzw. des/der TaxilenkerIn eine Nachfrage an Fahrgästen. Ganz allgemein baut die Nomenklatur der Warteschlangentheorie auf dem „wartenden“ Element auf (z. B. Kunde/Kundin an der Kassa oder Antrag am Bearbeitungsstapel) und in Bezug auf den Taxistandplatz ist dies eben das Taxifahrzeug. Deshalb wird im TSP-Warteschlangenmodell der Akteur „Kunde“ durch das Taxi bzw. den/die TaxilenkerIn repräsentiert.

Wird weiters unterstellt, dass die Fahrgäste stets – zumindest knapp – hintereinander eintreffen, dann kann die Anzahl der „Bediener“ mit „eins“ angenommen werden. Somit stellt die Bedienungszeit die Dauer bis zur Ankunft des nächsten Fahrgastes dar und die Zwischenankunftszeiten ergeben sich aus den Ankunftszeiten der Taxis am TSP.

Sind nun die Modellparameter charakterisiert, so müssen in einem weiteren Schritt die zugrundeliegenden Verteilungen für die Ankunftszeiten der Taxis und der Fahrgäste ermittelt und festgelegt werden. Dies geschieht im nachfolgenden Kapitel 4.3 „Approximation der Verteilungen – Angewandte Methodik“.

Zuvor wird jedoch noch näher auf das überlagerte Netzwerk von Taxistandplätzen eingegangen. In Wien gibt es zum Beispiel aktuell rund 280 TSP<sup>76</sup>, die – wie bereits beschrieben – nicht homogen über das Stadtgebiet verteilt sind. Nachfragebedingt ist eine deutliche Verdichtung in Richtung Innenstadt zu erkennen. Dabei steht es jedem/jeder TaxilenkerIn mit Konzession in Wien<sup>77</sup> frei nach einer Taxifahrt wieder einen der vorhandenen Wiener Taxistandplätze anzufahren („Grundsatz der freien Standplatzwahl“).

Zur anschaulichen Darstellung der Übergänge zwischen den einzelnen Taxistandplätzen, also dem Verlassen des momentanen TSP und der Ankunft am darauffolgenden TSP (der mitunter auch derselbe ist), wird das Modell der Markov-Kette herangezogen.

---

<sup>76</sup> Etwa drei Viertel der Taxistandplätze in Wien sind von 0 bis 24 Uhr uneingeschränkt nutzbar, und der restliche Teil besteht aus zeit- oder bedarfsbeschränkten Taxistandplätzen [62].

<sup>77</sup> Anfangsbuchstabe „W“ und Vormerkzeichen "TX" am KFZ-Kennzeichen

Allgemein beschreiben Markov-Ketten zufällige Vorgänge mit endlich oder abzählbar unendlich vielen Zuständen (siehe Abbildung 4-3). Markov-Ketten können dabei unterschiedliche Ordnungen besitzen. Im vorliegenden Fall werden jedoch nur Markov-Ketten erster Ordnung betrachtet. Dies bedeutet, dass die Zukunft des Systems nur von der Gegenwart – also dem aktuellen Zustand – und nicht von der Vergangenheit abhängt. Dies wird als Markov-Eigenschaft bzw. Gedächtnislosigkeit bezeichnet. Die Übergänge zwischen den Zuständen finden somit unabhängig von der Vorgeschichte und dadurch mit vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten statt.

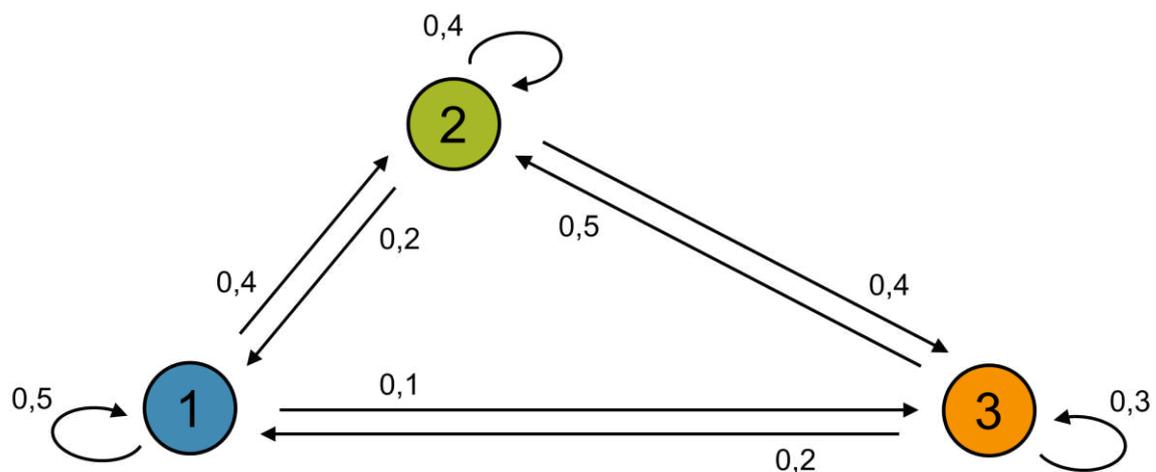


Abbildung 4-3: Graphische Darstellung einer beispielhaften Markov-Kette

Der Zustandsraum wird allgemein mit  $E$  bezeichnet und kann als  $E = \{1, \dots, n\}$  für  $n \in \mathbb{N}$  angeschrieben werden. Die Markov-Kette selbst ist durch eine Funktion  $P: E \times E \rightarrow [0, 1]$  charakterisiert, wobei  $P = (p_{ij})_{i,j \in E}$  die Übergangsmatrix darstellt. Jedem Zustand ist genau eine Zeile und eine Spalte zugeordnet und das Element  $p_{ij}$  gibt die Übergangswahrscheinlichkeit von  $i$  nach  $j$  an. Der Übergang von (1) nach (2) in Abbildung 4-3 besitzt z. B. ein Übergangswahrscheinlichkeit  $p_{12}$  von 40 %. Für  $p_{ij}$  gilt darüber hinaus nach [65]:

- (i)  $p_{ij} \geq 0$  für alle  $i, j \in E$ ,
- (ii)  $\sum_{j \in E} p_{ij} = 1$  für alle  $i \in E$ .

Bezüglich des Taxibetriebs stellen die einzelnen Taxistandplätze (TSP) die betrachteten Zustände dar und die Übergangsmatrix gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Taxistandplatz angefahren wird, wenn man vom momentanen Taxistandplatz ausgeht. Dabei werden die Matrixelemente  $p_{ij}$  aus den historischen GPS-basierten

Fahrzeugdaten auf Basis der enthaltenen relativen Häufigkeiten gebildet (vergleiche Kapitel 3.1.2 „Nutzungshäufigkeit der Taxistandplätze“).

Tabelle 4-1: TSP-Übergangsmatrix auf Bezirksebene zusammengefasst (gesamter Betrachtungszeitraum, Angaben in ganzzahligen Prozentwerten)

$p_{ij}$		Bezirke (Ziel)																						
		j=1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Bezirke (Start)	i=1	28	7	10	2	3	3	3	3	6	3	1	3	2	1	2	2	1	3	7	4	2	3	1
	2	7	30	10	2	3	2	3	2	4	3	2	2	1	1	2	2	1	2	5	7	3	5	1
	3	8	7	32	3	4	3	2	2	4	5	3	3	2	1	3	2	1	2	3	3	2	3	2
	4	8	5	13	15	7	4	3	3	5	6	2	4	3	1	3	3	2	3	4	2	1	1	2
	5	5	4	7	4	27	5	3	2	4	9	1	6	2	2	4	3	1	2	3	2	1	1	2
	6	8	4	8	3	8	14	6	4	5	4	1	5	3	2	6	4	2	3	5	2	1	1	1
	7	6	5	7	2	5	4	22	6	5	3	1	4	2	3	6	4	2	3	5	2	1	1	1
	8	7	5	8	3	4	4	6	21	7	2	1	3	2	2	3	4	2	4	6	3	1	1	1
	9	8	5	7	2	3	3	3	3	23	3	1	2	2	2	3	4	3	5	9	4	2	2	1
	10	3	3	7	4	6	2	2	1	2	42	3	4	2	2	3	2	1	1	2	2	1	2	3
	11	4	5	17	3	3	2	1	1	2	12	25	4	2	1	2	2	1	1	2	2	2	4	2
	12	4	3	6	2	7	3	3	1	2	10	2	25	7	3	5	3	1	2	2	2	1	1	5
	13	4	2	4	2	4	2	2	1	2	4	1	8	33	8	4	3	2	2	3	1	1	1	6
	14	2	2	3	1	3	2	2	1	2	3	1	5	9	35	7	8	3	3	3	1	1	1	2
	15	4	3	5	2	5	4	4	1	4	6	1	6	4	7	22	7	3	3	3	2	1	1	2
	16	3	3	3	1	3	2	3	2	4	3	1	3	3	6	5	36	6	4	4	2	1	1	1
	17	4	3	4	1	2	2	2	2	6	2	1	3	2	4	4	9	31	7	6	2	1	1	1
	18	5	3	5	2	3	2	2	3	7	2	1	2	2	2	3	5	5	27	13	3	1	1	1
	19	7	4	5	1	2	2	2	2	6	2	1	2	2	1	2	2	2	7	40	3	2	2	1
	20	5	12	6	1	2	1	2	2	5	3	1	2	1	1	2	3	2	3	7	29	5	4	1
	21	3	5	4	1	1	1	1	1	3	2	1	1	1	1	1	1	1	2	6	6	44	12	1
	22	4	8	6	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	3	4	10	47	1
	23	2	2	4	1	3	1	1	1	1	7	1	7	7	2	3	1	1	1	1	1	1	1	50

In Tabelle 4-1 ist die TSP-Übergangsmatrix auf Bezirksebene ( $23 \times 23$  Elemente<sup>78</sup>) in gerundeten Prozentwerten angegeben. Wie bereits erläutert, startet und endet ein Großteil der Taxifahrten im selben bzw. benachbarten Bezirk.

Für die Modellierung selbst wird die Übergangsmatrix nicht auf Bezirksebene, sondern über alle vorhandenen TSP berechnet. Darüber hinaus weisen die Matrixelemente  $p_{ij}$  u. a. aufgrund der schwankenden Nachfrage eine zeitliche Abhängigkeit auf (vergleiche Kapitel 3.1 „GPS-basierte Fahrzeugdaten“). In diesem Zusammenhang wird von zeitlicher Inhomogenität der Übergangsmatrix gesprochen [65].

Wie zuvor dargestellt, kann ein konkreter Taxistandplatz als Warteschlange modelliert werden. Kombiniert man nun die Eigenschaften einer Warteschlange mit jenen der Markov-Kette, die alle Übergänge zwischen den TSP beschreibt, so lässt sich ein Netzwerk von Warteschlangen formulieren und es ergibt sich somit eine sinnbildliche Darstellung für das System aller Taxistandplätze.

Analog zum Modell der Markov-Kette bestehen Netzwerke von Warteschlangen aus (endlichen) Graphen mit Knoten und gerichteten Kanten, wobei die Knoten nun durch Warteschlangen repräsentiert sind. Jeder Warteschlange werden dabei die Verteilungen der Zwischenankunftszeiten (Taxis) und Bedienungszeiten (Fahrgäste) sowie die maximale Anzahl an Taxis am TSP (max. Kapazität) zugeordnet. Die gerichteten Kanten geben im Prinzip weiterhin die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den diversen TSP an – jedoch nun um die Anzahl an Taxis erweitert, die sich gerade in Betrieb befinden. Abbildung 4-4 zeigt schematisch den vorliegenden Zusammenhang. Dabei entspricht  $\lambda_i$  der Ankunftsrate der Taxis am TSP  $i$  (Anzahl der Taxis pro Stunde) und  $p_{ij}$  der Übergangswahrscheinlichkeit von TSP  $i$  zu  $j$ .  $\mu_i$  stellt die Bedienrate dar und wird im Fall der TSP durch den Kehrwert der Zeitspanne (in Stunden) zwischen zwei nacheinander ankommenden KundInnen gebildet (Anzahl der KundInnen pro Stunde).

Zur Abbildung der „Außenwelt“ können u. a. eine Quelle  $s$  und eine Senke  $d$  eingefügt werden. Beim Taxibetrieb genügt hingegen ein zusätzlicher Knoten (Kombination „Quelle/Senke“), der den betrieblichen Abstellplatz<sup>79</sup> darstellt. Dieser Zustand wird eingenommen, wenn sich das Taxi nicht in Betrieb befindet. Im Gegensatz zu den Taxistandplätzen können die diversen betrieblichen Abstellplätze der Taxiunternehmen

---

<sup>78</sup> Wien gliedert sich politisch in 23 Wiener Gemeindebezirke (Stadtbezirke).

<sup>79</sup> Für jedes zugelassene Fahrzeug im Rahmen einer Konzession (Taxigewerbe) ist ein eigener Abstellplatz außerhalb von Straßen mit öffentlichem Verkehr nachzuweisen (vergleiche Kapitel 2.4).

zusammengefasst werden, da die genaue Adresse für die Simulation nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Der Zustand „betrieblicher Abstellplatz“ wird darüber hinaus auch nicht als eigene Warteschlange modelliert, sondern – gemäß den Betriebszeiten – von den einzelnen Taxis eingenommen bzw. verlassen. Dadurch ändert sich die Anzahl der Taxis im System der TSP und somit  $\lambda$  entsprechend dem Tagesverlauf.

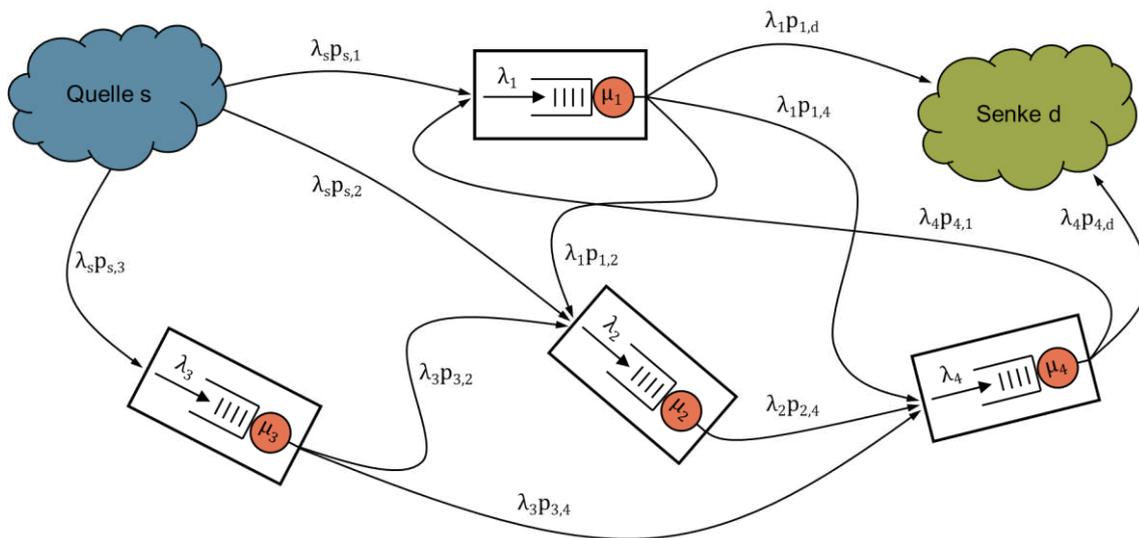


Abbildung 4-4: Schematische Darstellung eines Netzwerks von Warteschlangen  
(Quelle: [68], eigene Darstellung)

Bei der bisherigen Betrachtung des Netzwerks von Taxistandplätzen wurden zwar die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den Taxistandplätzen angegeben, jedoch die Taxifahrt an sich noch nicht behandelt. Die Taxifahrt selbst besitzt u. a. die wesentlichen Attribute „Dauer“, „Distanz“ und „Energiebedarf“. Dabei ist vorerst – in Bezug auf das Modell „Netzwerk von Warteschlangen“ – lediglich die Dauer der Taxifahrt von Belang. Verlässt ein besetztes Taxi den momentanen TSP, dann kann es sich nicht unmittelbar danach wieder an einem TSP einreihen. Der/die TaxilenkerIn muss natürlich erst den Fahrgast an das gewünschte Ziel bringen. Diese Verzögerung kann ebenfalls als Warteschlange dargestellt werden. Wie bereits angeführt, wird dabei eine unendlich große Anzahl an „Bedienern“ modelliert. Es ergibt sich somit eine „Warteschlange“ ohne Wartedauer und es wird nur die „reine Bedienungszeit“ schlagend (also die Dauer der Taxifahrt an sich).

Die Taxifahrt, als Warteschlange mit  $\infty$  „Bedienern“, wird in Serie nach jeder einzelnen TSP-Warteschlange im Netzwerk angefügt (vergleiche dazu Abbildung 4-5). Die Anzahl

der Taxis  $N_f$  in der Warteschlange „Taxifahrt“ ist damit stets null und die Bedienrate  $\mu_f$  ergibt sich aus dem Kehrwert der Dauer der Taxifahrten. Die von der Uhrzeit abhängigen Verteilungen der Fahrdauern werden wiederum aus den historischen GPS-basierten Fahrzeugdaten gebildet (siehe Kapitel 4.3 „Approximation der Verteilungen – Angewandte Methodik“).

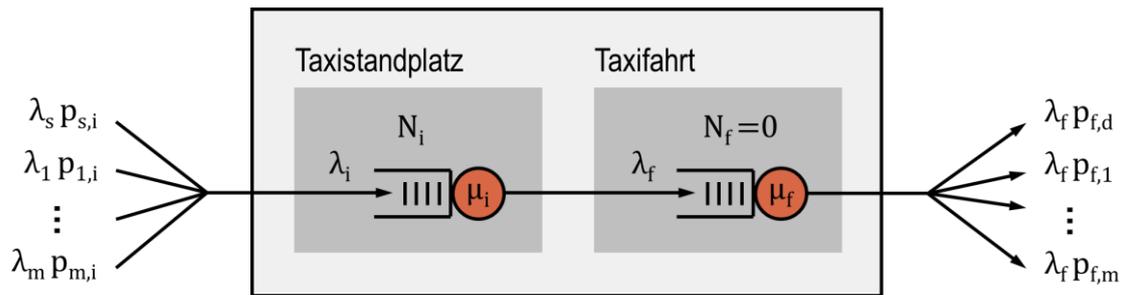


Abbildung 4-5: Serielle Kombination zweier Warteschlangen  
(Taxistandplatz + Taxifahrt)

Nachdem unter Zuhilfenahme von Markov-Ketten sowie der Warteschlangentheorie das System von Taxistandplätzen und die damit verbundenen Teilabläufe (u. a. Ankunfts-, Bedienungs- und Übergangsprozesse) veranschaulicht wurden, beschäftigen sich die folgenden Abschnitte mit der Ermittlung der konkreten Verteilungen und der zugehörigen Parameterwerte. Dazu gehören vorrangig:

- Beginn und Ende der jeweiligen Taxischichten (Betriebsarten und -zeiten)
- Fahrdauer und Distanz zwischen zwei Taxistandplätzen (die Taxifahrt)
- Energiebedarf der einzelnen Taxifahrten (Batterieladezustand)
- Ankunfts- und Bedienungszeiten am TSP (Standdauer)

## 4.2 Bestimmung der Betriebsarten und -zeiten

Wie bereits im Kapitel 2.4 (Das Taxigewerbe am Beispiel „Stadt Wien“) erläutert, gibt es – aus Sicht der TaxilenkerInnen – im Wiener Taxigewerbe formal zwei Schichttypen, die „Tagesschicht“ von 6:00 bis 18:00 Uhr und die „Nachtschicht“ von 18:00 bis 6:00 Uhr [44].

Dabei wird ein Taxi, also das Fahrzeug an sich, entweder im 1- oder im 2-Schichtsystem betrieben. Aus der Kombination beider Aspekte können primär drei „Betriebsarten“<sup>80</sup> abgeleitet werden und sind in der vorliegenden Arbeit wie folgt definiert:

- „Tagesschicht“: 1-Schichtsystem im Tagesbetrieb
- „Nachtschicht“: 1-Schichtsystem im Nachtbetrieb
- „Doppelschicht“: 2-Schichtensystem (Tag- und Nachtbetrieb)

Diese drei Betriebsarten werden bei der anschließenden, modellhaften Umstellung einer gesamten Taxiflotte auf rein elektrisch angetriebene Taxis herangezogen und untersucht, ob sich für den Betrieb von E-Taxis in Bezug auf das gewählte Schichtsystem signifikante Unterschiede ergeben (z. B. aufgrund der tageszeitabhängigen Nachfrage).

Ein konkretes Unterscheidungsmerkmal zwischen 1-Schicht- und 2-Schichtensystem kann bereits jetzt abgeleitet werden, die Standzeit am betrieblichen Abstellplatz. Im vorangegangenen Kapitel, bei der Betrachtung des Systems von Taxistandplätzen als „Netzwerk von Warteschlangen“, wurde der Zustand „Abstellplatz“ in Bezug auf den Taxibetrieb als „Außenwelt“ bezeichnet. Dieser wird von den Taxis modellhaft angenommen, sobald es nicht in Betrieb ist. Sobald die nächste Taxischicht beginnt wird der Zustand „Abstellplatz“ wieder verlassen. Beim 1-Schichtsystem ist das Taxi im Mittel ungefähr 12 Stunden in Betrieb. Die zweite Tageshälfte (entweder tagsüber oder nachts) steht das Fahrzeug großteils am genannten Abstellplatz. Dieser Zeitraum kann bei der Verwendung eines Elektroautos zum Laden der Fahrzeugbatterie genutzt werden. Eine kostenintensivere Schnellladung scheint während dieser Dauer nicht zwingend nötig zu sein. Genaueres wird jedoch die anschließende Simulation zeigen. Im 2-Schichten-System hingegen wird das Taxi abwechselnd von zumindest zwei TaxilenkerInnen annähernd „rund um die Uhr“ betrieben. Einerseits kommt es dadurch zu einer deutlichen Steigerung der Fahrleistung sowie Abnutzung des Fahrzeuges und andererseits sinkt die Möglichkeit von längeren, durchgängigen Ladezeiten entsprechend. Damit werden auch Schnellladungen zwangsläufig relevanter.

Zum besseren Verständnis sind in Abbildung 4-6 die Wochenprofile der gleichzeitig am Vermittlungssystem angemeldeten Funktaxis nochmals explizit für Maximum, Median und Minimum<sup>81</sup> dargestellt. Wie sich zeigt, sind in den späten Nachtstunden/frühen Morgenstunden deutlich weniger Taxifahrzeuge am Vermittlungssystem angemeldet. Ein wesentlicher Grund dafür ist die geringere Nachfrage zu dieser Uhrzeit [44]. Für

---

<sup>80</sup> Naturgemäß bilden sich im Realbetrieb ebenfalls Mischformen, die sowohl Tages- als auch Nachtschichtcharakter aufweisen.

<sup>81</sup> In Bezug auf die Flächen.

Montag zeigt sich z. B. eine durchschnittliche Differenz von Tagestiefst- zu Tageshöchstwert von in etwa 68 %. Dieser Übergang erfolgt jedoch nicht sprunghaft. Es ergibt sich eine natürliche Streuung. Da es im Allgemeinen keinen externen Trigger (z. B. behördliche Vorschrift) bezüglich der Wahl von Beginn und Ende der Betriebszeiten gibt (abgesehen von einer Höchstarbeitszeit), erfolgt diese individuell für jeden/jede TaxiunternehmerIn bzw. -lenkerIn. Daraus resultieren die kontinuierlichen Übergänge am Morgen und am Abend. Die Anzahl der sich gleichzeitig in Betrieb befindenden Taxis schwankt jedoch nicht nur im Tagesverlauf. Der Wochentag selbst spielt dabei eine bedeutende Rolle. Verglichen mit den Werktagen (Mo - Sa)<sup>82</sup> sind an Sonn- und Feiertagen in Summe wesentlich weniger Taxis zeitgleich unterwegs. Im Mittel ergibt sich eine Reduktion von etwa 24 %.

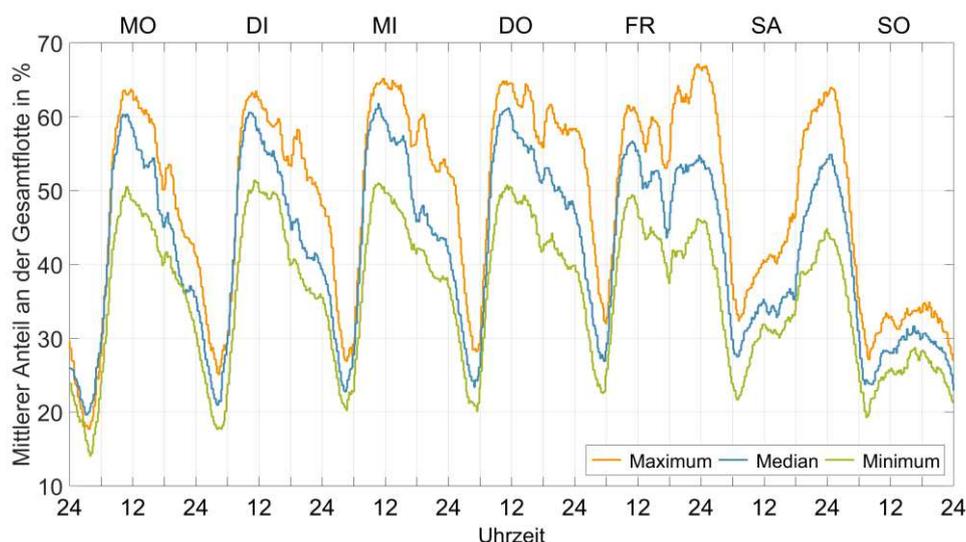


Abbildung 4-6: Wochenverläufe der gleichzeitig angemeldeten Funktaxis (gesamte Flotte des Jahres 2011)

Wie bereits erläutert (vergleiche Kapitel 3 „Mobilitätsdatengrundlage“), können die tatsächlichen Verteilungen von Start und Ende der Betriebszeiten weder aus den vorhandenen GPS-basierte Fahrzeugdaten noch aus den kumulierten Flottendaten extrahiert werden. Die GPS-basierten Fahrzeugdaten geben zwar den Start- und Endzeitpunkt jeder beinhalteten Taxifahrt an, sie besitzen allerdings keine Information

<sup>82</sup> Welche Tage als Werktage gelten, ist in der österreichischen Rechtsordnung nicht einheitlich geregelt. Im Rahmen des Zustell- und Patentgesetzes umfasst der Werktagsbegriff grundsätzlich Samstage. Im Arbeitslosenversicherungs-, Pensions- oder Aktiengesetz wird hingegen der Samstag nicht zu den Werktagen gezählt (siehe [122]: [www.help.gv.at](http://www.help.gv.at))

drüber, wann tatsächlich eine Taxischicht beginnt oder endet. Jedoch stellen im Gegensatz dazu die kumulierten Flottendaten die Ganglinie der gleichzeitig am Vermittlungssystem angemeldeten Funktaxis dar (siehe Abbildung 4-6). Unter der vereinfachten Annahme<sup>83</sup>, dass eine Taxischicht mit der Anmeldung am Vermittlungssystem beginnt und mit der Abmeldung endet, kann der Verlauf der „angemeldeten“ Funktaxis ebenfalls als Verlauf der „in Betrieb befindenden“ Funktaxis interpretiert werden.

Ziel ist es daher einen „Bottom-Up“-Vorgang zu entwickeln, der den Beginn und das Ende der drei Betriebsarten derart festlegt, dass sich in Summe daraus annähernd – aber in hinreichender Qualität – das mittlere Anmeldeprofil aus Abbildung 4-6 ergibt und somit die beschriebene Informationslücke geschlossen werden kann. Folgend sind die gewählte Methodik sowie die erzielten Ergebnisse detailliert beschrieben.

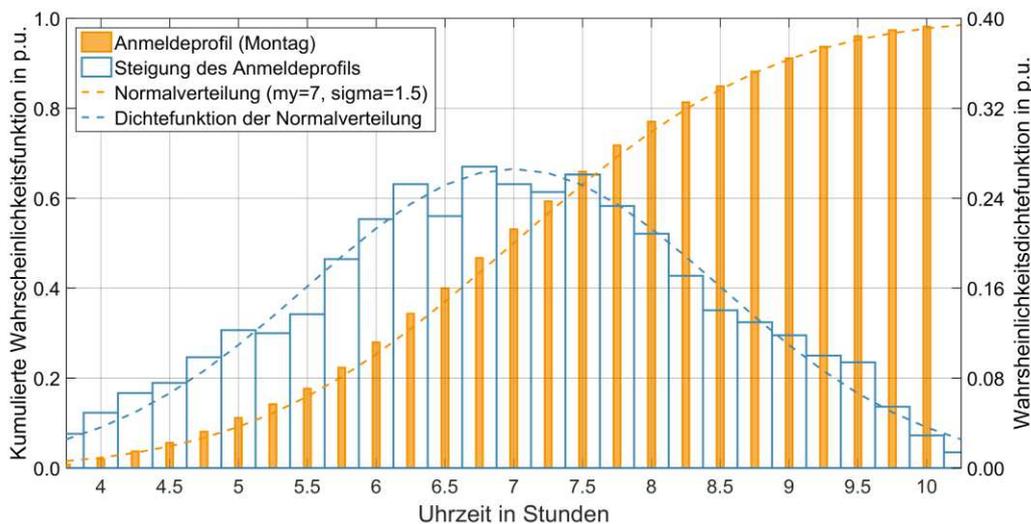


Abbildung 4-7: Vergleich der Verläufe von Anmeldeprofil und Normalverteilung

Wird zur Erläuterung des Sachverhalts der Wochentag „Montag“ in Abbildung 4-7 betrachtet, lässt sich eine kontinuierliche Steigerung der Anzahl an angemeldeten Funktaxis zwischen etwa 3:45 Uhr (Tagesminimum) und ca. 10:30 Uhr (Tagesmaximum) erkennen. Der sich zeigende, annähernd symmetrische „s“-förmige Verlauf lässt näherungsweise auf eine Normalverteilung für die Startzeitpunkte der einzelnen Schichten schließen. Zur besseren Sichtbarkeit ist in Abbildung 4-7 einerseits die steigende Flanke für Montag früh nochmals skaliert und vergrößert dargestellt sowie andererseits die

<sup>83</sup> Dadurch werden z. B. Pausen außer Acht gelassen.

kumulierte Verteilungsfunktion einer angepassten Normalverteilung eingezeichnet. Darüber hinaus zeigt Abbildung 4-7 die Dichtefunktion der Normalverteilung und die diskrete Steigungsfunktion des Anmeldeprofils. Ein „gute Anpassung“ an die Gauß-Verteilung ist ebenfalls bei den fallenden Flanken in den Nachstunden (Richtung Minimum) zu beobachten.

Ganz allgemein ist die Normal- oder Gauß-Verteilung für eine stetige Zufallsvariable  $X$  mit der Wahrscheinlichkeitsdichte (engl. probability density function, pdf)  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  durch folgende Formel gegeben [69]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4.2)$$

Für die Parameter der Normalverteilung gilt:  $\mu \in \mathbb{R}$  ist der Erwartungswert und  $\sigma$  die Standardabweichung (mit  $\sigma^2 > 0$ ).

Der Erwartungswert  $E(X)$  einer Zufallsvariable  $X$  beschreibt die Zahl, die die Zufallsvariable  $X$  im Mittel annimmt. Wird zum Beispiel das zugrundeliegende Experiment unbegrenzt wiederholt, so ergibt sich der Erwartungswert als Durchschnitt der Ergebnisse. Der zweite Parameter, also die Standardabweichung, ist als Quadratwurzel der Varianz  $\sigma^2$  definiert und stellt ein Maß für die Streuung dar. Wobei die Varianz die mittlere quadratische Abweichung der Zufallsvariable von ihrem Erwartungswert charakterisiert und als gebräuchlichstes Streuungsmaß gilt [70].

Durch das Integral über die Dichtefunktion lässt sich die kumulierte Verteilungsfunktion (engl. cumulative distribution function, cdf) darstellen [69]. Sie gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Zufallsvariable einen Wert kleiner oder gleich  $x$  annimmt. Die Verteilungsfunktion der Normalverteilung ist durch

$$F(x) = P(X \leq x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \quad (4.3)$$

gegeben. Dabei gilt für die Verteilungsfunktion  $F(x)$  stets  $F(-\infty) = 0$  und  $F(\infty) = 1$ .

Ist von einer Zufallsvariable  $X$  die Verteilungsfunktion bekannt, so kann man die Wahrscheinlichkeit berechnen, mit der die Zufallsvariable Werte zwischen zwei reellen Zahlen annimmt:

$$P(a < X \leq b) = P(X \leq b) - P(X \leq a) = F(b) - F(a) \quad (4.4)$$

Ist die Zufallsvariablen  $X$  – wie in diesem Fall – normalverteilt, dann sind im Abweichungsintervall  $\pm \sigma$  vom Erwartungswert näherungsweise 68,3 % aller Ergebniswerte zu finden. Für  $\pm 2 \sigma$  Abweichung sind es bereits 95,4 %.

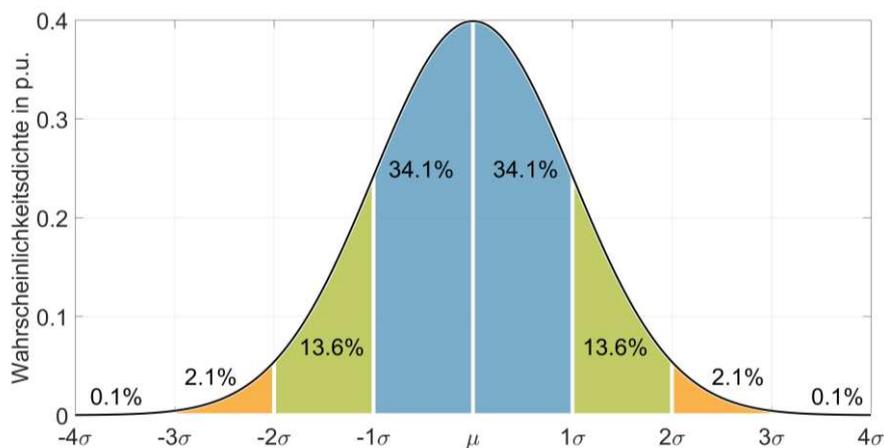


Abbildung 4-8: Dichtefunktion der Normalverteilung Intervalle um  $\mu$

Wie zuvor erläutert, werden Beginn und Ende der Betriebszeiten von Taxis vereinfacht als normalverteilt über  $t$  angenommen und stellen damit zeitliche Zufallsvariablen dar. Die kumulierte Verteilungsfunktion kann somit ebenfalls als Ganglinie des Anmelde- bzw. Abmeldeprozesses angesehen werden und der Funktionswert  $F(t)$  repräsentiert den Anteil der angemeldeten Funktaxis in per unit. Für  $F(t) = 1$  sind alle Taxis, die an diesem Tag in Betrieb sind, am Vermittlungssystem angemeldet. Die Normalverteilung aus Abbildung 4-7 besitzt beispielsweise einen Erwartungswert von  $\mu = 7$  (bzw. 7:00 Uhr bei Darstellung als Uhrzeit) und eine Standardabweichung von  $\sigma = 1,5$  (entspricht 1,5 Stunden). In anderen Worten ausgedrückt: Würde das Anmeldeverhalten der Funktaxis genau dieser Verteilungsfunktion folgen, dann melden sich im Mittel über zwei Drittel der Funktaxis in einem Zeitraum zwischen 5:30 Uhr und 8:30 Uhr am Vermittlungssystem an ( $P(5,5 < X \leq 8,5) = F(8,5) - F(5,5) \approx 68,3 \%$ ). Das restliche Drittel startet entsprechend früher bzw. später. Diese Werte dienen jedoch lediglich der Veranschaulichung und sind somit nicht repräsentativ, da noch keine Überlagerungseffekte an den Schichtgrenzen berücksichtigt werden. Dies erfolgt im nächsten Schritt.

Zur Modellierung der drei verschieden definierten „Betriebsarten“ werden – aufgrund der vorhandenen Abhängigkeiten bzw. Überlagerungen der Schichten – die einzelnen Erwartungswerte und Standardabweichungen für jeden Wochentag separat parametrisiert.

Darüber hinaus müssen zusätzlich die prozentualen Anteile der drei „Betriebsarten“ – bezogen auf die Gesamtflotte<sup>84</sup> – festgesetzt werden. Die kumulierten Flottendaten zeigen nämlich, dass an keinem Zeitpunkt im Jahr alle Taxifahrzeuge gleichzeitig in Betrieb sind. Im Betrachtungszeitraum (Kalenderjahr 2011) waren maximal 66,3 % der Gesamtflotte zeitgleich am Vermittlungssystem angemeldet. Dieser Sachverhalt lässt sich großteils durch die zeitliche Trennung der zwei unterschiedlichen Betriebsarten im 1-Schichtsystem begründen. Fahrzeuge im reinen „Tagesbetrieb“ sind deshalb selten zeitgleich mit Fahrzeugen im reinen „Nachtbetrieb“ unterwegs (bis auf die Übergangszeiten). Darüber hinaus haben u. a. auch arbeitsfreie Tage (wie z. B. Urlaub) oder Krankenstände einen direkten Einfluss auf die Anzahl der angemeldeten Funktaxis. Die Anteile der drei „Betriebsarten“ werden hierbei mittels Gewichtungsfaktoren je Kalendertag eingestellt und bestimmen einerseits, wie viele Taxis einer „Betriebsart“ angehören und andererseits wie viele Fahrzeuge je Kalendertag auch wirklich in Betrieb sind.

Aus den genannten Gründen wird die Summe der Anteile der drei „Betriebsarten“ stets kleiner als eins gewählt. Der übrige Anteil, also der Rest auf eins, umfasst dabei die abgemeldeten Fahrzeuge<sup>85</sup>. Die geringste Anzahl an angemeldeten Funktaxis zeigt sich an Sonn- und Feiertagen. An diesen Wochentagen sind folglich – absolut und relativ – die wenigsten Fahrzeuge in Betrieb (siehe erneut Abbildung 4-7).

Analog zur beschriebenen Herangehensweise (Normalverteilung plus Gewichtung) ergibt sich für den mittleren, zeitlichen Verlauf des „Anmeldeprofils“<sup>86</sup> je „Betriebsart“ (BA) und je „Wochentag“ (WT) eine entsprechende Glockenkurve mit Plateaus. Abbildung 4-9 (oben) zeigt für den Wochentag „Freitag“ einerseits die gewichteten, normalverteilten Dichtefunktionen von Beginn  $f_{\text{Beginn}}(t)$  und Ende  $f_{\text{Ende}}(t)$  der Betriebszeiten sowie andererseits die resultierenden Verläufe der stochastischen Anmeldeprofile.

---

<sup>84</sup> Dabei stellt die Gesamtflotte die Anzahl aller am Vermittlungssystem registrierten Taxis dar und entspricht somit der Summe aus an- und abgemeldeten Funktaxis. Jedes Fahrzeug der Gesamtflotte wird in der vorliegenden Arbeit genau einer der drei definierten „Betriebsarten“ zugeordnet.

<sup>85</sup> Die abgemeldeten Taxifahrzeuge befinden sich entweder in Pause (während der Taxischicht) oder sind außer Betrieb (nach Schichtende).

<sup>86</sup> Das Anmeldeprofil stellt die Ganglinie der zeitgleich am Vermittlungssystem angemeldeten Taxifahrzeuge dar.

Die dargestellten Anmeldeprofile  $Taxis_{angemeldet}(t)$  der drei Betriebsarten ergeben sich dabei aus den kumulierten Verteilungsfunktionen ( $F_{beginn}(t)$  und  $F_{ende}(t)$ ) sowie der jeweiligen Gewichtung  $Anteil_{ij} \in [0,1]$  und können formal wie folgt beschrieben werden:

$$Taxis_{angemeldet,ij}(t) = \{F_{Beginn,ij}(t) - F_{Ende,ij}(t)\} \cdot Anteil_{ij} \quad (4.5)$$

Sobald die Verteilungsfunktion  $F_{Ende,ij}(t)$  einen Funktionswert von eins erreicht hat, wird  $Taxis_{angemeldet,ij}(t) = 0$ . Ab diesem Zeitpunkt sind alle zugrundeliegenden Taxis wieder außer Betrieb und somit vom Vermittlungssystem abgemeldet. Aus Kausalitätsgründen muss gewährleistet werden, dass  $F_{Ende,ij}(t)$  stets  $F_{Beginn,ij}(t)$  nachfolgt. Ein und dasselbe Taxi kann nicht außer Betrieb genommen werden, bevor es überhaupt in Betrieb ist. Für unterschiedliche Taxis gilt dies natürlich nicht.

Zur Ermittlung des zeitlichen Anmeldeprofils einer gesamten Kalenderwoche ( $W$ ) müssen die Teilverläufe aller drei „Betriebsarten“ ( $BA$ ) und sieben Wochentage ( $WT$ ) summiert werden:

$$Taxis_{angemeldet,W}(t) = \sum_{i=1}^{7 WT} \sum_{j=1}^{3 BA} Taxis_{angemeldet,ij}(t) \quad (4.6)$$

Abbildung 4-9 zeigt einzelne Schritte aus der beschriebenen Iteration. Dabei wird die formgebende Eigenschaft des Überlagerungsprozesses erkennbar. Es bilden sich entsprechend Wendepunkte bzw. Extremstellen im Bereich der Schnittflächen aus. Diese resultieren u. a. in den täglichen Maxima und Minima der Anzahl an angemeldeten Taxis. Je nachdem, wie die einzelnen Parameter „Erwartungswert“, „Standardabweichung“ und „Gewichtung“ gewählt werden, ergeben sich in Bezug auf Stelle und Größe andere Extremwerte.

Wie bereits angemerkt, besteht das Ziel der „Betriebszeiten“-Modellierung darin, die relevanten Parameterwerte derart festzulegen, dass sich das hieraus generierte Anmeldeprofil bestmöglich an jenes aus Abbildung 4-6 annähert.

Zur Lösung dieses komplexen Optimierungsproblems wird das metaheuristische<sup>87</sup> Suchverfahren „lokale Suche“ verwendet und mit Hilfe der Software MATLAB<sup>®</sup> umgesetzt. Das simple Grundprinzip der „lokalen Suche“ besteht darin, zuerst mittels beliebiger

---

<sup>87</sup> Im Gegensatz zu problemspezifischen Heuristiken können Metaheuristiken, als eine abstrakte Folge von Schritten, (theoretisch) auf beliebige Problemstellungen angewandt werden.

Heuristik eine Startlösung zu gewinnen und dann diese mit gezielten "lokalen" Änderungen schrittweise zu verbessern.

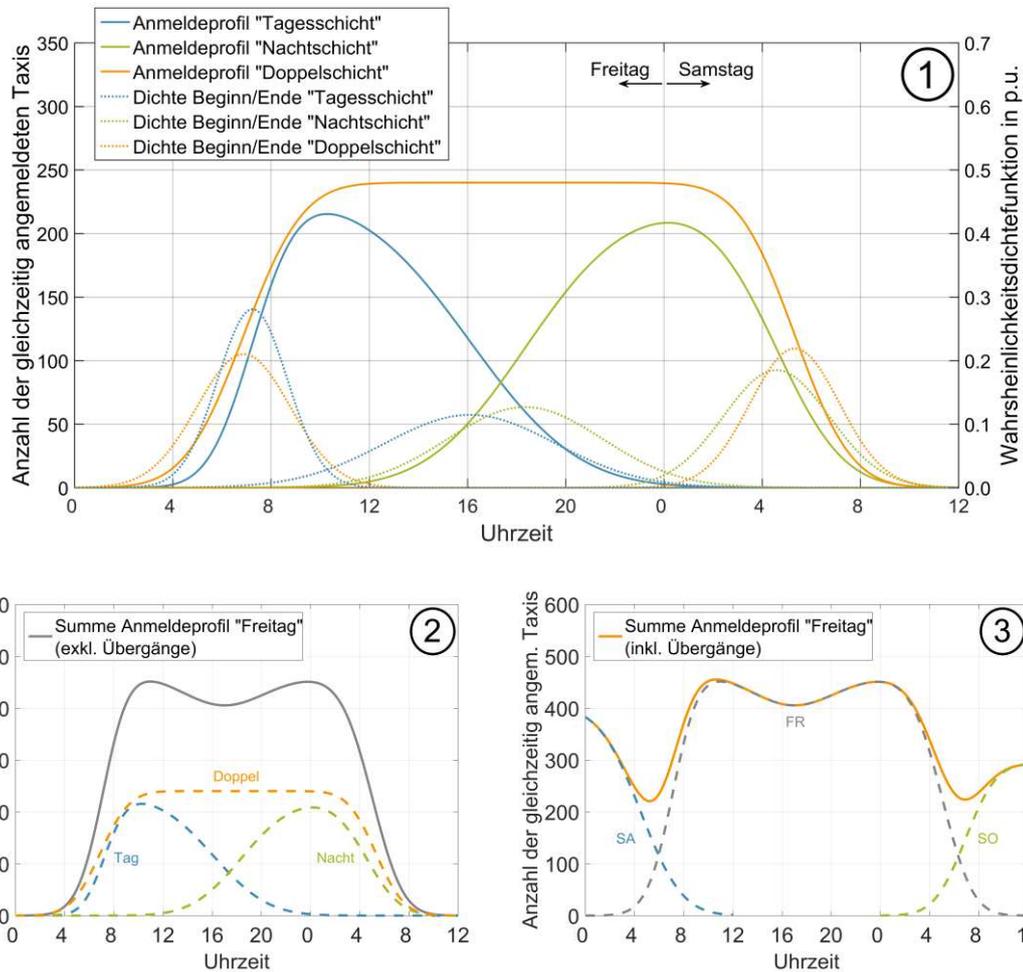


Abbildung 4-9: Schrittweise Generierung der Betriebszeiten und resultierenden Anmeldeprofile für den beispielhaften Wochentag „Freitag“

Zur Gewinnung eines passablen Startsets werden die einzelnen Verteilungsparameter und Gewichtungsfaktoren in einem ersten Schritt manuell mittels grafischer Beurteilung (Original vs. Modell) eingestellt.

Ausgehend von den ermittelten Startwerten beginnt darauffolgend die eigentliche Optimierung. Dabei werden individuelle Parameter zyklisch und per Zufall ausgewählt und geringfügig variiert ( $\pm 10\%$  gleichverteilt). Somit kann jeweils eine gewisse Umgebung der aktuellen Lösung durchsucht und die resultierende Änderung bewertet werden. Wird eine Verbesserung erzielt, so wird die aufgefundene Lösung als neuer Ausgangspunkt

festgelegt und die „lokale Suche“ von dort aus wieder begonnen. Das Suchverfahren wird nach Unterschreiten eines vorgegebenen Schwellwertes (erfolgreich) bzw. Überschreiten einer max. Anzahl an Iterationsschritten (erfolglos) abgebrochen.

Zur Beurteilung der „Anpassungsgüte“ zwischen Original und Modell wird in diesem Fall der mittlere quadratische Fehler (kurz MSE, engl. mean squared error) gebildet. Der MSE kann allgemein wie folgt berechnet werden:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \quad (4.7)$$

$x_i$  ... gemessener Wert (Original)

$y_i$  ... geschätzter Wert (Modell)<sup>88</sup>

$x_i - y_i$  ... Residuum der i-ten Variable

Wie der Name schon sagt, gibt der MSE an, um wie viel das Modell (also das stochastisch, generierte Anmeldeprofil) vom Original (das kumulierte Anmeldeprofil der Flottendaten) durchschnittlich abweicht, wobei  $x_i - y_i$  dem Residuum der i-ten Variable entspricht und somit den Schätzfehler kennzeichnet. Je kleiner der mittlere quadratische Fehler, desto besser ist die Anpassung.

Der MSE kann somit als Zielfunktion der Optimierung angesehen werden, wobei es gilt, diesen mit Hilfe der „lokalen Suche“ zu minimieren. Als Nebenbedingungen ergeben sich dabei Beschränkungen bezüglich der Summe aller Gewichtungsfaktoren je Wochentag (stets kleiner eins) und der Normalverteilungen für Beginn und Ende der Betriebszeiten (Kausalitätsbedingung).

Zum Erreichen des „besten“ Ergebnisses werden kontinuierlich Durchläufe (> 100.000) mit sukzessive strengeren Abbruchkriterien gestartet, bis ein erfolgreicher Abbruch der „lokalen Suche“ nicht mehr möglich ist. Die dadurch erzielte „beste“ Lösung besitzt einen MSE-Wert von 29,85. Daraus ergibt sich eine mittlere absolute Abweichung zwischen Original und Modell von 4,23 Taxis (1,27 %) und eine maximale absolute Abweichung von 17 Fahrzeugen.

In Abbildung 4-10 ist das Gesamtergebnis für die stochastisch generierte Ganglinie des Anmeldeprofils inkl. der Einzelprofile für Tages-, Nacht- und Doppelschicht ersichtlich.

---

<sup>88</sup> Zur Kennzeichnung des Schätzwertes wird meist ein Dach darüber gesetzt (z. B.  $\hat{y}_i$ ).

In Tabelle 4-2 sind ferner die endgültig festgelegten Parameterwerte (Erwartungswert  $\mu$  und Standardabweichung  $\sigma$ ) sowie Gewichtungsfaktoren für alle Wochentage und Betriebsarten aufgelistet. Damit die Kausalitätsbedingung erfüllt ist und Erwartungswerte eindeutig identifizierbar sind, werden Zeitpunkte nach Mitternacht mit einem entsprechenden Betrag über 24 festgelegt. Ergibt sich für das Betriebsende ein Erwartungswert  $\mu$  von 28,5 (z. B. bei der Nachtschicht), dann entspricht dieser Wert einer Uhrzeit von 04:30 Uhr am Folgetag. Allgemein zeigt sich, dass die Erwartungswerte für das Ende der Nachtschicht (auch im Rahmen der Doppelschicht) auf Zeitpunkte deutlich vor 06:00 Uhr fallen. Grund dafür ist die Abnahme der Nachfrage auf KundInnen-Seite und der damit verbundene Rückgang der angemeldeten Taxis in den frühen Morgenstunden.

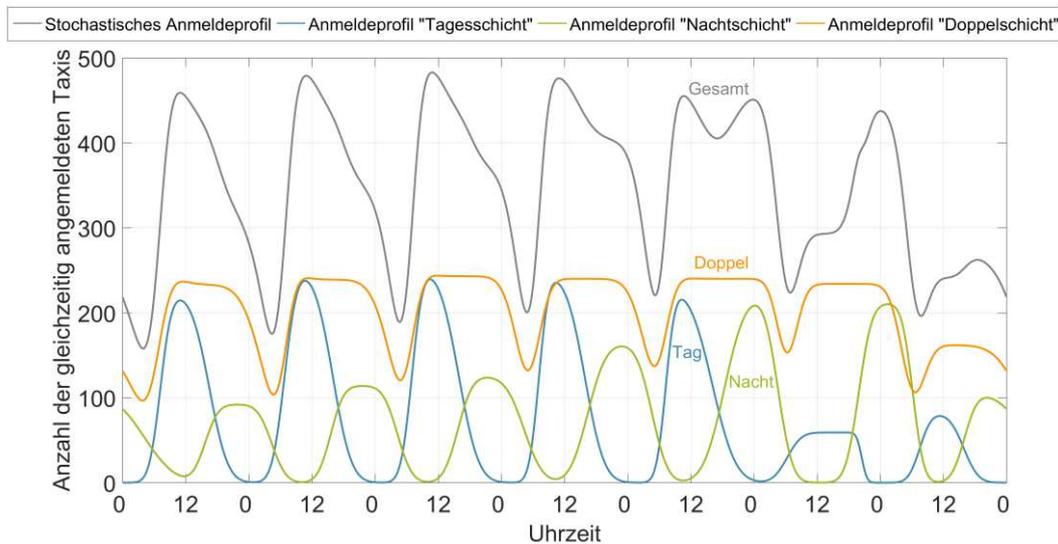


Abbildung 4-10: Stochastisch generierte Ganglinie des Anmeldeprofils (inkl. der Einzelprofile für Tages-, Nacht- und Doppelschicht)

Zusätzliche Ergebnisse und Schlussfolgerungen, die sich durch die ermittelten Parameterwerte und Gewichtungsfunktionen ergeben, werden in Kapitel 5 „Generierung einer gesamten E-Taxiflotte“ angeführt. Dort wird die konkrete, stochastische Generierung einer gesamten E-Taxiflotte durchgeführt und die resultierenden Merkmale (wie Standort und Fahrtdauer) visualisiert und validiert. Für die Modellierung werden auf Basis der ermittelten Verteilungen der Betriebsarten jene Zeitpunkte per Zufallszahlengenerator erzeugt, zu denen die einzelnen Taxis ihren Betrieb beginnen bzw. beenden. Sinnbildlich gesprochen verlassen die Taxis zu diesen Zeitpunkten den Zustand „Abstellplatz“ und treten in das „Netzwerk von Warteschlangen“ ein bzw. kehren am Ende ihrer Betriebszeit zum „Abstellplatz“ zurück (vergleiche vorangegangenes Kapitel 4.1).

Tabelle 4-2: Endgültige Parameterwerte der Normalverteilungen für alle Wochentage und Betriebsarten

Tagesschicht							
	MO	DI	MI	DO	FR	SA	SO
$\mu_{\text{Beginn}}$	7,1	6,8	6,9	7,0	7,1	6,2	7,6
$\sigma_{\text{Beginn}}$	1,7	1,9	1,7	1,6	1,6	2,1	1,8
$\mu_{\text{Ende}}$	16,5	16,0	15,9	15,9	16,1	20,5	15,9
$\sigma_{\text{Ende}}$	2,7	2,7	2,9	2,7	3,4	0,8	2,2
<b>Anteil</b>	27,2%	30,0%	30,4%	29,6%	27,9%	7,2%	10,0%

Nachtschicht							
	MO	DI	MI	DO	FR	SA	SO
$\mu_{\text{Beginn}}$	15,8	15,6	15,7	16,4	18,3	19,9	16,0
$\sigma_{\text{Beginn}}$	2,0	1,9	2,1	2,5	3,0	2,0	1,9
$\mu_{\text{Ende}}$	28,3	28,1	28,3	28,5	28,6	30,2	28,1
$\sigma_{\text{Ende}}$	2,0	2,0	2,7	2,2	2,1	1,7	4,2
<b>Anteil</b>	11,1%	13,9%	15,0%	19,6%	26,4%	25,5%	12,5%

Doppelschicht							
	MO	DI	MI	DO	FR	SA	SO
$\mu_{\text{Beginn}}$	6,8	6,9	6,8	6,7	6,9	7,0	7,5
$\sigma_{\text{Beginn}}$	2,0	1,7	1,8	1,9	1,8	1,9	2,0
$\mu_{\text{Ende}}$	27,3	27,7	28,0	28,3	29,3	28,9	27,8
$\sigma_{\text{Ende}}$	3,5	3,3	2,6	2,9	1,8	2,3	4,2
<b>Anteil</b>	28,1%	28,9%	29,3%	29,1%	29,1%	28,4%	19,6%

$\mu$  ... Erwartungswert

$\sigma$  ... Standardabweichung

Bei der konkreten Generierung der E-Taxiflotte werden ebenfalls die individuellen Taxifahrten und Wartezeiten an den Taxistandplätzen sowie überlagerte saisonale Schwankungen implementiert und erst im Anschluss die daraus resultierenden Unterschiede zwischen den einzelnen Betriebsarten betrachtet.

Die nachfolgenden Kapitel beschäftigen sich nun mit der Methode zur Identifikation und Approximation der Verteilungsfunktionen für Standdauer, Fahrdauer, Distanz und Energiebedarf, welche die Basis der stochastischen Modellierung vervollständigen.

### 4.3 Approximation der Verteilungen – Angewandte Methodik

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die stochastische Modellierung von Beginn und Ende der einzelnen Taxischichten basierend auf den „kumulierten Flottendaten“ dargestellt. Bezogen auf das Modell des Netzwerks von Warteschlangen repräsentieren diese die Übergänge zu den betrieblichen Abstellplätzen (hin und retour). In diesem Kapitel wird nun das Fahr- und Standverhalten während der Betriebszeiten betrachtet. Innerhalb jeder Taxischicht reihen sich Wartezeiten am Taxistandplatz und Taxifahrten abwechselnd aneinander. Diese Ereignisse können durch die Parameter „Fahrdauer“, „Distanz“ und „Energiebedarf“ sowie „Standdauer“ charakterisiert werden und bilden somit zusammen das Gerüst für das Gedankenmodell „Netzwerk von Warteschlangen“.

Im Gegensatz zur Modellierung von Beginn und Ende der Taxischichten werden in diesem Fall die benötigten Parameterwerte aus den empirisch erhobenen „GPS-basierten Fahrzeugdaten“ entnommen. Eine detaillierte Beschreibung dieses Datensätze wurde bereits im Kapitel 3.1 „GPS-basierte Fahrzeugdaten“ durchgeführt. In den nachfolgenden Ausführungen wird nun erläutert, welche Methoden zur Identifikation der Verteilungen und zur Schätzung der zugehörigen Parameter Anwendung finden.

#### 4.3.1 Statistische Schätzverfahren – Ein Überblick

Merkmale wie u. a. die Standdauer oder die zurückgelegte Distanz beschreiben gemeinsam die Mobilitätseigenschaften des betrachteten Taxiverkehrs. Sie werden jedenfalls von zufälligen Schwankungen beeinflusst, da nicht eindeutig vorherzusehen ist, wann die nächste Taxifahrt durchgeführt wird, wohin diese führt und welche Wartezeiten sich daraus ergeben. In anderen Worten, die individuellen Merkmale können als Zufallsgrößen angesehen werden.

Darüber hinaus wird eine Menge von  $n$  Realisierungen  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  einer Zufallsgröße  $X$  als konkrete empirische Stichprobe vom Umfang  $n$  bezeichnet. Die Realisierungen

sind Beobachtungs- bzw. Messwerte an einem realen Sachverhalt und werden als Daten bezeichnet. [70]

Im vorliegenden Fall sind dies die empirischen „GPS-basierten Fahrzeugdaten“ (vergleiche Kapitel 3 „Mobilitätsdatengrundlage“). Da die vorhandene Stichprobe jedoch nur eine Teilmenge der Grundgesamtheit (Zufallsgröße) charakterisiert, stellt sich nun die Frage, wie von der empirischen Verteilung der Stichprobe (u. a. als relative Häufigkeit dargestellt) auf die theoretische Verteilung der Grundgesamtheit (z. B. Normalverteilung) geschlossen werden kann. Dabei helfen statistische Schätzverfahren.

Dies sind Methoden, die zur Ermittlung von Parametern einer theoretischen Verteilungsfunktion, also der Verteilung der Grundgesamtheit, anhand von Stichproben dienen. Solche zu schätzenden Parameter sind beispielsweise der Erwartungswert und die Varianz (Quadratwurzel der Standardabweichung).

Generell unterscheidet man zwei Arten von Schätzverfahren die sich in Ihrem Aussagegehalt voneinander abheben:

- Punktschätzungen
- Bereichsschätzungen (Intervallschätzungen)

Punktschätzungen geben für einen Parameter genau den Wert an, der aufgrund der Stichprobe statistisch am wahrscheinlichsten erscheint. Bereichsschätzungen hingegen geben einen Wertebereich an, in dem sich der Parameter nach vorzugebenden Wahrscheinlichkeiten am ehesten befindet. [70]

Im ersten Fall geht es also um die Ermittlung eines Modellparameters auf der Grundlage beobachteter Daten, im zweiten Fall um eine Aussage über die Genauigkeit/Güte dieser Schätzung [71].

Ist es aufgrund der Aufgabenstellung erforderlich bzw. sinnvoller einen gewissen Bereich einzugrenzen, der mit einer möglichst hohen Wahrscheinlichkeit den wahren Wert enthält, dann ist eine Bereichsschätzung bevorzugt heranzuziehen. Der ermittelte Bereich wird dann als Konfidenzintervall bezeichnet. Dabei gilt allgemein, je größer der gewählte Wahrscheinlichkeitswert, desto breiter das resultierende Intervall.

Für die Umsetzung des stochastischen Taxi-Mobilitätsmodells und somit zur Generierung konkreter Zahlenwerte für die „Standdauer am TSP“ oder der „Distanz einer Taxifahrt“ ist es hingegen von Nöten, für jede Verteilung eindeutige, quantitativ festgelegte Parameterwerte anstatt qualitative Bereiche zu erhalten. Punktschätzer werden insbesondere für die Schätzung von Kenngrößen wie Mittelwerten, Varianzen und Standardabweichungen verwendet [70]. Es werden aber auch Parameter von Verteilungen geschätzt. Oft stimmen sogar die Kenngrößen mit den Verteilungsparametern überein

wie beispielsweise Erwartungswert und Varianz bei der Normalverteilung [71]. Da dies genau dem hier erforderlichen Einsatzgebiet entspricht, wird in der vorliegenden Arbeit ein Punktschätzverfahren herangezogen.

Drei der klassischen Methoden zur Punktschätzung sind [70]:

- Momentenmethode
- Kleinste-Quadrate-Methode
- Maximum-Likelihood-Methode

Bei der Momentenmethode – als älteste Schätztechnik – werden die gesuchten Parameter in Abhängigkeit der Momente der Verteilung angeschrieben. Zum Beispiel werden das arithmetische Mittel der Stichprobe und die empirische Varianz gleich dem theoretischen Erwartungswert bzw. der theoretischen Varianz gesetzt. Da diese von unbekanntem Parametern abhängen, können die Schätzwerte durch Auflösen nach den unbekanntem Parametern ermittelt werden. Ein Nachteil der Momentenmethode besteht jedoch darin, dass ihre Schätzfunktionen oft nicht effizient<sup>89</sup> sind, d.h. für große Stichprobenumfänge gibt es bessere Schätzfunktionen (u. a. die Maximum-Likelihood-Methode). [72]

Ein weiteres einfaches Prinzip der Parameterschätzung stellt die Kleinste-Quadrate-Methode dar und besteht darin, die aufsummierten quadratischen Abweichungen zwischen Beobachtungswert und geschätztem Wert zu minimieren [73]. Da hier jedoch nur Informationen über den Erwartungswert einfließen, kann die Verwendung von Schätzfunktionen der Kleinste-Quadrate-Methode zu schlechteren Resultaten als z. B. bei der Maximum-Likelihood-Methode führen.

Im vorliegenden Anwendungsfall weist die Maximum-Likelihood-Methode also gegenüber den beiden anderen Methoden entsprechende Vorteile auf und lässt sich darüber hinaus auf einfachem Wege in der Software MATLAB<sup>®</sup> zur Schätzung von konkreten Parameterwerten einsetzen. Diesbezüglich steht in MATLAB<sup>®</sup> z. B. die implementierte Funktion „fitdist“ (fit probability distribution object to data) zur Verfügung.

Die zugrundeliegenden Prinzipien der Maximum-Likelihood-Methode werden nachfolgend beschrieben. Für nähere Informationen zu den beiden anderen Punktschätzverfahren wie auch den Bereichsschätzungen wird an dieser Stelle u. a. auf [70] verwiesen.

---

<sup>89</sup> Eine "gute Schätzung" soll möglichst erwartungstreu, konsistent und effizient sein. [70]

### 4.3.2 Die Maximum-Likelihood-Methode

Sie wurde von R.A. Fisher entwickelt und zuvor in Spezialfällen von C.F. Gauß angewandt [70]. Dabei liegt der Maximum-Likelihood-Methode (MLM) zur Schätzung eines unbekannt Parameters  $\theta$  (z. B. der Standardabweichung  $\sigma$  der Normalverteilung) eine ganz einfache Idee zugrunde: Es wird unter den möglichen Schätzwerten für  $\theta$  jener gewählt, der am plausibelsten erscheint – anders ausgedrückt, am wahrscheinlichsten ist [71].

Ausgangspunkt ist eine konkrete Stichprobe  $x_1, x_2, \dots, x_n$  vom Umfang  $n$  einer Grundgesamtheit  $X$  (z. B. alle Distanzen der Taxifahrten, die zu einer gewissen Tageszeit an einem festgelegten Wochentag durchgeführt wurden). Unter Verwendung der in der Stichprobe über die Grundgesamtheit enthaltenen Informationen wird dann der unbekannte Parameter  $\theta$  der theoretischen Verteilungsfunktion von  $X$  geschätzt.

Um den unbekannt Parameter  $\theta$  rechnerisch zu ermitteln, wird die sog. Likelihood-Funktion benötigt [70]:

$$L(x_1, x_2, \dots, x_n; \theta) = \prod_{i=1}^n f_x(x_i; \theta) \quad (4.8)$$

$f_x(x_i; \theta)$  stellt dabei die Dichte der Zufallsgröße  $X$  dar. Ein Schätzwert<sup>90</sup>  $\hat{\theta}$  des Parameters  $\theta$ , für den die Likelihood-Funktion an der Stelle  $\theta = \hat{\theta}$  ein eindeutig bestimmtes Maximum besitzt, wird Maximum-Likelihood-Schätzung für  $\theta$  genannt.

Im Prinzip wird unter allen möglichen Punktschätzwerten für  $\theta$  jener ausgewählt, für den das Ereignis  $\{X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n, \}$  die größte Wahrscheinlichkeit besitzt.

Unter der Voraussetzung der Differenzierbarkeit der Likelihood-Funktion kann die gesuchte Punktschätzung durch partielle Ableitung nach  $\theta$  und Bestimmung der Nullstellen ermittelt werden. Das Verschwinden der ersten Ableitung ist bekanntlich nur eine notwendige Bedingung für einen Extremwert einer differenzierbaren Funktion. In den meisten Fällen gibt es jedoch nur ein Extremum und zwar das gesuchte Maximum. [71]

---

<sup>90</sup> Handelt es sich um eine Schätzung des Kennwertes, dann wird das Symbol des Kennwertes mit einem Dach versehen [10].

Wegen der Produktstruktur der Likelihood-Funktion ist es günstiger, den natürlichen Logarithmus der Likelihood-Funktion zu bilden und von folgender Gleichung auszugehen.

$$\frac{d(\ln L)}{d\theta} = 0 \quad (4.9)$$

Eine Lösung der Gleichung  $\hat{\vartheta} = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$  stellt eine Realisierung, also einen Punktschätzwert der entsprechenden Punktschätzfunktion  $\hat{\theta} = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$  dar.

#### Vor- und Nachteile:

Ein wesentlicher Nachteil der Maximum-Likelihood-Methode ist es, dass der Verteilungstyp der Stichprobe bekannt sein muss. Irrt man sich hierbei, kann die Schätzfunktion vollkommen falsche Werte liefern.

Der Vorteil der Maximum-Likelihood-Methode liegt hingegen in den Eigenschaften der Schätzfunktion. Die Maximum-Likelihood-Schätzer sind u. a. konsistent (d.h. je mehr Beobachtungen in der Stichprobe sind, desto genauer kann der gesuchte Parameter geschätzt werden) und asymptotisch effizient (d.h. für große Stichprobenumfänge gibt es keine bessere Schätzfunktion). [70]

### 4.3.3 Vom Histogramm zur Dichtefunktion

Im vorliegenden Fall repräsentieren bzw. enthalten die empirisch gewonnenen „GPS-basierenden Fahrzeugdaten“ die zu untersuchenden Stichproben. Dabei sind weder Verteilungstyp noch die zugehörigen Parameter bekannt. Wie zuvor erwähnt, ist jedoch bei Verwendung der Maximum-Likelihood-Methode die Angabe eines konkreten Verteilungstyps zwingend erforderlich. Um dieses Problem umgehen zu können, wird die MLM nicht für einen speziellen Verteilungstyp durchgeführt, sondern eine Vielzahl von möglichen Verteilungstypen als parallele Ausgangspunkte herangezogen. Für jeden einzelnen Verteilungstyp wird dann die MLM ausgeführt und danach auf Basis der „mittlere quadratische Abweichung“ entschieden, welcher Verteilungstyp am „besten“ passt.

Konkret werden in einem ersten Schritt die relativen Häufigkeiten je Stichprobe (z. B. für „Fahrtdauer“ oder „Standdauer“) in Form eines Histogramms dargestellt und für die Wahl der Klassenanzahl  $k$  die Faustregel  $k = \sqrt{n}$  angewendet [73]. Dabei entspricht  $n$  der Anzahl der Realisierungen und kennzeichnet somit den Stichprobenumfang. Zusätzlich werden die Histogramme entsprechend der Bedingung  $F(\infty) = 1$  normiert. Damit ergibt sich für die Summe aller Histogrammwerte ebenfalls die Zahl eins.

Die resultierenden Histogramme dienen somit als Abbilder der Dichtefunktionen der zu schätzenden Verteilungen. Im nächsten Schritt werden nun all jene Verteilungstypen ausgewählt, die dem Histogramm zu entsprechen scheinen (z. B. Normal-, Gamma-Weibull- oder Exponentialverteilung). Nähere Details folgen im nächsten Kapitel.

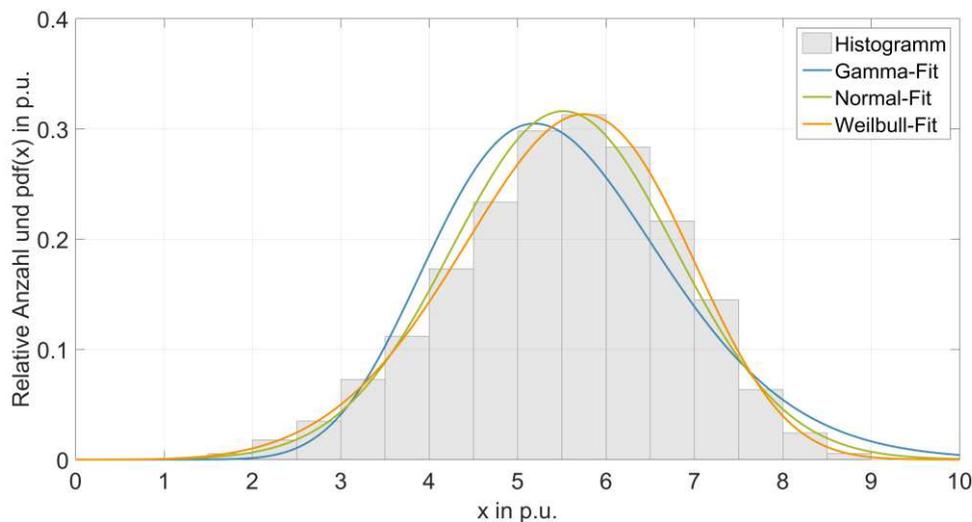


Abbildung 4-11: Histogramm einer weibullverteilten Stichprobe ( $n = 400$ ) und Dichtefunktionen der mittels MLM geschätzten Normal-, Weibull- und Gammaverteilung

Für alle gewählten Verteilungstypen werden danach mit Hilfe der Maximum-Likelihood-Methode die unbekannt Form-, Lage- bzw. Skalenparameter geschätzt. Wie bereits erwähnt, kann dies in MATLAB® mit der Funktion „fitdist“ erfolgen (vergleiche Beispiel in Abbildung 4-11). Im letzten Schritt wird der mittlere quadratische Fehler (MSE) zwischen Histogramm- und Dichtefunktionswerten für jede Verteilung berechnet. In MATLAB® kann z. B. mittels der Funktion „goodnessOfFit“ der MSE zwischen Histogramm und Verteilungsfunktion ermittelt werden. Dabei ist der MSE – wie in Formel (4.7) bereits beschrieben – als mittlere Quadratsumme der Abweichungen definiert. Der Verteilungstyp mit der kleinsten mittleren Abweichung wird schlussendlich als „beste Anpassung“ selektiert und für die weiteren Simulationen herangezogen.

Eine ähnliche Vorgehensweise ist z. B. im Rahmen von [74] in Verwendung. Zur Schätzung der Parameter wird zwar eine evolutionsstrategische Optimierung und nicht wie in dieser Arbeit die MLM eingesetzt, jedoch erfolgt die anschließende Auswahl des Verteilungsfunktionstyps ebenfalls auf Basis der kleinsten mittleren quadratischen Abweichung.

In den nächsten Abschnitten wird die konkrete Umsetzung der vorgestellten Methode zur Schätzung der Parameter und Verteilungstypen für die „Standdauer“, die „Fahrtdauer“, die „Distanz“ und den „Energiebedarf“ erläutert.

#### 4.4 Festlegung der Verteilungstypen und Parameterwerte

Die gewählte Methode zur Approximation der Verteilungsfunktionen (Maximum-Likelihood-Methode & kleinste Fehlerquadrate) ist im vorangegangenen Kapitel dargestellt. Nun wird auf die konkrete Umsetzung bezüglich der zu untersuchenden Merkmale „Standdauer“, „Fahrtdauer“, „Distanz“ und „Energiebedarf“ eingegangen.

Dabei wird einerseits die Aufspaltung des zugrundeliegenden Datensatzes („GPS-basierte Fahrzeugdaten“) auf einzelne Teilmengen (wie z. B. je Kalendertag und Stunde) erläutert sowie die resultierenden Verteilungstypen und festgelegten Parameterwerte angegeben. Darüber hinaus werden die einzelnen Merkmale auf Abhängigkeiten untereinander analysiert, um bei der Modellierung der Zufallszahlen und der nachfolgenden Generierung der E-Taxiflotte keine relevanten Zusammenhänge zu vernachlässigen. In Abbildung 4-12 ist der Prozess von der Auswahl der Stichprobe über die Approximation der Verteilung bis zur Generierung einer konkreten Zufallszahl nochmals überblicksmäßig dargestellt.

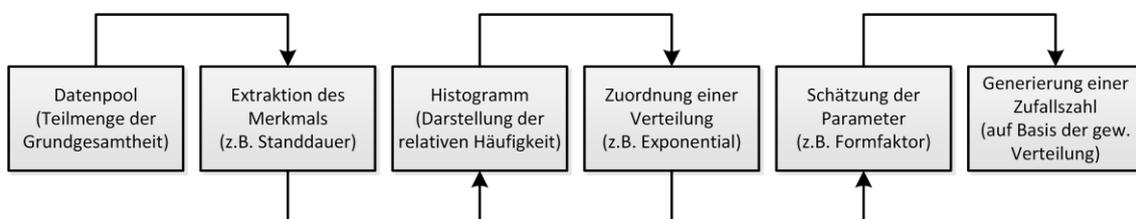


Abbildung 4-12: Von der Auswahl der Stichprobe über die Approximation der Verteilung zur Generierung einer Zufallszahl

##### 4.4.1 Vorbereitende Maßnahmen

Die GPS-basierte Fahrzeugdaten (in Abbildung 4-12 als Datensatz bezeichnet) repräsentieren lediglich eine Teilmenge der Grundgesamtheit „Taxiverkehr“. Sie wurden für eine konkrete Funktaxiflotte über einen beschränkten Zeitraum (Kalenderjahr 2011) mit endlicher Auflösung (u. a. Minuten) aufgezeichnet. Dies ist jedoch nicht weiter dramatisch, da in der empirischen Forschung – allein schon aus pragmatischen Gründen – so gut wie nie die Grundgesamtheit, sondern stets eine Stichprobe (also eine repräsentative Teilmenge) untersucht wird.

In diesem Zusammenhang kann als ein möglichst plakatives Beispiel die Wahlforschung genannt werden. Im Rahmen dieser wird ebenfalls nicht die gesamte wahlberechtigte Bevölkerung nach ihrer Parteienpräferenz befragt, sondern eine Stichprobe erhoben. Im Anschluss werden die durch Befragung erfassten Stichprobendaten mit Hilfe von statistischen Verfahren auf die Grundgesamtheit hochgerechnet und ergeben so eine Wahlprognose. Dabei kann die Stichprobe u. a. auf soziodemografische Eigenschaften hin untersucht und die enthaltenen Unterschiede bei der Parteienpräferenz in Bezug auf Alter, Geschlecht, Wohnsitz usw. ausgewertet werden. Unter anderem wählen Männer anderes als Frauen. [75]

Im Fall des Taxiverkehrs werden hingegen mobilitätsspezifische Merkmale (wie „Standdauer“, „Fahrtdauer“, „Distanz“) extrahiert und u. a. bezüglich räumlicher sowie zeitlicher Eigenschaften (Standplatz, Uhrzeit, Wochentag und Saison) ausgewertet. Um Mitternacht ergeben sich z. B. andere Standdauern als zu Mittag.

Da alle betrachteten Merkmale entsprechende zeitliche Abhängigkeiten aufweisen (vergleiche dazu Kapitel 3 „Mobilitätsdatengrundlage“), werden die GPS-basierten Fahrzeugdaten für jedes Merkmal einerseits nach Wochentagen und andererseits nach Stunden unterteilt. Daraus ergeben sich für die einzelnen Merkmale jeweils 168 individuelle Teilmengen (7 Tage x 24 Stunden), wobei die Anzahl der Elemente je Teilmenge unterschiedlich ausfällt (analog zur zeitabhängigen Anzahl der sich gleichzeitig in Betrieb befindenden Taxis).

Aus Gründen der Qualitätssicherung wird der Datensatz, abgesehen von der zeitlichen Unterteilung, an sich noch beschränkt. Dafür wird ein zugehöriger Qualitätsindikator herangezogen (siehe [53], Seite 19). Dieser gibt für jede Taxifahrt einen adäquaten „Vertrauenswert“ an und hängt von den Verhältnissen zwischen „Fahrtlänge“ und „Luftliniendistanz“ sowie „Vollständigkeit des Routings“ ab. Da sich Verkleinerungen des Stichprobenumfangs entsprechend negativ auf die Eigenschaften des Schätzverfahrens auswirken, muss hier ein passender „Trade-off“ gefunden werden. Von den GPS-basierten Fahrzeugdaten gehen somit nur jene Elemente in die weiteren Berechnungen ein, für die der ermittelte Qualitätsindikator einen Wert von zumindest 60 von 100 möglichen Punkten ergibt. Daraus resultiert eine Datenreduktion von 1,9 Mio. auf rund 1,7 Mio. Taxifahrten (-11,4 %).

Wie zuvor beschrieben, kommt für die Schätzung der Parameterwerte die MATLAB®-Funktion „fitdist“ zum Einsatz. Dabei sind jedoch nicht alle der 23 vorhandenen Verteilungstypen für eine Parameterschätzung sinnvoll. Werden die Histogramme aus Kapitel 3.1 „GPS-basierte Fahrzeugdaten“ betrachtet, dann lässt sich leicht nachvollziehen, dass die Datenwerte aller Merkmale im halbseitigen, unendlichen Intervall  $[0, \infty]$  liegen. Negative Zeitdauern und Distanzen sind auszuschließen. Deshalb werden lediglich jene

stetigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen untersucht, die ausschließlich für die Menge der positiven reellen Zahlen definiert sind. Für die folgenden 12 Verteilungstypen der MATLAB®-Funktion „fitdist“ trifft diese Einschränkung zu:

- Birnbaum-Saunders-Verteilung
- Burr-Verteilung
- Exponential-Verteilung
- Gamma-Verteilung
- Generalisierte Pareto-Verteilung
- Inverse Normalverteilung
- Log-Logistische Verteilung
- Logarithmische Normalverteilung
- Nakagami-Verteilung
- Rayleigh-Verteilung
- Rician-Verteilung
- Weibull-Verteilung

Auf Basis dieser zwölf gewählten Verteilungstypen wird die Approximation der zugrundeliegenden Verteilungen durchgeführt. Dies geschieht einzeln für jede Teilmenge der betrachteten Merkmale. Nachfolgend werden die Ergebnisse für die Merkmale „Standdauer“, „Fahrtdauer“, „Distanz“ und „Energiebedarf“ separat dargestellt und die gewählten Verteilungstypen sowie die geschätzten Parameterwerte beschrieben. Die festgelegten Verteilungstypen kommen im Anschluss bei der stochastischen Generierung der E-Taxiflotte zum Einsatz. In Bezug auf die restlichen, nichtbenötigten Verteilungstypen wird an dieser Stelle auf die MathWorks®-Homepage [76] verwiesen. Dort ist eine vollständige Dokumentation der MATLAB®-Funktion „fitdist“ sowie aller darin implementierten Verteilungstypen zu finden.

#### 4.4.2 Stand- und Fahrtdauer

Wie schon angemerkt, wird in dieser Arbeit das Merkmal „Standdauer“ als jene Zeitspanne definiert, die ein Taxi an einem konkreten Taxistandplatz verbringt. Andersartige Wartezeiten wie z. B. das Warten beim Kunden/bei der Kundin oder an einer Ampel fallen nicht darunter. Diese werden den Taxifahrten (Besetzt- und/oder Leerfahrt) zugeordnet und erhöhen die Werte des Merkmals „Fahrtdauer“ entsprechend. Während sich ein Taxi in Betrieb befindet, wechseln sich somit Standdauer und Fahrtdauer sukzessive ab. Endet die aktuelle Taxischicht und wird das Taxi z. B. am betrieblichen Abstellplatz geparkt, so zählt dies ebenfalls nicht zur beschriebenen Standdauer. Der Aufenthalt am Abstellplatz wird hier daher als eigener Zustand angesehen und gemäß den definierten Betriebsarten und -zeiten modelliert (siehe Kapitel 4.2 „Bestimmung der Betriebsarten und -zeiten“).

Wie zuvor beschrieben, werden 1,7 Mio. Taxifahrten berücksichtigt. Daraus resultieren ebenso viele Werte für das Merkmal „Fahrtdauer“. In Bezug auf den Parameter „Standdauer“ ergeben sich weniger Daten, da systembedingt nur dann ein Wert für die Standdauer am TSP vorhanden ist, wenn es eine darauffolgende Taxifahrt gibt. Die letzte

Taxifahrt stellt das Ende einer durchgängigen Wegekette dar und besitzt somit keine zugehörige Standdauer. Aus dieser Gegebenheit resultiert ein nutzbarer Datenumfang von 1,3 Mio. Werten für das Merkmal „Standdauer“.

In Abbildung 3-8 und Abbildung A-1 (siehe Anhang) sind die Abhängigkeiten der Merkmale „Standdauer“ und „Fahrtdauer“ von der Uhrzeit sowie von den unterschiedlichen Wochentagen dargestellt. Aufgrund der deutlichen zeitlichen Fluktuation der Zeitdauern und den damit verbundenen Schwankungen ihrer Verteilungsparameter werden die Datensätze beider Merkmale erstens nach Wochentagen unterteilt und zweitens in stündliche Intervalle separiert. Dies ergibt jeweils 168 Teilmengen (7 Tage x 24 Stunden), wobei jede der Teilmengen (z. B. Menge aller Standdauerwerte an Montagen zwischen 10:00 Uhr und 11:00 Uhr) als individuelle Stichprobe anzusehen ist. Demnach werden für alle Teilmengen die Parameter jedes der 12 selektierten Verteilungstypen mittels MLM geschätzt und im Anschluss der „beste“ Verteilungstyp auf Basis des kleinsten mittleren Fehlerquadrats selektiert (Details zur Methode siehe Kapitel 4.3 „Approximation der Verteilungen – Angewandte Methodik“).

Tabelle 4-3: Reihung der durchschnittlichen MSE-Werte aller betrachteten Verteilungstypen für das Merkmal „Standdauer“

Standdauer / Reihung	Verteilungstyp	Mittleres Fehlerquadrat (Durchschnittswert)	Relative Veränderung in %
1	Weibull-Verteilung	6,13 E-04	0,0%
2	Burr-Verteilung	8,48 E-04	38,4%
3	Gamma-Verteilung	9,96 E-04	62,6%
4	Generalisierte Pareto-Verteilung	2,03 E-03	231,9%
5	Exponential-Verteilung	2,15 E-03	250,5%
6	Log-Logistische Verteilung	3,41 E-03	455,7%
7	Logarithmische Normalverteilung	3,77 E-03	514,7%
8	Birnbaum-Saunders-Verteilung	6,61 E-03	978,8%
9	Inverse Normalverteilung	1,22 E-02	1.898,2%
10	Nakagami-Verteilung	1,65 E-02	2.585,5%
11	Rayleigh-Verteilung	1,35 E-01	21.976,2%

Die Parameterschätzungen beruhen dabei auf einem mittleren Datenumfang von knapp über 7.600 Werten für das Merkmal „Standdauer“ (1,3 Mio. / 24 / 7) bzw. rund 9.900 Werten bezüglich „Fahrtdauer“ (1,7 Mio. / 24 / 7), wobei absolut gesehen das Minimum bei über 2.000 Elementen und das Maximum bei etwas unter 16.000 Werten liegt.

Da es pro Verteilungstyp – gemäß der Anzahl der Teilmengen – je 168 MSE-Werte gibt, wird daraus der arithmetische Mittelwert gebildet und dieser als endgültige Entscheidungsgrundlage herangezogen. In Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 sind die durchschnittlichen MSE-Werte aller untersuchten Verteilungstypen angeführt und gemäß ihrer Wertigkeit gereiht<sup>91</sup>. Es zeigen sich klare Favoriten bezüglich der ermittelten Fehlerquadrate. Dementsprechend besitzt für das Merkmal „Standdauer“ die Weibullverteilung den geringsten Durchschnittswert und für das Merkmal „Fahrtdauer“ erweist sich die Log-Logistische Verteilung als beste Approximation. Diese werden deshalb im Anschluss für die Generierung der E-Taxiflotte herangezogen.

Zum besseren Verständnis werden jedoch zuvor die beiden ausgewählten Verteilungstypen und ihre Eigenschaften näher beschrieben sowie die geschätzten Parameterwerte dargelegt.

Tabelle 4-4: Reihung der durchschnittlichen MSE-Werte aller betrachteten Verteilungstypen für das Merkmal „Fahrtdauer“

Fahrtdauer / Reihung	Verteilungstyp	Mittleres Fehlerquadrat (Durchschnittswert)	Relative Veränderung in %
1	<b>Log-Logistische Verteilung</b>	<b>6,21 E-04</b>	<b>0,0%</b>
2	<b>Burr-Verteilung</b>	<b>9,61 E-04</b>	<b>54,8%</b>
3	<b>Logarithmische Normalverteilung</b>	<b>2,77 E-03</b>	<b>346,6%</b>
4	Gamma-Verteilung	6,47 E-03	943,1%
5	Weibull-Verteilung	1,00 E-02	1.512,3%
6	Birnbaum-Saunders-Verteilung	1,37 E-02	2.111,2%
7	Inverse Normalverteilung	1,52 E-02	2.342,8%
8	Exponential-Verteilung	1,63 E-02	2.526,3%
9	Generalisierte Pareto-Verteilung	1,71 E-02	2.653,6%
10	Nakagami-Verteilung	1,92 E-02	2.998,3%
11	Rayleigh-Verteilung	5,16 E-02	8.217,0%

### Die Weibull-Verteilung

Die Weibull-Verteilung ist eine zweiparametrische, stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung über die Menge der positiven reellen Zahlen. In der Darstellung laut [76], wie sie in

<sup>91</sup> Für die Rician-Verteilung konnte im Rahmen der MLM keine Konvergenz erzielt werden und sie ist deshalb nicht angeführt.

MATLAB® Verwendung findet, wird der Skalenparameter mit  $a > 0$  und der Formparameter mit  $b > 0$  angegeben. Alternativ werden ebenfalls anstatt  $b$  die Buchstaben  $k$  oder  $\beta$  sowie an Stelle von  $a$  die Schreibweise  $\lambda = 1/a$  verwendet (siehe [70] und [71]). Ihre Dichte- und Verteilungsfunktion sind wie folgt definiert. Dabei geht die Weibull-Verteilung für den Sonderfall  $b = 1$  in die Exponential-Verteilung über.

Dichtefunktion:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

Verteilungsfunktion:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

Häufige Anwendungsfälle der Weibull-Verteilung sind die Beschreibung von Lebensdauern und Ausfallhäufigkeiten sowie die Modellierung der statistischen Verteilung von Windgeschwindigkeiten. In [77] wird die Weibull-Verteilung, wie auch in dieser Arbeit, zur Beschreibung von Standdauern herangezogen. Die darin verwendete Stichprobe basiert indessen auf private PKW-NutzerInnen.

### **Die Log-Logistische Verteilung**

Die Fisk-Verteilung, wie die Log-Logistik-Verteilung u. a. im Bereich der Wirtschaftswissenschaften alternativ genannt wird, ist ebenfalls eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung über der Menge der positiven reellen Zahlen. Die Log-Logistische Verteilung findet Verwendung, wenn der Logarithmus der zu untersuchenden Zufallsgröße logistisch verteilt ist. Dies bedeutet, dass die Log-Logistik-Verteilung in einem linearen Koordinatensystem (KS) eine schiefe und im logarithmischen KS eine symmetrische Dichtefunktion besitzt.

Der Log-Logistik-Verteilung liegen dabei zwei Parameter  $\alpha > 0$  (Skalenparameter) und  $\beta > 0$  (Formparameter) zugrunde. Eine alternative Schreibweise stellt z. B. das Parameterpaar  $\mu = \ln(\alpha)$  und  $\sigma = 1/\beta$  dar.

Dichtefunktion:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{(\beta/\alpha)(x/\alpha)^{\beta-1}}{(1 + (x/\alpha)^\beta)^2} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (4.12)$$

Verteilungsfunktion:

$$F(x) = \begin{cases} \frac{1}{1 + (x/\alpha)^{-\beta}} = \frac{x^\beta}{\alpha^\beta + x^\beta} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (4.13)$$

Die Log-Logistische Verteilung wird u. a. in Wachstumsmodellen und zur Modellierung von binären Antwortvariablen in Feldern wie Biostatistik und Wirtschaft verwendet. Weitere Anwendungsfälle ergeben sich im Bereich der Epidemiologie z. B. bei der Ermittlung der Mortalität (Sterberate) nach der Diagnose bzw. Behandlung von Krebserkrankungen im Bereich der Hydrologie zur Modellierung von Niederschlag und Durchflussmengen oder im Bereich der Ökonomie als einfaches Modell der Verteilung von Wohlstand und Einkommen.

### **Festgelegte Parameterwerte**

Wie eben beschrieben, besitzen beide ausgewählten Verteilungstypen – die Weibull-Verteilung als auch die Log-Logistische Verteilung – zwei Parameter (einen Skalen- und einen Formparameter). Deshalb ergibt sich auf Basis der Maximum-Likelihood-Methode für jede der 168 individuellen Teilmengen ein approximiertes Parameterpaar.

Damit die Unterschiede der geschätzten Parameterwerte für die einzelnen Wochentage kompakt dargestellt werden können, sind diese nachstehend per Boxplot visualisiert (siehe Abbildung 4-13 und Abbildung 4-14).

Dabei reichen in Bezug auf die Standdauer (Weibull-Verteilung) die approximierten Werte des Skalenparameters  $a$  von 11,5 bis 26,9 und jene des Formparameters  $b$  von 0,86 bis 1,27. Für das Merkmal „Fahrdauer“ (Log-Logistische Verteilung) ergibt sich bezüglich Skalenparameter  $\alpha$  ein Bereich von 33,0 bis 48,9 und der Formparameter  $\beta$  liegt zwischen 0,99 und 1,23. Die resultierenden Parameterspannweiten sind auf die nachfrage- und angebotsbedingten Schwankungen im Taxibetrieb zurückzuführen.

Diese zeigen sich gleichermaßen im Tages- und Wochenverlauf. Die beiden Skalensparameter stauchen bzw. dehnen die Dichtefunktionen und besitzen eine direkte Proportionalität zum jeweiligen Erwartungswert  $E(X)$ .

Dementsprechend ist es wenig verwunderlich, dass die Schwankungen der Skalensparameter analog zu den Mittelwerten von Stand- und Fahrtdauer (vergleiche Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7) verlaufen.

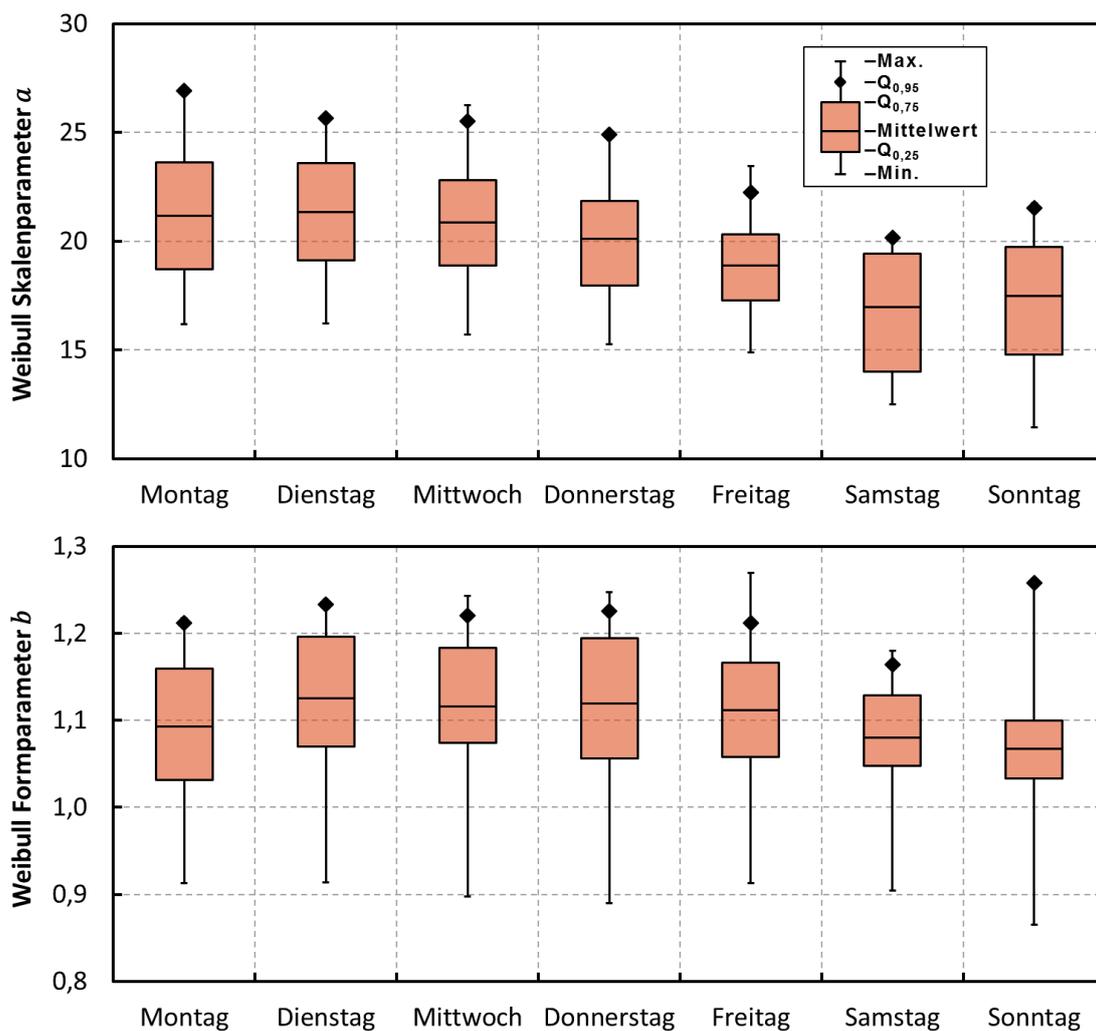


Abbildung 4-13: Box-Plots der approximierten Weibull-Parameter  $a$  und  $b$  für das Merkmal „Standdauer“ (alle Stunden und Wochentage)

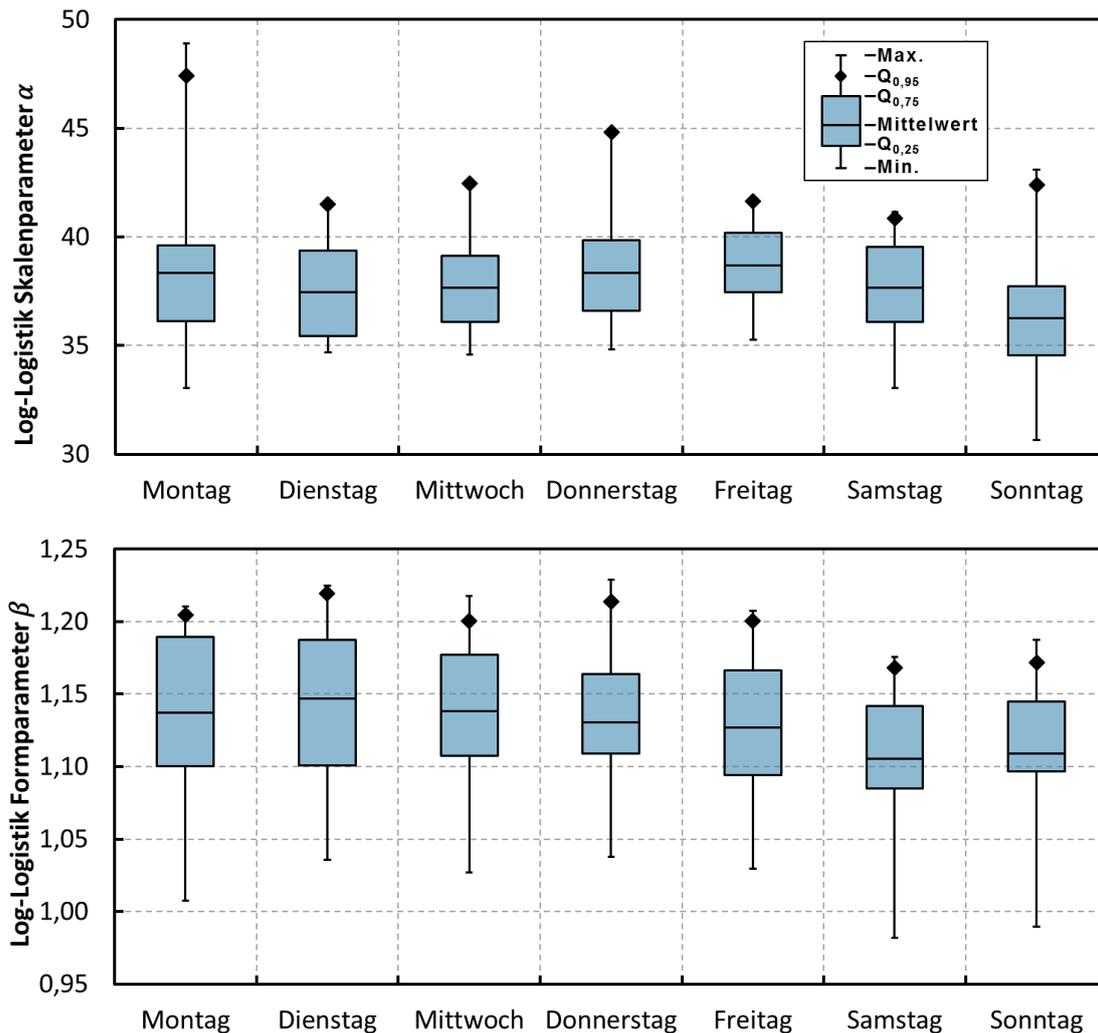


Abbildung 4-14: Box-Plots der approximierten Log-Logistik-Parameter  $\alpha$  und  $\beta$  für das Merkmal „Fahrtdauer“ (alle Stunden und Wochentage)

### Untersuchung der statistischen Zusammenhänge

Damit die Realisierung der Zufallszahlen für „Standdauer“ und „Fahrtdauer“ nachfolgend getrennt voneinander erfolgen kann, wird vorweg ihre statistische Unabhängigkeit analysiert. Dies geschieht in der vorliegenden Arbeit unter Betrachtung der linearen Korrelation. Als Ergebnis steht ein Korrelationskoeffizient zur Verfügung, der die Stärke und die Richtung des Zusammenhangs angibt. Der Korrelationskoeffizient  $Kor(x, y)$  ist im Allgemeinen ein dimensionsloses Maß für den Grad des statistischen, linearen Zusammenhangs zwischen zwei Merkmalen. Dabei ist  $Kor(x, y)$  im Intervall  $[-1, +1]$

definiert. Für  $Kor(x, y)$  gleich „eins“ besteht eine vollständige (positive) lineare Abhängigkeit. Wenn der Korrelationskoeffizient hingegen den Wert „null“ aufweist, dann ergibt sich überhaupt kein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Merkmalen.

Der  $Kor(x, y)$  wird nach Bravais und Pearson wie folgt berechnet [73]:

$$Kor(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\tilde{s}_{XY}}{\tilde{s}_X \tilde{s}_Y} \quad (4.14)$$

$x_i$  bzw.  $y_i$  ... originaler Wert bzw. Vergleichswert (Modell)

$\bar{x}$  bzw.  $\bar{y}$  ... arithmetischer Mittelwert (Original bzw. Modell)

Dabei stellen

$$\tilde{s}_X = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad \tilde{s}_Y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.15)$$

die Standardabweichungen der Merkmale  $X$  und  $Y$  dar und

$$\tilde{s}_{XY} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (4.16)$$

bezeichnet die empirische Kovarianz.

Es wird also bei der Bildung des Korrelationskoeffizienten nach Bravais und Pearson die Kovarianz auf das geometrische Mittel der beiden Varianzen bezogen. Dies ist notwendig, um den Grad der Stärke der Abhängigkeit zu ermitteln. Der absolute Wert der Kovarianz ist dafür nicht aussagekräftig genug, da er von der Skalierung der Zufallsvariablen abhängt.

Werden die Korrelationskoeffizienten zwischen den Zufallsvariablen „Standdauer“ und „Fahrdauer“ für alle 168 Teilmengen gebildet, so ergibt sich eine mittlere Korrelation von 0,0120 bzw. eine maximale von 0,0605. Der lineare Zusammenhang beider Merkmale ist somit auf Basis dieser Ergebnisse verschwindend klein. Dies zeigt ebenfalls das in Abbildung 4-15 dargestellte Streudiagramm im doppel-logarithmischen Maßstab<sup>92</sup>.

<sup>92</sup> In den Bereichen unter einer Minute bilden sich Häufungen entlang von Linien aus. Grund dafür ist die messtechnische Begrenzung der zeitlichen Datenauflösung.

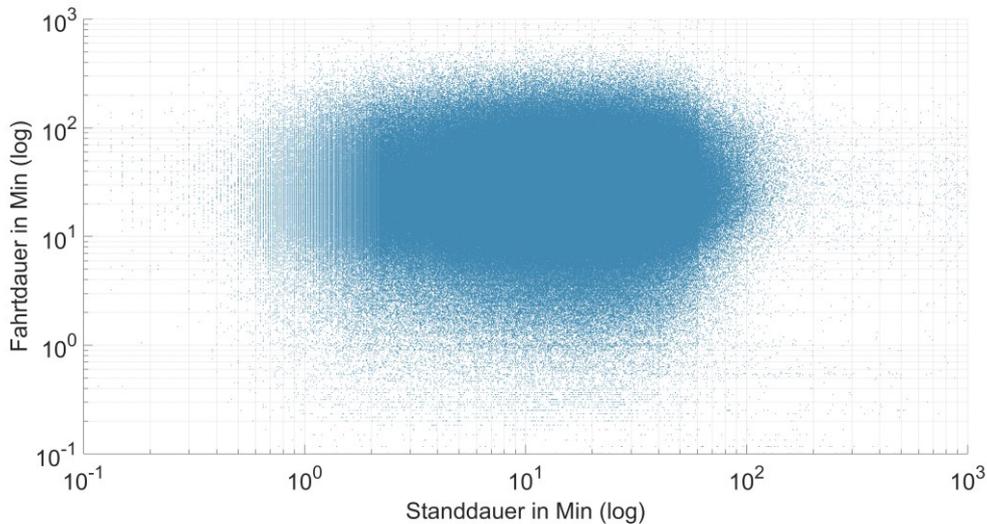


Abbildung 4-15: Streudiagramm für Fahrdauer der Taxifahrten und Standdauer am TSP

#### 4.4.3 Distanz je Taxifahrt

Wie zuvor gezeigt, korrelieren Stand- und Fahrdauer nur in einem unwesentlichen Maß. Aus diesem Grund werden sie vereinfacht als unabhängig angenommen und in weiterer Folge bei der Generierung der Mobilitätsdaten auch unabhängig voneinander aus den ermittelten Wahrscheinlichkeitsverteilungen gezogen. Im Gegensatz dazu gibt es einen offensichtlichen Zusammenhang zwischen Fahrdauer und gefahrener Distanz. Der Korrelationskoeffizient beträgt hierfür (über alle Datenpaare beider Merkmale) einen Wert von 0,81. Dabei kann bereits von einem starken linearen Zusammenhang<sup>93</sup> gesprochen werden.

Je größer die Distanz, desto größer ist die Fahrdauer. Wie in Abbildung 4-16 sichtbar, stimmt die Aussage zumindest tendenziell. Es zeigt sich jedoch keine Gerade, die Werte streuen entscheidend und somit auch die sich daraus ergebenden mittleren Geschwindigkeiten. Die durchschnittliche Geschwindigkeit, die im Rahmen einer Taxifahrt erreicht wird, ist einerseits durch die aktuelle Verkehrslage bestimmt sowie durch lokaler Geschwindigkeitsbegrenzungen limitiert und andererseits aufgrund der hier vorgenommenen Charakterisierung einer Taxifahrt ebenfalls u. a. durch Wartezeiten beim Kunden/ bei der Kundin beeinflusst. Basierend auf einer noch zu definierenden Verteilung steigt

<sup>93</sup>  $\text{Korr} \leq 0,3$  geringer Zusammenhang

$\text{Korr} > 0,3$  und  $\text{Korr} \leq 0,7$  mittlerer Zusammenhang

$\text{Korr} > 0,7$  und  $\text{Korr} \leq 1,0$  starker Zusammenhang

die Streuung mit größerer Distanz bzw. Fahrtdauer entsprechend an. Weiters zeigt sich in Abbildung 4-16 eine deutliche Grenze in Bezug auf die Durchschnittsgeschwindigkeit (Distanz durch Fahrtdauer) von 5 km/h sowie 70 km/h. Diese ergeben sich aufgrund von Plausibilitätsanalysen im Rahmen der GPS-Datenauswertung und -aufbereitung (siehe Kapitel 3.1 „GPS-basierte Fahrzeugdaten“). Außerhalb dieses Bereiches gibt es kaum Datenpunkte.

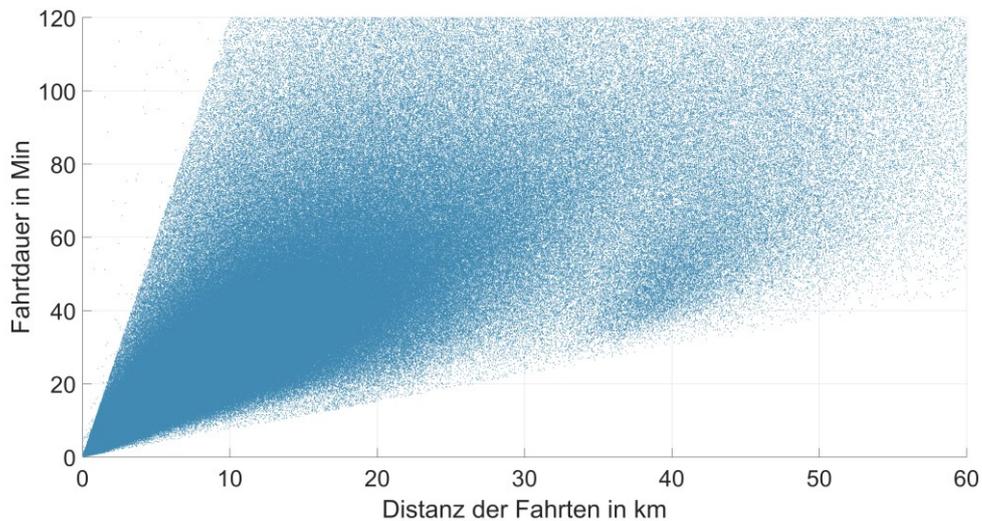


Abbildung 4-16: Streudiagramm für Fahrtdauer und Distanz der Taxifahrten

Werden nun die auftretenden Distanzen für einzelne Fahrtdauer-Intervalle (z. B. Minutenintervalle) extrahiert und die relative Häufigkeit – der in der Untermenge vorkommenden Distanzen – als Histogramm dargestellt, dann können auf diese Weise die Verteilungen in Abhängigkeit der Fahrtdauer visualisiert werden (siehe Abbildung 4-17). Es zeigen sich relative Häufigkeitsverteilungen, deren Erwartungswerte und Varianzen mit steigender Fahrtdauer ebenfalls anwachsen.

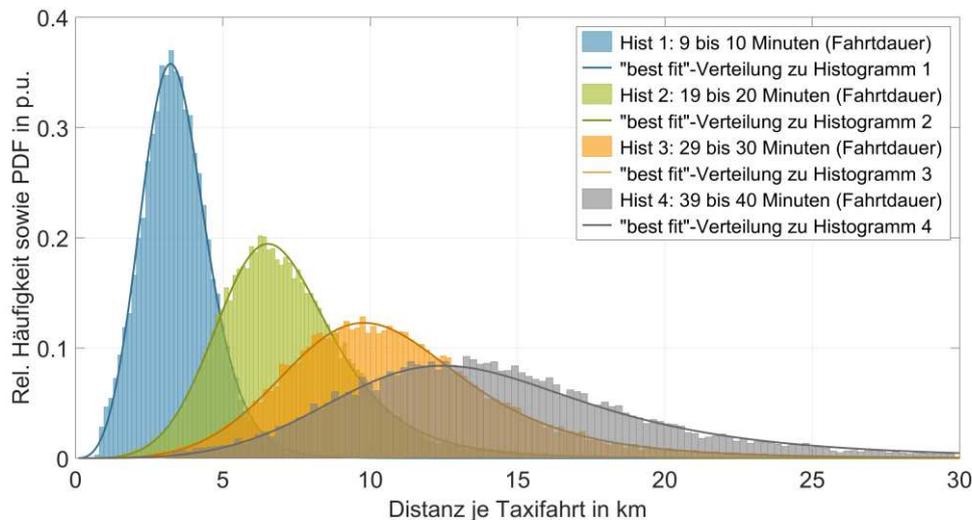


Abbildung 4-17: Relative Häufigkeit der Distanz je Taxifahrt für unterschiedliche Fahrdauer-Intervalle sowie die zugehörigen PDF der „best fit“-Verteilungen („Burr“)

Zur Approximation der Verteilungsfunktionen wird erneut die Maximum-Likelihood-Methode eingesetzt und im Anschluss der „beste“ Verteilungstyp auf Basis des kleinsten mittleren Fehlerquadrats ausgewählt (Details zur Methode siehe Kapitel 4.3 „Approximation der Verteilungen – Angewandte Methodik“).

Dafür wird die Menge aller vorhandenen Fahrdauern (1,7 Mio. Werte) in Zeitintervalle  $\Delta t_i$  mit einer Dauer von einer Minute zerlegt und bezüglich der zugehörigen Distanz analysiert. Im vorhandenen Datensatz sind kaum Fahrdauern größer zwei Stunden enthalten, wodurch in diesem Bereich eine angemessene Schätzung der Verteilung – aufgrund von Konvergenzproblemen – nur mehr beschränkt durchführbar ist und somit unterlassen wird. Auf Basis der Begrenzung der Fahrdauer auf Werte unter zwei Stunden und der Länge der Zeitintervalle (eine Minute) resultieren 120 Teilmengen. Für diese werden die zugehörigen Verteilungen entsprechend approximiert.

Die Parameterschätzungen beruhen für Fahrdauern mit einer Länge bis zwei Stunden auf einem mittleren Datenumfang von ca. 13.300 adäquaten Distanzwerten. Das Minimum liegt bei rund 1.300 Elementen und das Maximum bei etwas über 45.700 Werten. Für die Approximation der Distanzen (in Abhängigkeit der Fahrdauer) weist die Burr-Verteilung im Mittel (über alle Schätzungen der 120 Teilmengen) den geringsten MSE-Wert auf. In Tabelle 4-5 sind die Reihung und die erzielten mittleren MSE-Werte aller betrachteten Verteilungstypen für das Merkmal „Distanz“ aufgelistet. Wie die Weibull-Verteilung für das Merkmal „Standdauer“ und die Log-Logistische Verteilung für die „Fahrdauer“, kommt im Rahmen der anschließenden Generierung der E-Taxiflotte die

Burr-Verteilung zur Ermittlung der Distanzen je Taxifahrt zum Einsatz und wird deshalb im Folgenden kurz beschrieben.

Tabelle 4-5: Reihung der durchschnittlichen MSE-Werte aller betrachteten Verteilungstypen für das Merkmal „Distanz“

Distanz / Reihung	Verteilungstyp	Mittleres Fehlerquadrat (Durchschnittswert)	Relative Veränderung in %
1	<b>Burr-Verteilung</b>	<b>4,43 E-04</b>	<b>0,0%</b>
2	<b>Gamma-Verteilung</b>	<b>5,39 E-04</b>	<b>21,8%</b>
3	<b>Log-Logistische Verteilung</b>	<b>6,20 E-04</b>	<b>39,9%</b>
4	Nakagami-Verteilung	6,50 E-04	46,8%
5	Birnbaum-Saunders-Verteilung	7,08 E-04	59,8%
6	Inverse Normalverteilung	7,59 E-04	71,5%
7	Logarithmische Normalverteilung	9,41 E-04	112,5%
8	Rician-Verteilung	1,22 E-03	175,3%
9	Weibull-Verteilung	1,24 E-03	180,3%
10	Rayleigh-Verteilung	1,94 E-03	338,6%
11	Generalisierte Pareto-Verteilung	6,55 E-03	1.378,4%
12	Exponential-Verteilung	8,70 E-03	1.864,2%

### Die Burr-Verteilung

Die hier dargestellte Form der Burr-Verteilung kann als Verknüpfung der Weibull- und Gamma-Verteilung<sup>94</sup> verstanden werden und ist ebenfalls eine stetige nicht-negative Wahrscheinlichkeitsverteilung. Sie ist darüber hinaus unter zahlreichen anderen Namen wie Burr XII- oder Singh-Maddala-Verteilung bekannt. Die Burr-Verteilung wurde von Irving W. Burr (1942) als zweiparametrische Verteilung eingeführt und von Pandu R. Tadikamalla (1980) um einen dritten Parameter erweitert. Sie besitzt somit, in der erläuterten Darstellung aus [76], den Skalenparameter  $\alpha > 0$  sowie die Formparameter  $c > 0$  und  $k > 0$ . Die Dichte- und Verteilungsfunktion sind wie folgt definiert.

<sup>94</sup> Erläuterung zur Gamma-Verteilung siehe Anhang

Dichtefunktion:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{kc}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{c-1} & x > 0 \\ \left(1 + \left(\frac{x}{\alpha}\right)^c\right)^{k+1} & \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (4.17)$$

Verteilungsfunktion:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{x}{\alpha}\right)^c\right)^k} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (4.18)$$

Aufgrund der drei Parameter deckt die Burr-Verteilung eine breite Palette bezüglich Schiefe und Wölbung ab. Daher wird sie in verschiedenen Bereichen wie Finanz, Hydrologie oder Zuverlässigkeit verwendet. Beispiele für Daten, die häufig mittels Burr-Verteilung modelliert werden, sind Haushaltseinkommen, Getreidepreise, Reisezeiten, Versicherungsrisiko, Hochwasserstände und Ausfalldaten.

### **Methode der kleinsten Fehlerquadrate**

In der vorliegenden Arbeit wird die Burr-Verteilung zur Approximation der Distanzen von Taxifahrten herangezogen. Jedoch verändern sich hierbei die geschätzten Parameterwerte  $\alpha$ ,  $c$  und  $k$  der zugrunde gelegten Burr-Verteilung in Abhängigkeit der Fahrtdauer (vergleiche Abbildung 4-17). Um eine Extrapolation der Parameterwerte für Fahrtauern größer zwei Stunden zu realisieren, wird die Veränderung der Burr-Parameter (in Abhängigkeit der Fahrtdauer) als Formel angegeben. Es ist also nach einer Funktion zu suchen, die möglichst nahe an den Parameterwerten verläuft und somit die sich ergebenden Residuen minimiert („Kleinst-Quadrate-Schätzer“). Dafür kann u. a. die „Methode der kleinsten Quadrate“ herangezogen werden. Sie beruht auf der Minimierung der Summe der Fehlerquadrate und stellt das mathematische Standardverfahren zur Ausgleichsrechnung dar [73]. Durch die Bildung der Fehlerquadrate wird erreicht, dass größere Abweichungen stärker gewichtet werden als kleinere.

Allgemein können beliebige lineare wie auch nicht-lineare Modellfunktionen  $f(x; \alpha_i)$  verwendet werden. Hier beschränkt sich die Auswahl jedoch auf Polynome  $n$ -ter Ordnung ( $n \geq 0$ ), da mit ihnen bezüglich der gegebenen Aufgabenstellung eine hinreichende Genauigkeit erzielt wird (siehe Kapitel 5 „Generierung einer gesamten E-Taxiflotte“).

$$P(x; \alpha_i) = \sum_{i=0}^n \alpha_i x^i = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \dots + \alpha_{n-1} x^{n-1} + \alpha_n x^n \quad (4.19)$$

Mit Hilfe der MATLAB®-Funktion „polyfit“ (polynomial curve fitting) kann auf Basis der „Methode der kleinsten Quadrate“ ein Polynom  $P(x; \alpha_i)$   $n$ -ten Grades an eine vorgegebene Menge von Datenpaaren  $(x_i, y_i)$  angepasst („gefittet“) werden [76].

Zur Erläuterung der Methode soll eine gegebene Punktwolke  $y(x)$  durch eine Ausgleichsgerade angepasst werden, die beispielhaft mittels der Funktion  $f(x; \alpha_i) = P(x; \alpha_i)$  gegeben ist [73]:

$$f(x; \alpha_i) = \alpha_0 + \alpha_1 x \quad (4.20)$$

Aufgrund der Streuung der Punktwolke  $y(x)$  um die Ausgleichsgerade  $f(x; \alpha_i)$  ergibt sich ein zufälliger Fehlerterm  $\epsilon$ . Wird davon ausgegangen, dass dieser additiv ist, dann zeigt sich folgende Beziehung:

$$y_i = \alpha_0 + \alpha_1 x_i + \epsilon_i \quad i = 1, \dots, n \quad (4.21)$$

Nun besteht laut [73] das übliche Vorgehen darin, die Summe der quadrierten Differenzen – als  $Q(\alpha_0, \alpha_1)$  bezeichnet – in Abhängigkeit von  $\alpha_0$  und  $\alpha_1$  zu minimieren.

Erreicht  $Q(\alpha_0, \alpha_1)$  ihr Minimum, dann werden die zugehörigen Werte von  $\alpha_0$  und  $\alpha_1$  als „Kleinste-Quadrate-Schätzer“ und das Verfahren zur Bestimmung der Ausgleichsgeraden  $f(x; \alpha_i)$  als „Methode der kleinsten Quadrate“ bezeichnet.

$$Q(\alpha_0, \alpha_1) = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - (\alpha_0 + \alpha_1 x_i)]^2 \quad (4.22)$$

Die „Kleinste-Quadrate-Schätzer“  $\hat{\alpha}_0$  und  $\hat{\alpha}_1$  berechnen sich dabei durch die partielle Ableitung nach  $\alpha_0$  und  $\alpha_1$  sowie anschließendes Nullsetzen der Ableitungen.

$$\frac{\partial Q(\alpha_0, \alpha_1)}{\partial \alpha_0} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (\alpha_0 + \alpha_1 x_i)] = 0 \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial Q(\alpha_0, \alpha_1)}{\partial \alpha_1} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (\alpha_0 + \alpha_1 x_i)] x_i = 0 \quad (4.24)$$

Nach Auflösen der obigen Gleichungen ergibt sich  $\hat{\alpha}_0$  und  $\hat{\alpha}_1$  zu:

$$\hat{\alpha}_0 = \bar{y} - \hat{\alpha}_1 \bar{x} \quad (4.25)$$

$$\hat{\alpha}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\tilde{s}_{XY}}{\tilde{s}_X^2} \quad (4.26)$$

Dabei bezeichnet  $\tilde{s}_X^2$  die Varianz und  $\tilde{s}_{XY}$  die empirische Kovarianz – siehe ebenfalls Formeln (4.15) und (4.16). Die Gleichung der Ausgleichsgeraden lautet somit

$$\hat{y} = \hat{\alpha}_0 - \hat{\alpha}_1 x \quad (4.27)$$

Diese Methode kommt in gleicher Weise bei der MATLAB®-Funktion „polyfit“ zum Einsatz. Jedoch kann anstatt einer Ausgleichsgeraden ein beliebiges Polynom  $n$ -ten Grades zur Anpassung der zugrunde gelegten Datenpaare  $(x_i, y_i)$  ausgewählt werden.

Wie bereits gezeigt, verändern sich die geschätzten Parameterwerte  $\alpha$ ,  $c$  und  $k$  der Burr-Verteilung in Abhängigkeit der Fahrdauer. Für die Fahrdauer-Bereiche kleiner bzw. größer-gleich 60 Minuten ergeben sich die in Abbildung 4-18 bzw. Abbildung 4-19 dargestellten Verläufe.

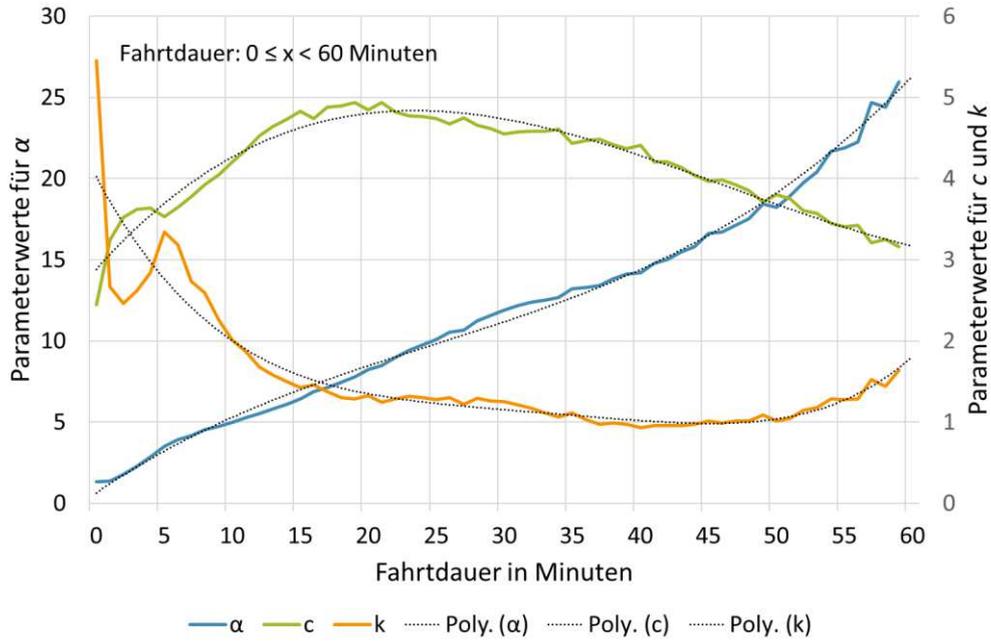


Abbildung 4-18: Verlauf der geschätzten Parameterwerte  $\alpha$ ,  $c$  und  $k$  der Burr-Verteilung in Abhängigkeit der Fahrtdauer (Minutenintervalle; Bereich bis 60 Minuten)

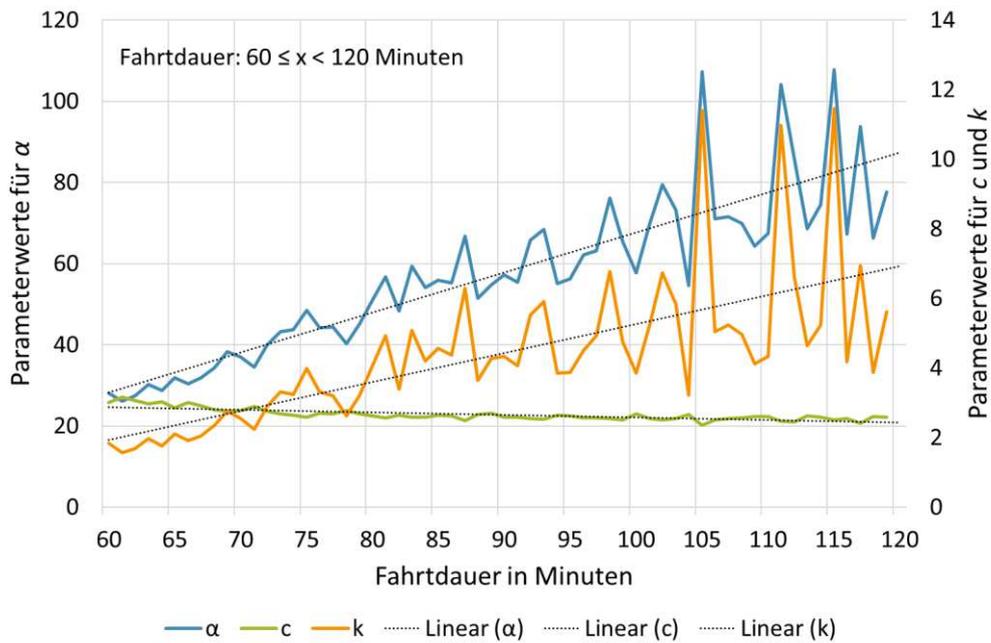


Abbildung 4-19: Verlauf der geschätzten Parameterwerte  $\alpha$ ,  $c$  und  $k$  der Burr-Verteilung in Abhängigkeit der Fahrtdauer (Minutenintervalle; Bereich von 60 bis 120 Minuten)

Zur Approximation aller drei Burr-Parameterwerte wird für Fahrdauerwerte unter 60 Minuten<sup>95</sup> ein Polynom 3. Ordnung (Index A) und für Werte größer-gleich 60 Minuten eine Gerade (Index B) herangezogen. Eine Berücksichtigung höherer Ordnungen würde nur mehr geringfügige Verbesserungen mit sich bringen und wird deshalb unterlassen. Die verwendeten Polynome werden in MATLAB<sup>®</sup> entsprechend gefittet und besitzen folgende Form:

*Bereich A* ( $0 \leq x < 60$  Minuten):

$$\begin{aligned}\alpha_A &= -0,0740 + 0,5728 \cdot x - 0,0113 \cdot x^2 + 1,4364e-04 \cdot x^3 \\ c_A &= +2,5749 + 0,2075 \cdot x - 0,0057 \cdot x^2 + 4,0391e-04 \cdot x^3 \\ k_A &= +4,0008 - 0,2073 \cdot x - 0,0045 \cdot x^2 - 2,9989e-04 \cdot x^3\end{aligned}\tag{4.28}$$

*Bereich B* ( $60 \leq x < 120$  Minuten):

$$\begin{aligned}\alpha_B &= -32,4470 + 0,9865 \cdot x \\ c_B &= +3,344 - 0,0075 \cdot x \\ k_B &= -3,1933 + 0,0834 \cdot x\end{aligned}\tag{4.29}$$

*Bereich C* ( $x \geq 120$  Minuten):

$$\begin{aligned}\alpha_C &= -32,4470 + 0,9865 \cdot x \\ c_C &= +2,4399 \\ k_C &= -3,1933 + 0,0834 \cdot x\end{aligned}\tag{4.30}$$

Polynome sind naturgemäß unbegrenzte, oszillierende Funktionen. Je höher die Ordnung, desto rascher laufen ihre Funktionswerte Richtung  $\pm\infty$ . Damit die Parameterwerte der Burr-Verteilungen im Bereich über 120 Minuten nicht zu stark auseinanderstreben, werden einerseits die Parameterwerte  $\alpha$  und  $k$  als Geraden weitergeschrieben sowie andererseits der Parameter  $c$  am approximierten Wert für das Fahrdauer-Zeitintervall 119 bis 120 Minuten festgehalten. Ohne dieser Beschränkung würde der Parameterwert  $c$  sonst kontinuierlich Richtung  $-\infty$  laufen und gegebenenfalls ungültige Werte annehmen, da der Parameter  $c$  der Burr-Verteilungen lediglich für Werte größer null definiert ist.

<sup>95</sup> Die 60 Teilmengen entsprechen 60 Datenpaaren  $(x_i, y_i)$ .

#### 4.4.4 Energiebedarf je Taxifahrt

Die angewendete Methode zur Ermittlung des Energiebedarfs je Taxifahrt ist im Kapitel 3.1 „GPS-basierte Fahrzeugdaten“ dargestellt und wird deshalb hier nicht weiter behandelt. An dieser Stelle soll jedoch erwähnt werden, dass es sich bei den angegebenen Werten um den Energiebedarf je Taxifahrt exkl. Nebenverbraucher handelt. Der Energiebedarf u. a. für die Klimatisierung der E-Taxis wird erst später inkludiert. Für die Modellierung des Energiebedarfs im Rahmen der noch folgenden Generierung einer gesamten E-Taxiflotte ist es darüber hinaus essentiell, über die Zusammenhänge zwischen Energiebedarf und den anderen Mobilitätsmerkmalen Bescheid zu wissen. Es ist u. a. naheliegend, dass der Energiebedarf und die Distanz von Taxifahrten gewisse lineare Abhängigkeiten besitzen. Bei Ermittlung des Korrelationskoeffizienten ergibt sich ein beträchtlicher Wert von 99,57 %. Dieser kann mittels Streudiagramm (siehe Abbildung 4-20) visualisiert werden. Trotz des überaus starken, linearen Verhaltens ergibt sich eine gewisse Streuung um die Ausgleichsgerade.

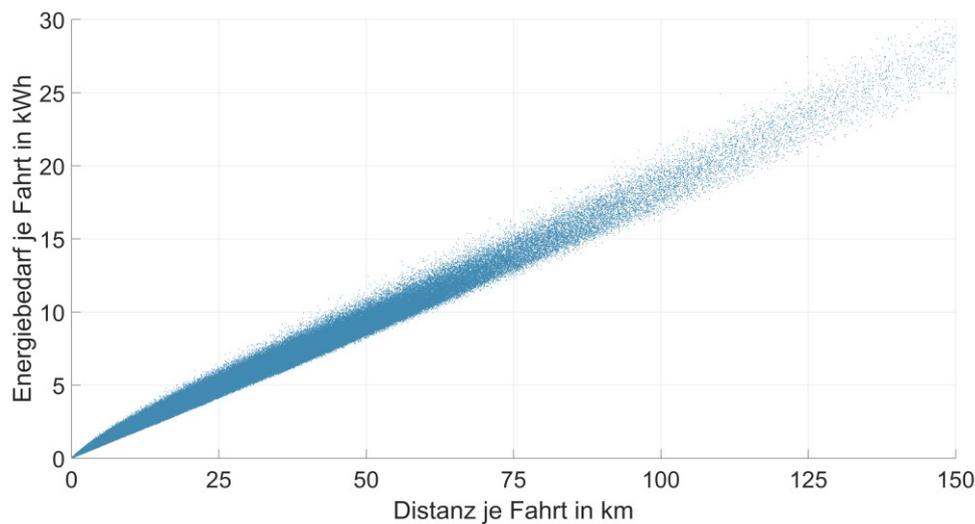


Abbildung 4-20: Streudiagramm für Distanz und Energiebedarf je Taxifahrt

Zur Darstellung der Streuungsänderungen in Abhängigkeit der Distanz wird erneut das Streudiagramm in einzelne Intervalle zerlegt. Hierbei wurden Distanz-Intervalle<sup>96</sup> von 100 m festgelegt und die resultierenden, relativen Häufigkeiten des Energiebedarfs

<sup>96</sup> Dies bedeutet, dass pro Teilmenge der Unterschied der enthaltenen Distanzen je Taxifahrt kleiner als 100 m sein muss.

ermittelt. Dabei steigt das arithmetische Mittel der Häufigkeitsverteilung natürlich proportional zur Distanz an und beeinflusst somit direkt die Lokalisation (Lage) der Verteilungen. Um den linearen Zusammenhang zu eliminieren und so besser die Änderungen der Streuungsparameter analysieren zu können, wird zuerst der spezifische Energiebedarf in kWh/100 km berechnet.

Die lineare Abhängigkeit zwischen Energiebedarf und Wegstrecke lässt primär auf einen im Mittel konstanten spezifischen Energiebedarf schließen. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich jedoch eine erhebliche Änderung der Varianz in Abhängigkeit der zurückgelegten Distanz. Für die drei in Abbildung 4-21 dargestellten Beispiele im Distanzbereich um 5, 10 und 20 km ergibt sich eine Steigerung vom kleinsten bis zum größten Wert von ca. +145 %. Der arithmetische Mittelwert schwankt für die drei Beispiele hingegen lediglich zwischen 19,6 und 21,4 kWh/100 km (+9 %), wobei die beiden Parameter  $\mu$  und  $\sigma$  mit Zunahme der Distanz abnehmen.

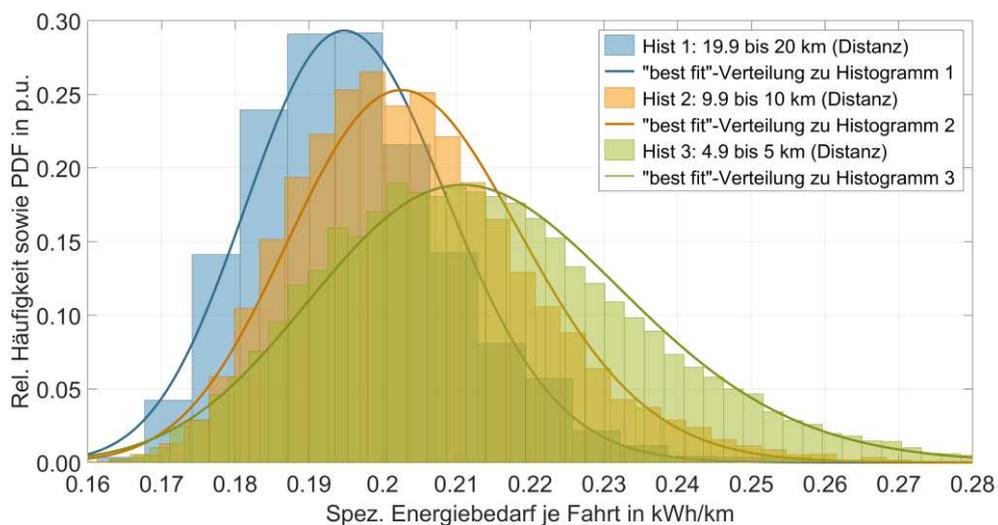


Abbildung 4-21: Relative Häufigkeit des spez. Energiebedarfs je Taxifahrt für unterschiedliche Distanz-Intervalle sowie die zugehörigen PDF der „best fit“-Verteilungen

Zur Approximation der Verteilungsfunktionen wird erneut die Maximum-Likelihood-Methode für jede Teilmenge (100m-Intervalle) angewandt und im Anschluss wiederum der „beste“ Verteilungstyp auf Basis des kleinsten mittleren Fehlerquadrats selektiert.

Die Parameterschätzungen im Bereich bis 30 km (300 Teilmengen) basiert auf einem mittleren Datenumfang von knapp unter 5.100 Werten. Das Maximum liegt bei etwa 12.700 Energiebedarfswerten. Ab einer Distanz von rund 27 km beträgt die Anzahl der Elemente je Teilmenge 1.000 und weniger. Für noch größere Distanzen nimmt der Umfang kontinuierlich ab und beinhaltet bei 50 km ca. 300 Werte. Für die hier durchgeführte

Approximation des spez. Energiebedarfs (in Abhängigkeit der Distanz je Taxifahrt) weist die Lognormal-Verteilung im Mittel über alle Schätzungen der 500 Teilmengen (bis 50 km) den geringsten MSE-Wert auf. In diesem Fall wird also die Lognormal-Verteilung zur weiteren Verwendung (Generierung der E-Taxiflotte) ausgewählt und ist deshalb nachfolgend kurz beschrieben. Die Ergebnisse der anderen betrachteten Verteilungen sind in Tabelle 4-6 zu sehen. Da die mittleren Fehlerquadrate der ersten drei Ränge nahezu gleichwertig sind, kann die Inverse Normalverteilung oder auch die Birnbaum-Saunders-Verteilung zur Ermittlung des spezifischen Energiebedarfs herangezogen werden.

Tabelle 4-6: Reihung der durchschnittlichen MSE-Werte aller betrachteten Verteilungstypen für das Merkmal „Spezifischer Energiebedarf“

Spez. Energiebedarf / Reihung	Verteilungstyp	Mittleres Fehlerquadrat (Durchschnittswert)	Relative Veränderung in %
1	<b>Logarithmische Normalverteilung</b>	<b>8,869 E-04</b>	<b>0,0%</b>
2	<b>Inverse Normalverteilung</b>	<b>8,870 E-04</b>	<b>0,0%</b>
3	<b>Birnbaum-Saunders-Verteilung</b>	<b>8,874 E-04</b>	<b>0,1%</b>
4	Gamma-Verteilung	1,019 E-03	14,9%
5	Burr-Verteilung	1,021 E-03	15,1%
6	Log-Logistische Verteilung	1,141 E-03	28,6%
7	Nakagami-Verteilung	1,175 E-03	32,5%
8	Rician-Verteilung	1,352 E-03	52,4%
9	Weibull-Verteilung	3,978 E-03	348,5%
10	Rayleigh-Verteilung	1,586 E-02	1.688,2%
11	Exponential-Verteilung	1,694 E-02	1.810,4%
12	Generalisierte Pareto-Verteilung	2,812 E-02	3.070,2%

### Logarithmische Normalverteilung

Die Lognormal-Verteilung ist eine stetige nicht-negative Wahrscheinlichkeitsverteilung mit den beiden Parametern  $\mu \in \mathbb{R}$  (Skalen-) und  $\sigma > 0$  (Formparameter). Bei der Lognormal-Verteilung ist der Logarithmus der zu untersuchenden Zufallsgröße normalverteilt. D.h., die Lognormal- und die Normal-Verteilung sind eng miteinander verknüpft und besitzen denselben Zusammenhang wie die log-logistische und die logistische Verteilung. Im Gegensatz zu einer normalverteilten Zufallsvariable, die nach dem zentralen Grenzwertsatz als Summe vieler verschiedener Zufallsvariablen aufgefasst werden kann, entsteht eine logarithmische, normalverteilte Zufallsvariable jedoch durch

das Produkt vieler positiver Zufallsvariablen. Somit ist die logarithmische Normalverteilung die einfachste Verteilungsart für multiplikative Modelle.

Dichtefunktion:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (4.31)$$

Verteilungsfunktion:

$$F(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^x \frac{1}{t} e^{-\frac{(\ln(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (4.32)$$

Die Lognormal-Verteilung wird u. a. zur Modellierung von Aktienkursen oder zur Schätzung von Umsatzziffern von Unternehmen herangezogen. Häufig sind auch Einkommen lognormalverteilt, da es in der Regel relativ wenig bestbezahlte Arbeitsplätze gibt bzw. eine kleine Anzahl an Anstellungen mit besonders niedrigen Einkommen. Dem gegenüber stehen jedoch sehr vielen Stellen mit moderaten Einkommen.

Analog zur Vorgehensweise bei der Approximation der Distanzen werden nun für die Lognormal-Verteilungen des spez. Energiebedarfs die Änderung der Parameterwerte  $\mu$  und  $\sigma$  analysiert und durch Polynome  $n$ -ten Grades angepasst. Dies hat den Vorteil, dass – im Rahmen der Generierung einer gesamten E-Taxiflotte – die entsprechenden Parameterwerte  $\mu$  und  $\sigma$  mit Hilfe der ermittelten Polynom-Funktionen für eine gegebene Distanz einfach berechnet werden können.

Zur Erfassung einzelner, lokaler Extremwerte und Wendepunkte ist die Menge aller auftretenden Distanzen in vier Bereiche gegliedert: 0 bis 3 km, 3 bis 30 km, 30 bis 50 km sowie alle Werte größer als 50 km.

Abbildung 4-22 bis Abbildung 4-24 stellen die Verläufe der Lognormal-Parameterwerte  $\mu$  und  $\sigma$  für die drei Bereiche bis 50 km und die jeweiligen Ausgleichspolynome dar. Die Koeffizienten der Polynome werden mit der bereits beschriebenen MATLAB®-Funktion „polyfit“ entsprechend angepasst und besitzen folgende Form:

*Bereich A* ( $0 \leq x < 3$  km):

$$\begin{aligned}\mu_A &= -1,4441 - 0,3397 \cdot x + 0,4517 \cdot x^2 - 0,2958 \cdot x^3 \\ &\quad + 0,1037 \cdot x^4 - 0,0185 \cdot x^5 + 0,0013 \cdot x^6 \\ \sigma_A &= +0,4325 - 1,2343 \cdot x + 2,3151 \cdot x^2 - 2,2036 \cdot x^3 \\ &\quad + 1,1011 \cdot x^4 - 0,2756 \cdot x^5 + 0,0272 \cdot x^6\end{aligned}\tag{4.33}$$

*Bereich B* ( $3 \leq x < 30$  km):

$$\begin{aligned}\mu_B &= -1,48 - 1,82e-02 \cdot x + 8,91e-04 \cdot x^2 - 2,33e-05 \cdot x^3 + 2,45e-07 \cdot x^4 \\ \sigma_B &= +0,17 - 1,94e-02 \cdot x + 1,49e-03 \cdot x^2 - 5,06e-05 \cdot x^3 + 6,22e-07 \cdot x^4\end{aligned}\tag{4.34}$$

*Bereich C* ( $30 \leq x < 50$  km):

$$\begin{aligned}\mu_C &= 144,2129 - 23,3645 \cdot x + 1,5433 \cdot x^2 - 5,38e-02 \cdot x^3 \\ &\quad + 1,04e-03 \cdot x^4 - 1,07e-05 \cdot x^5 + 4,52e-08 \cdot x^6 \\ \sigma_C &= 86,2228 - 12,7525 \cdot x + 0,7796 \cdot x^2 - 2,52e-02 \cdot x^3 \\ &\quad + 4,55e-04 \cdot x^4 - 4,34e-06 \cdot x^5 + 1,72e-08 \cdot x^6\end{aligned}\tag{4.35}$$

Für den vierten Bereich D (ab 50 km) werden die Verteilungen konstant gehalten und mit den letzten Werten des Bereichs C parametrisiert. Damit wird gewährleistet, dass die Parameterwerte nicht weiter auseinanderstreben und ungültige Werte annehmen. Der Parameter  $\sigma$  der Lognormal-Verteilungen ist lediglich für Werte größer null definiert.

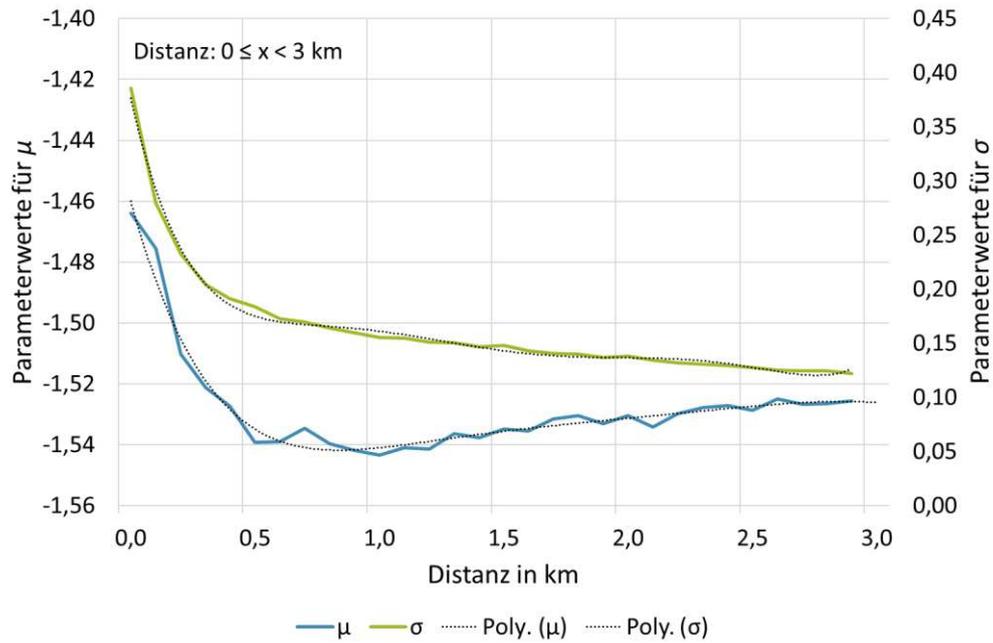


Abbildung 4-22: Verlauf der geschätzten Parameterwerte  $\mu$  und  $\sigma$  der Lognormal-Verteilung in Abhängigkeit der Distanz (100m-Intervalle; Bereich: bis 3 km)

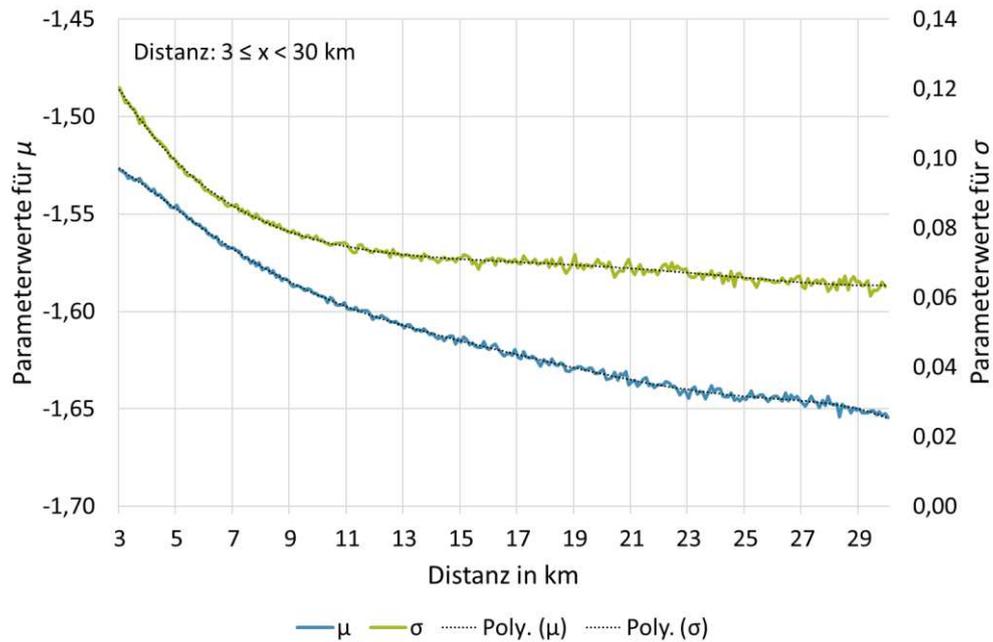


Abbildung 4-23: Verlauf der geschätzten Parameterwerte  $\mu$  und  $\sigma$  der Lognormal-Verteilung in Abhängigkeit der Distanz (100m-Intervalle; Bereich: von 3 bis 30 km)

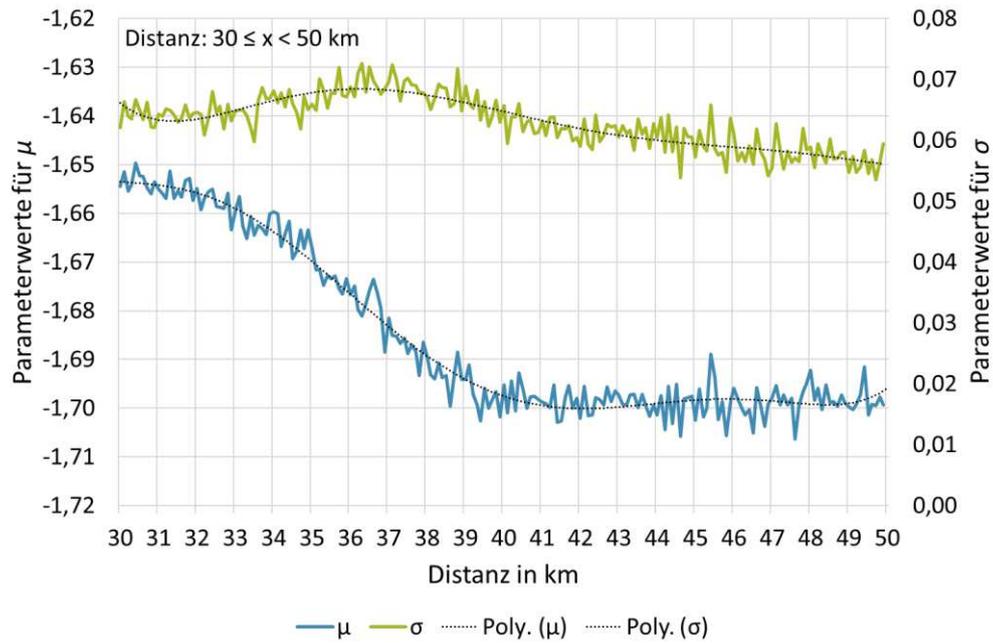


Abbildung 4-24: Verlauf der geschätzten Parameterwerte  $\mu$  und  $\sigma$  der Lognormal-Verteilung in Abhängigkeit der Distanz (100m-Intervalle; Bereich: von 30 bis 50 km)

## 5 Generierung einer gesamten E-Taxiflotte

In den vorangegangenen Kapiteln wurde das in dieser Arbeit entwickelte stochastische Modell zur Abbildung des E-Taxibetriebs sowie die dafür notwendige Datenaufbereitung und Parameterfindung im Detail beschrieben. In diesem Kapitel wird nun das erarbeitete Fundament eines „Netzwerks von Warteschlangen“ genutzt, um im Rahmen der Simulation eine gesamte E-Taxiflotte sukzessive zu generieren und somit die lückenlose Analyse der benötigten Mobilitätsdaten („Fahren“ plus „Stehen“) auf Fahrzeugebene zu ermöglichen. Dies bedeutet, dass für jedes zu modellierende E-Taxi über einen einstellbaren Zeitbereich (z. B. ein Kalenderjahr) alle Taxifahrten und alle Aufenthalte (u. a. an den TSP) räumlich, zeitlich und energetisch auf iterativer Weise und in sich geschlossen berechnet werden. Diese wesentliche Erweiterung entspricht dem Kernstück der vorliegenden Simulation. Damit können im Anschluss neue Erkenntnisse auf Ebene der einzelnen E-Taxis und der zugrunde gelegten Betriebsarten gewonnen werden. Um dies zu bewerkstelligen, sind folgende Punkte schrittweise bis zum Erreichen entsprechender Abbruchkriterien durchzuführen:

1. Festlegung des Betrachtungszeitraumes (z. B. Kalenderjahr)
2. Definition der maximalen Flottengröße<sup>97</sup> (Anzahl der max. E-Taxis)
3. Zuordnung der Betriebsarten und -zeiten je E-Taxi (Schichttyp, -verteilungen)
4. Stochastische Berechnung aller Taxifahrten und Standdauern je Taxischicht (u. a. Dauer, Distanz, Ort und Energiebedarf)
5. Ermittlung von Schichtende und Beginn der nächsten Taxischicht (zeitlich und örtlich)

Dabei werden die Punkte 4 und 5 wiederholend durchlaufen bis das Ende des eingestellten Betrachtungszeitraums erreicht und die gewünschte Anzahl an E-Taxis generiert ist (Realisierungsphase). Die Initialisierungsphase hingegen umfasst die Punkte 1 bis 3 und wird nur einmal durchgeführt.

Abbildung 5-1 (Initialisierung) und Abbildung 5-2 (Realisierung) stellen den Programmablaufplan der stochastischen Mobilitätsdatengenerierung einer E-Taxiflotte schematisch dar. Darin sind die wesentlichen Unterprogramme und Verzweigungen/Entscheidungen sowie deren Verbindungen enthalten. Nachfolgend werden die enthaltenen Elemente einzeln betrachtet und deren Funktionsweise detailliert beschrieben. Ergänzend

<sup>97</sup> Im Rahmen von Kapitel 6 „Technische Machbarkeitsanalyse“ werden unterschiedliche Szenarien mit verschiedenen E-Taxi-Durchdringungsraten betrachtet und die Auswirkungen der variierenden Flottengrößen u. a. auf den Ladeinfrastrukturausbau untersucht.

werden notwendige Einschränkungen und Abhängigkeiten erläutert, um die Simulation nachvollziehbar zu gestalten.

Anschließend werden die Ergebnisse der generierten Mobilitätsdaten auf Flottenebene visualisiert und zur Validierung mit den bereits gewonnenen Erkenntnissen vorangegangener Kapitel verglichen. Es soll gezeigt werden, dass durch den gewählten Ansatz die resultierenden Verteilungen und Ganglinien mit jenen der Mobilitätsdatengrundlage (GPS-basierte Fahrzeugdaten und kumulierte Flottendaten) in hinreichender Qualität übereinstimmen und somit die gewünschte lückenlose und durchgängige Abbildung des Taxibetriebs erzielt wird.

Darauf aufbauend können die Resultate nicht nur auf Ebene einzelner Taxifahrten, sondern auch auf Ebene ganzer Taxischichten dargestellt und für die drei gewählten Betriebsarten (Tages-, Nacht- und Doppelschicht) separat analysieren werden.

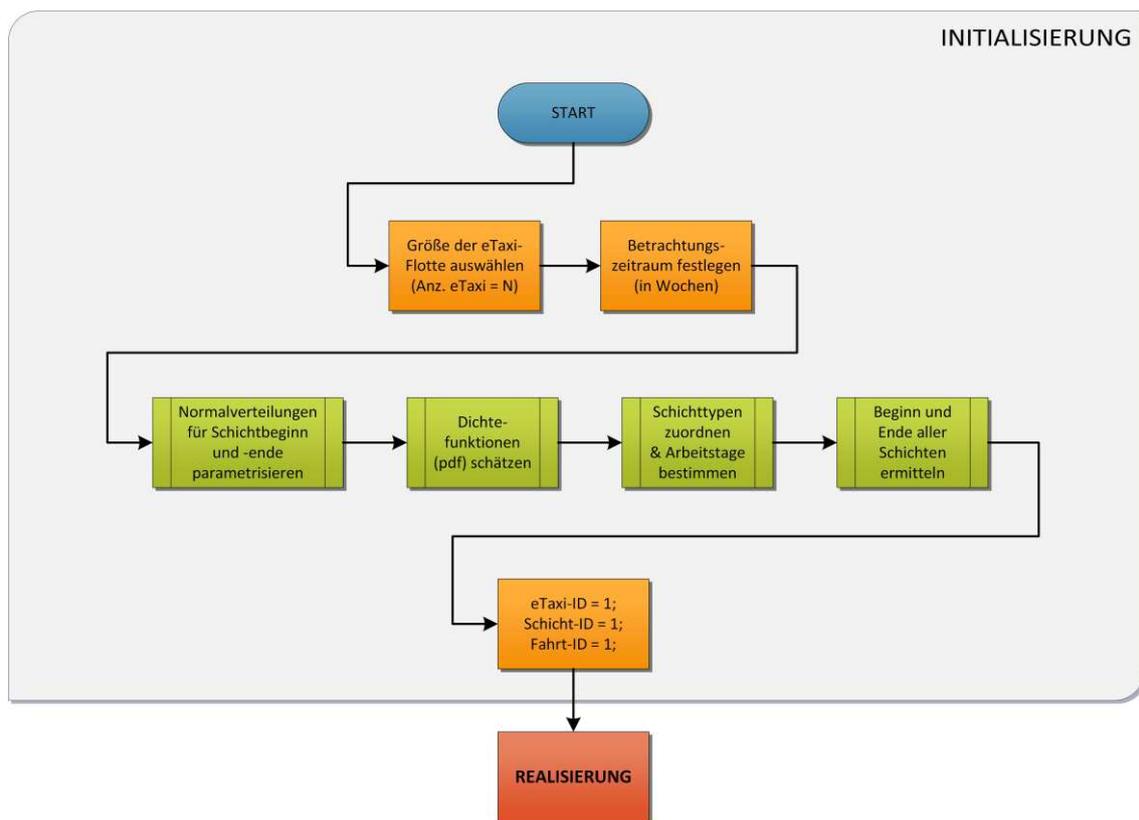


Abbildung 5-1: Programmablaufplan „Initialisierungsphase“ für die nachfolgende stochastische Generierung der Mobilitätsdaten einer E-Taxiflotte

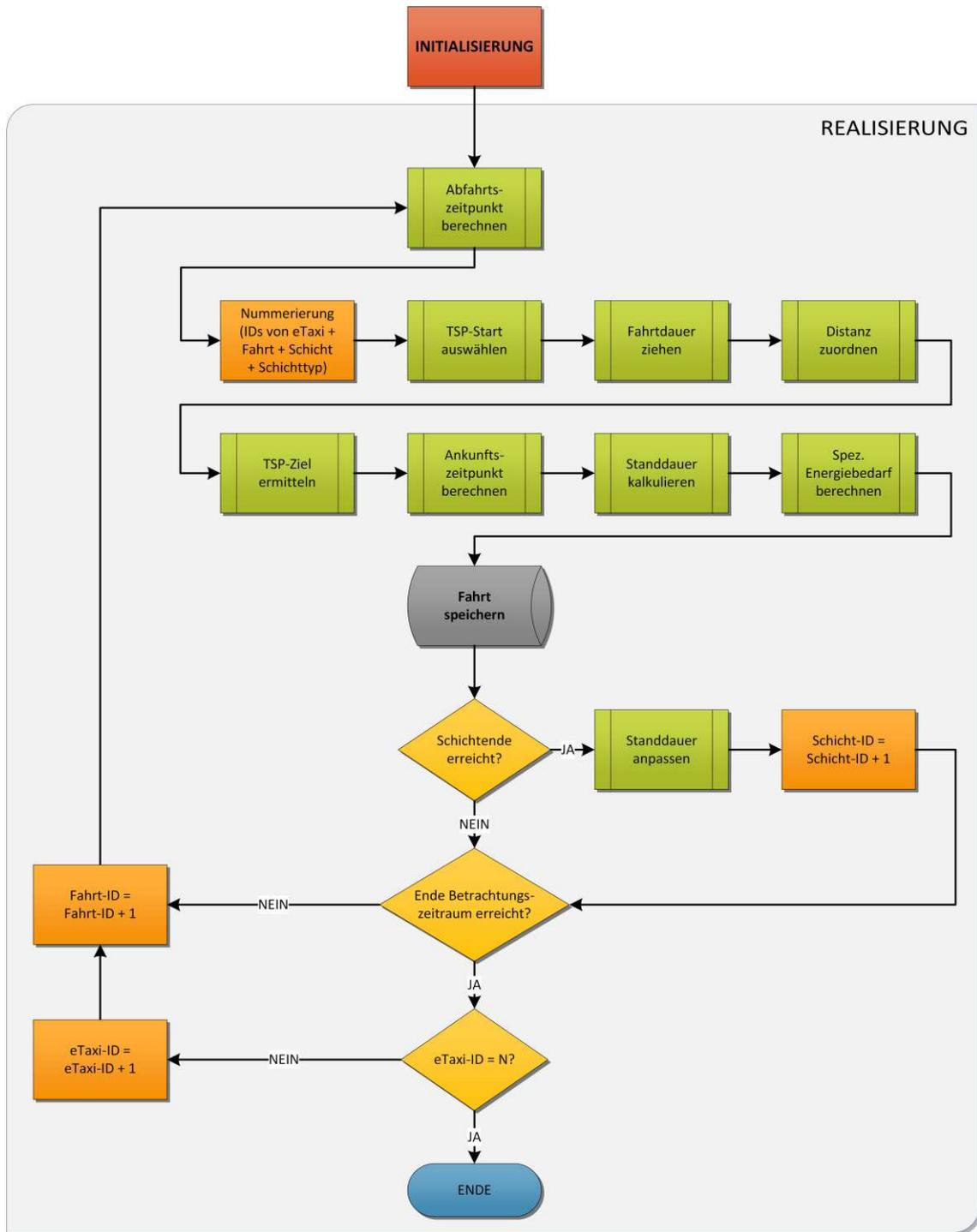


Abbildung 5-2: Programmablaufplan „Realisierungsphase“ zur Veranschaulichung der stochastischen Generierung der Mobilitätsdaten einer E-Taxiflotte (Fahren und Stehen)

## 5.1 Programmablauf und Funktionsweise

Wie in den beiden Abbildungen zuvor dargestellt, besteht die Mobilitätsdatengenerierung aus zwei Hauptteilen: Initialisierung und Realisierung. Die Initialisierung bezieht sich dabei einerseits auf allgemeine Einstellungen wie Betrachtungszeitraum und maximale Flottengröße. Andererseits werden bereits die Betriebsarten und -dauern für jedes E-Taxi festgelegt, um für die Simulation weitere relevante Abbruchkriterien (z. B. Zeitpunkt „Schichtende“) zu besitzen. Im Rahmen der Realisierung werden dann die konkreten Werte der diversen Zufallsvariablen (wie Fahrt- und Standdauer) mittels Zufallszahlgeneratoren für alle Taxifahrten ermittelt. Der Programmteil „Realisierung“ inkludiert zusätzlich die Überprüfung der entsprechenden Abbruchkriterien (z. B. „Sichtende ist erreicht“) sowie die Verwaltung der Iterationsschritte und Durchführung notwendiger Anpassungen für eine kausale Ereignisfolge (u. a. „Abfahrt stets vor Ankunft“).

### 5.1.1 Initialisierung

Wie schon angemerkt, muss in Rahmen der Initialisierung der Betrachtungszeitraum und die Flottengröße definiert werden. Da u. a. die Nachfrage und somit die Anzahl der Taxifahrten saisonalen Schwankungen unterliegen und diese entsprechend Berücksichtigung finden sollen, erscheint ein Kalenderjahr als sinnvoller Betrachtungszeitraum.

Bezüglich maximaler Flottengröße wird die aktuelle Anzahl an Taxis in Wien herangezogen und laut [49] mit 4.500 Fahrzeugen festgelegt (vergleiche Kapitel 2.4.2 „Taxikraftfahrzeuge“). In den beiden nächsten Programmschritten der Initialisierungsphase wird die Parametrisierung der Normalverteilungen für Schichtbeginn und -ende vorgenommen und die Dichtefunktionen der Mobilitätsmerkmale wie Stand- und Fahrtdauer geschätzt.

Im Kapitel 4.1 „Die Taxistandplätze – Ein Netzwerk von Warteschlangen“ wurde der Taxibetrieb als ein verbundenes System aus Warteschlangen mit entsprechenden Übergangswahrscheinlichkeiten dargestellt. Befindet sich ein Taxi in Betrieb, so wechseln sich Wartezeiten (an den TSP) und Taxifahrten kontinuierlich ab – beide Betriebszustände werden als Warteschlangen modelliert<sup>98</sup> (vergleiche dazu Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5). Endet die Taxischicht eines/einer TaxilenkerIn so wird in der Simulation das Netzwerk über eine „Senke“ verlassen und erst wieder beim Beginn der darauffolgenden Taxischicht über eine „Quelle“ betreten. Im vorliegenden Fall können jedoch

---

<sup>98</sup> Im nachfolgenden Kapitel 6.2 „Ladeinfrastrukturausbau“ wird noch ein weiterer Betriebszustand, der Ladevorgang, hinzugefügt. Dieser wird entsprechend des aktuellen Batterie-ladezustandes und der Ladeinfrastrukturverfügbarkeit eingenommen.

die Knoten „Senke“ und „Quelle“ zu einem kombiniert werden. Sie repräsentieren gemeinsam jenen Zustand, den die Fahrzeuge in der Simulation einnehmen, wenn sie gerade nicht als Taxi eingesetzt werden und sich somit außer Betrieb befinden<sup>99</sup>.

Die Übergänge zwischen den beiden Zuständen „Taxis in Betrieb“ und „Taxis außer Betrieb“ werden dabei mittels Normalverteilungen nachgebildet und die notwendige Parametrisierung im Rahmen der Initialisierung vorgenommen. Die diesbezüglich angewendete Methode ist in Kapitel 4.2 „Bestimmung der Betriebsarten und -zeiten“ ausführlich beschrieben und die zugehörigen Zahlenwerte der entsprechenden Verteilungsparameter (Erwartungswert und Standardabweichung) in Tabelle 4-2 aufgelistet. Diese sind für jede der drei definierten Betriebsarten (Tages-, Nacht- und Doppelschicht) sowie pro Wochentag (Mo bis So) separat angeführt.

Auf den nächsten Initialisierungsschritt „Schätzung der Dichtefunktionen“ wird an dieser Stelle ebenfalls nicht weiter eingegangen, da eine umfassende Beschreibung mit Kapitel 4.4 „Festlegung der Verteilungstypen und Parameterwerte“ gegeben ist. Es sei jedoch erwähnt, dass während der Initialisierungsphase die Schätzung aller relevanten Mobilitätsmerkmale vorgenommen wird. Dazu gehören Stand- und Fahrdauer ebenso sowie wie Distanz und Energiebedarf je Taxifahrt.

Abgesehen von den allgemeinen Festlegungen wird bereits im Rahmen der Initialisierung für jedes generierte E-Taxi die Betriebsart zufallsbasiert ausgewählt<sup>100</sup> und je Kalendertag bestimmt, ob das Taxi an diesem Tag überhaupt in Betrieb geht oder nicht (z. B. wegen Urlaub, Krankenstand oder einem Ruhetag). Ist ersteres der Fall wird zusätzlich ermittelt, wann die einzelnen Schichten am konkreten Kalendertag beginnen bzw. enden.

Die Betriebsarten werden entsprechend ihrer prozentualen Anteile ausgewählt (vergleiche Tabelle 4-2) und jedem E-Taxi zugeordnet. Dabei zeigt sich eine in etwa gleichmäßige Aufteilung der drei Betriebsarten auf die Fahrzeuge der gesamten E-Taxiflotte. Die exakten Werte sind in Tabelle 5-1 nachzulesen.

Tabelle 5-1 beinhaltet weiters den mittleren Anteil der betrieblichen Nutzungstage am Betrachtungszeitraum. In der vorliegenden Arbeit werden für ein konkretes Fahrzeug jene Tage als betriebliche Nutzungstage (kurz Nutzungstage) definiert, an denen das

---

<sup>99</sup> Das Taxi kann während dieser Zeit entweder an einem betrieblichen Abstellplatz geparkt sein (z. B. zum Laden der Batterie) und/oder auch u. a. für private Zwecke genutzt werden. Private Fahrten sind jedoch nicht Gegenstand der Betrachtungen und werden deshalb nicht in der Simulation berücksichtigt.

<sup>100</sup> Die Betriebsart eines E-Taxis bleibt über den gesamten Betrachtungszeitraum unverändert.

Fahrzeug auch als Taxi eingesetzt wird. Daraus resultierten im Mittel 250 Nutzungstage pro Jahr und E-Fahrzeug.

Tabelle 5-1: Ermittelte Anteile der Betriebsarten und Nutzungstage

Betriebsarten	Anteil der Betriebsarten an der gesamten E-Taxiflotte	Mittlerer Anteil der Kalendertage, an denen das E-Fahrzeug als Taxi genutzt wird	Anteil der Betriebsarten an der Gesamtheit aller Taxischichten
Tagesschicht	35,3 %	65,7 %	24,2 %
Nachtschicht	30,8 %	57,9 %	18,6 %
Doppelschicht	33,9 %	80,8 %	57,2 %

Für die Festlegung, ob ein Kalendertag auch ein Nutzungstag (Arbeitstag) ist, werden erneut die Anteile laut Tabelle 4-2 herangezogen und entsprechend den Maximalwerten normiert sowie zusätzlich mit „saisonalen Faktoren“ versehen. Beispielsweise sind im Sommer durchschnittlich weniger Taxis gleichzeitig in Betrieb als z. B. im Herbst.

Um dies zu berücksichtigen, werden die „saisonalen Faktoren“ aus den Wochenmaxima der gleichzeitig am Vermittlungssystem angemeldeten Funktaxis ermittelt (vergleiche Abbildung 3-11 aus Kapitel 3.2 „Kumulierte Flottendaten“). Auf Basis der Betriebsartenanteile und der „saisonalen Faktoren“ resultieren Schwellwerte je Betriebsart und Kalendertag. Danach wird mit Hilfe der MATLAB®-Funktion „rand“ (gleichverteilte Zufallszahl) für jedes der betrachteten E-Taxis pro Kalendertag eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 generiert, diese mit dem zugehörigen Schwellwert verglichen und so eine Entscheidung über die Festlegung der Nutzungstage getroffen. Die mittleren Anteile der sich daraus ergebenden Nutzungstage sind je Betriebsart in Tabelle 5-1 aufgelistet.

Werden ferner die beiden bisher beschriebenen Spalten aus Tabelle 5-1 mit der Anzahl der Taxischichten je Betriebsarten kombiniert, dann lässt sich daraus je Betriebsart der Anteil an der Gesamtheit aller Taxischichten ableiten. Da im Rahmen der Doppelschicht jeweils zwei Taxischichten durchgeführt werden und die Häufigkeit der Nutzungstage am größten ist, ergibt sich für die Betriebsart „Doppelschicht“ auch der höchste Anteil. Dieser beträgt knapp 57 %. Es fallen somit – verglichen zum 1-Schichtbetrieb – etwas mehr als die Hälfte aller Taxischichten auf den 2-Schichtbetrieb.

Abgesehen von der Berücksichtigung der Anzahl der Taxischichten wird im Programmteil „Initialisierung“ die zugehörige Ermittlung von Beginn und Ende der Taxischichten vorgenommen. Diese Parameter werden (wie auch die maximale Flottengröße und der

Betrachtungszeitraum) nachfolgen als Schwellwerte für bestimmte Abbruchbedingungen der durchzuführenden Iterationen verwendet und geben die benötigten Zeitpunkte vor, an denen ein E-Taxi das modellierte „Netzwerk von Warteschlangen“ über die Quelle/Senke betritt bzw. verlässt.

Die Ermittlung von Beginn und Ende der Schichten geschieht schrittweise für jedes einzelne E-Taxi. Dabei werden sukzessive je Nutzungstag die Zeitpunkte von Beginn und Ende aller an diesem Tag durchzuführenden Schichten berechnet und als Uhrzeit gespeichert (z. B. 18:32 Uhr). Dies geschieht unter Zuhilfenahme der MATLAB®-Funktion „normrnd“ (normalverteilte Zufallszahl) und der im Kapitel 4.2 „Definition der Betriebsarten und -zeiten“ festgelegten Parameter der Normalverteilungen<sup>101</sup>. Da sich die Dichtefunktionen von Beginn und Ende der Schichten geringfügig überlappen, muss zur Gewährleistung der Kausalität darauf geachtet werden, dass der Beginn der nachfolgenden Taxischicht nie vor dem Ende der aktuellen Taxischicht stattfindet. Abweichende Zufallswerte werden deshalb neuerlich kalkuliert, bis die Bedingung erfüllt ist.

Eine weitere Einschränkung betrifft die Dauer der Schichten. Die Schichtdauer bildet sich dabei aus der Differenz der ermittelten Zeitpunkte für Ende und Beginn der zugrundeliegenden Taxischicht. Da Beginn und Ende normalverteilt sind, weist die Schichtdauer ebenfalls eine Normalverteilung auf (analog zur Faltung). Generell stellen Normalverteilungen um ihren Erwartungswert symmetrische Wahrscheinlichkeitsverteilungen dar [70]. Wird davon ausgegangen, dass die Normalverteilungen von Beginn und Ende unabhängig sind, dann ergibt sich für die Schichtdauer eine Standardabweichung entsprechend nachstehender Formel [70]:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (5.1)$$

Zum Beispiel ergäbe sich bei der Annahme von gleichen Standardabweichungen für Beginn und Ende ( $\sigma_1 = \sigma_2 = 2$ ) für die Schichtdauer eine Standardabweichung von  $\sigma = 2,83$  (in Stunden). Also eine deutliche „Verbreiterung“ im Vergleich zu den Verteilungen von Beginn und Ende. Dies erscheint – genauso wie eine Annahme der Unabhängigkeit von Schichtbeginn und Schichtende – als wenig plausibel. Deshalb wird bei der Realisierung der Zufallswerte das Vorzeichen der Abweichung vom Erwartungswert berücksichtigt und nur jene Wertepaare von Beginn und Ende kombiniert, die dasselbe Vorzeichen besitzen. In anderen Worten: Weisen z. B. Beginn und Ende der Schichten

---

<sup>101</sup> Jede der drei unterschiedlichen Betriebsarten besitzt pro Wochentag (Montag bis Sonntag) eigens parametrisierte Erwartungswerte und Standardabweichungen.

die Erwartungswerte  $\mu_1 = 6$  sowie  $\mu_2 = 18$  auf und wird im Rahmen der Realisierung ein Wert vor 06:00 Uhr für den Beginn ermittelt, dann endet die zugehörige Taxischicht in konformer Weise vor 18:00 Uhr.

Aus dieser Einschränkung resultiert für das Beispiel mit  $\sigma_1 = \sigma_2 = 2$  eine entsprechend „schmalere“ Verteilung der Schichtdauer mit einem  $\sigma \approx 1,70$ . Darüber hinaus bleiben die Verteilungsformen für Beginn und Ende davon unbeeinflusst. Analoges kann für die Standardabweichungen aus Tabelle 4-2 (siehe Kapitel 4.2 „Bestimmung der Betriebsarten und -zeiten“) abgeleitet werden.

Die beiden Betriebsarten „Tagesschicht“ und „Nachtschicht“ bestehen jeweils aus einer einzelnen Taxischicht pro Kalendertag und beinhalten somit keinen FahrerInnen-Wechsel. Die Betriebsart „Doppelschicht“ ist in der vorliegenden Arbeit hingegen als 2-Schichtsystem ausgelegt (siehe Kapitel 4.2). Hierbei repräsentieren Beginn und Ende die zeitlichen Grenzen dieser Betriebsart. Der vorgesehene Wechsel des Fahrers bzw. der Fahrerin wird vereinfacht auf den zeitlichen Mittelwert gelegt. Startet die Doppelschicht z. B. um 07:10 Uhr und endet um 05:20 Uhr am Folgetag, dann wird nach der gewählten Vorgangsweise der Wechsel mit 18:15 Uhr angenommen<sup>102</sup>.

Die Verteilung der Zeitpunkte des FahrerInnen-Wechsels stellt somit eine Kombination aus den Normalverteilungen von Beginn und Ende der Betriebsart „Doppelschicht“ dar und besitzt eine Mittelung der Erwartungswerte sowie eine entsprechende Verringerung der Standardabweichung analog zur Schichtdauer.

Entsprechende Abbildungen und Quantifizierungen der resultierenden Verteilungen von Beginn und Ende der Taxischichten (je Betriebsart) sowie jene der zugehörigen Schichtdauer werden im Kapitel 5.2 „Validierung und Visualisierung“ nachgeholt, da die Berechnungen im Rahmen der Simulation (Realisierungsphase) stellenweise noch geringfügige Veränderungen/Verschiebungen verursachen.

### 5.1.2 Realisierung

Wie zuvor beschrieben, werden in der Initialisierungsphase bereits die Zeitpunkte von Beginn und Ende aller Taxischichten mittels Zufallsgenerator erzeugt. Gemeinsam mit der Festlegung des Betrachtungszeitraums auf ein Kalenderjahr und der maximalen Flottengröße auf 4.500 E-Taxis ist damit der Rahmen für die Generierung der Mobilitätsdaten aufgespannt. Im nächsten Schritt werden die einzelnen Taxischichten bezüglich

---

<sup>102</sup> Im Rahmen der Realisierung kann es u. a. aufgrund von eingefügten Ladevorgängen hier nachträglich noch zu zeitlichen Verschiebungen kommen.

„Stehen“ (u. a. Standdauer am TSP) und „Fahren“ (z. B. Distanz der Taxifahrt) zeitlich, räumlich und energetisch mit Daten befüllt. Dies geschieht ereignisorientiert<sup>103</sup>, sukzessive und aufeinander aufbauend. Folgende Merkmale werden dabei wiederholend berechnet bis für jedes zu modellierende E-Taxi das gewählte Simulationsende (Ende des Betrachtungszeitraums) erreicht ist:

- Zeitpunkt der Abfahrt (Start der Taxifahrt, zeitlich)
- $TSP_{\text{Start}}$  (Start der Taxifahrt, räumlich)
- Fahrdauer der Taxifahrt in Minuten (Besetzt- und Leerfahrt, zeitlich)
- Distanz der Taxifahrt in km (Besetzt- und Leerfahrt, räumlich)
- Energiebedarf der Taxifahrt in kWh (inkl. Nebenverbraucher, energetisch)
- $TSP_{\text{Ziel}}$  (Ende der Taxifahrt, räumlich)
- Zeitpunkt der Ankunft (Ende der Taxifahrt, zeitlich)
- Standdauer in Minuten (Wartezeit zwischen zwei Taxifahrten, zeitlich)

Da es sich hier um ein stochastisches, auf Zufallszahlen beruhendes Modell handelt, werden die Realisierungen der einzelnen Merkmale mittels Zufallszahlengeneratoren<sup>104</sup> entsprechend den zugrunde gelegten Verteilungen und Gewichtungen durchgeführt (siehe Kapitel 4.4 „Festlegung der Verteilungstypen und Parameterwerte“). Nachfolgend werden die im Rahmen der Simulation vorgenommenen Realisierungen der einzelnen Merkmale detailliert erläutert und die notwendigen Vereinfachungen und Einschränkungen angeführt.

Des Weiteren werden im Kapitel 5.2 „Validierung und Visualisierung“ die resultierenden Verteilungen der Merkmale mit jenen der Datengrundlage verglichen. Ladevorgänge werden dabei jedoch noch nicht betrachtet. Die Definition des Ladeinfrastrukturausbaus und die Festlegung der Ladevorgänge (wann, wie und wo) erfolgen erst anschließend im Kapitel 6 „Technische Machbarkeitsanalyse“.

### **Schichtbeginn**

Allgemein ist der herangezogene Betrachtungszeitraum über ein Anfangsdatum plus Uhrzeit (z. B. So, 01.01.2017, 00:00 Uhr) und eine Betrachtungsdauer (z. B. 365 Tage) definiert. Im Rahmen der Simulation stellt der Beginn der allerersten Taxischicht somit

---

<sup>103</sup> Dies bedeutet, dass der Simulationsfortschritt nicht durch diskrete Zeitpunkte, sondern durch Ereignisse vorgegeben ist.

<sup>104</sup> Die unter MATLAB® verwendeten Zufallszahlengeneratoren sind deterministisch und erzeugen sogenannte „Pseudozufallszahlen“. Diese Eigenschaft wird bei der Simulation entsprechend berücksichtigt. Sie ermöglicht bei Bedarf eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. [76]

das erste zu berücksichtigende Ereignis je E-Taxis dar. In Bezug auf das zugrundeliegende Modell kann dieser Zeitpunkt ebenfalls als der erste Eintritt in das „Netzwerk von Warteschlangen“ angesehen werden (Übergang „Quelle zu TSP“, vergleiche Kapitel 4.1 „Die Taxistandplätze – Ein Netzwerk von Warteschlangen“). Ausgehend vom betrieblichen Abstellplatz wird vom Taxilenker bzw. von der Taxilenkerin der erste TSP angefahren. Dabei erfolgt die Auswahl des  $TSP_{\text{Start}}$  sowie die Wartezeit bis zur ersten Taxifahrt auf Basis der zugrundeliegenden Zufallszahlen.

Bekommt der/die LenkerIn einen Fahrgast vermittelt bzw. steigt dieser am TSP in das E-Taxi ein, dann Beginn die erste Taxifahrt der Taxischicht (exkl. der Fahrt zum ersten TSP). Wie bereits definiert, repräsentiert die Taxifahrt in der vorliegenden Arbeit jenen Zeitraum vom Verlassen des aktuellen TSP (Zeitpunkt der Abfahrt) bis zum Einreihen am nachfolgenden TSP (Zeitpunkt der Ankunft) und besteht aus Besetzt- und/oder Leerfahrten. Die Taxifahrt besitzt dabei zeitliche, räumliche und energetische Merkmale (Dauer, Distanz und Energiebedarf). Auf die zugehörige Methode zur Realisierung der einzelnen Merkmale wird nun näher eingegangen.

### **Dauer und Distanz der Taxifahrt**

Ausgehend vom  $TSP_{\text{Start}}$  und vom Zeitpunkt der Abfahrt wird als erstes Attribut die zur Taxifahrt zugehörige Fahrtdauer ermittelt. Entsprechend der Ausführungen in Kapitel 4.4 „Festlegung der Verteilungstypen und Parameterwerte“ sind die Fahrtdauern log-logistisch verteilt. Da die Länge der Fahrtdauer von der Tageszeit abhängt, variieren die beiden Verteilungsparameter (Skalen- und Formparameter) mit der Uhrzeit. Je nach Wochentag und Stunde des Beginns der Taxifahrt werden die unterschiedlichen Parameterwerte herangezogen und mittels der MATLAB®-Funktion „random“<sup>105</sup> die benötigten Zufallswerte generiert. Die Berechnung der Fahrtdauer erfolgt dabei in Minuten. Um die möglichen Ausprägungen der Fahrtdauer auf ein realistisches Niveau einzuschränken, werden Werte größer als das Maximum der Originaldaten (720 Minuten) verworfen.

Als nächstes Merkmal wird die Distanz in km berechnet. Da Distanz und Dauer einer Taxifahrt miteinander korrelieren, wird die Distanz in Abhängigkeit der zuvor kalkulierten

---

<sup>105</sup> Die MATLAB®-Funktion „random“ stellt eine auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen basierte Zufallszahl dar [25].

Fahrdauer ermittelt. Die zugehörige Methode ist in Kapitel 4.4.2 detailliert erörtert. Deshalb werden an dieser Stelle lediglich die zentralen Aspekte wiederholt.

Es zeigt sich, dass die Distanzen der Taxifahrten aus den untersuchten GPS-basierten Fahrzeugdaten einer Burr-Verteilung folgen und die zugehörige Skalen- und Formparameter von der Fahrdauer abhängen. Der Zusammenhang zwischen den drei Parameterwerten der Burr-Verteilung und der ermittelten Größe der Fahrdauer wird als Polynomfunktionen für unterschiedliche Fahrdauer-Intervalle<sup>106</sup> dargestellt. Die Generierung des Distanzwertes erfolgt somit in drei Schritten:

- 1) Bestimmung des Fahrdauer-Intervalls
- 2) Auswahl der zugehörigen Polynomfunktionen
- 3) Realisierung eines Zufallswertes mittels MATLAB®-Funktion „random“

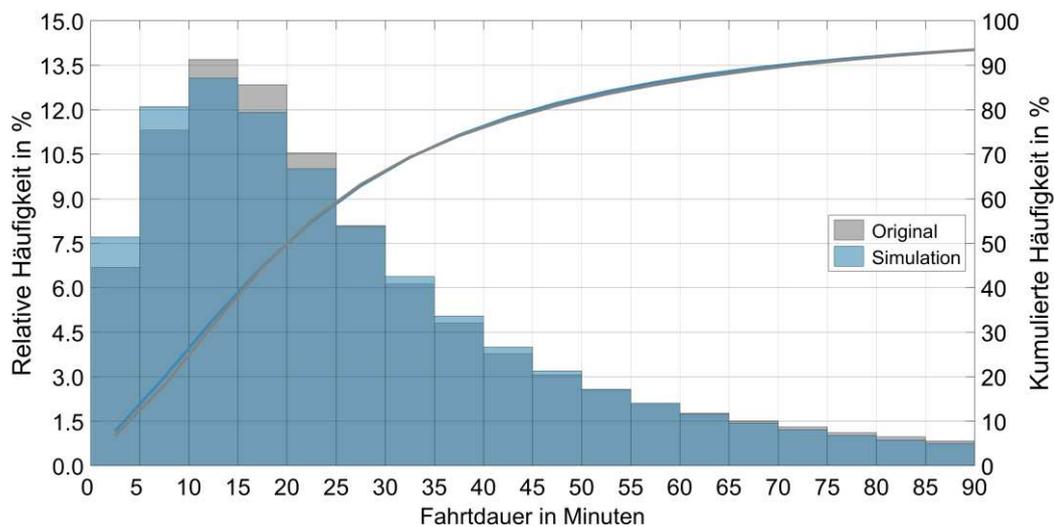


Abbildung 5-3: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen des Merkmals „Fahrdauer“; Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (GPS-basierte Fahrzeugdaten)

Analog zur Ermittlung der Fahrdauer werden die Werte der Distanzen aus Gründen der Plausibilität begrenzt. Die Berechnung wird entsprechend solange wiederholt, bis der

<sup>106</sup> Drei Intervalle sind hierfür definiert: 1) Fahrdauer < 60 Minuten  
2) 60 Minuten ≤ Fahrdauer < 120 Minuten  
3) Fahrdauer ≥ 120 Min.

Distanzwert kleiner als 500 km<sup>107</sup> beträgt und die Durchschnittsgeschwindigkeit während der Taxifahrt zwischen 5 und 70 km/h liegt (vergleiche Kapitel 3.1.1 und 4.4.3).

Bei jeder Erstellung einer neuen Taxifahrt werden die beschriebenen Vorgänge wiederholt und ein entsprechender Zufallswert für die Fahrdauer und die Distanz ermittelt. Sind zum Simulationsende alle Taxifahrten der gesamten E-Taxiflotte erzeugt, so können die Verteilungen der realisierten Zufallswerte und jene der vorhandenen Datengrundlage verglichen werden.

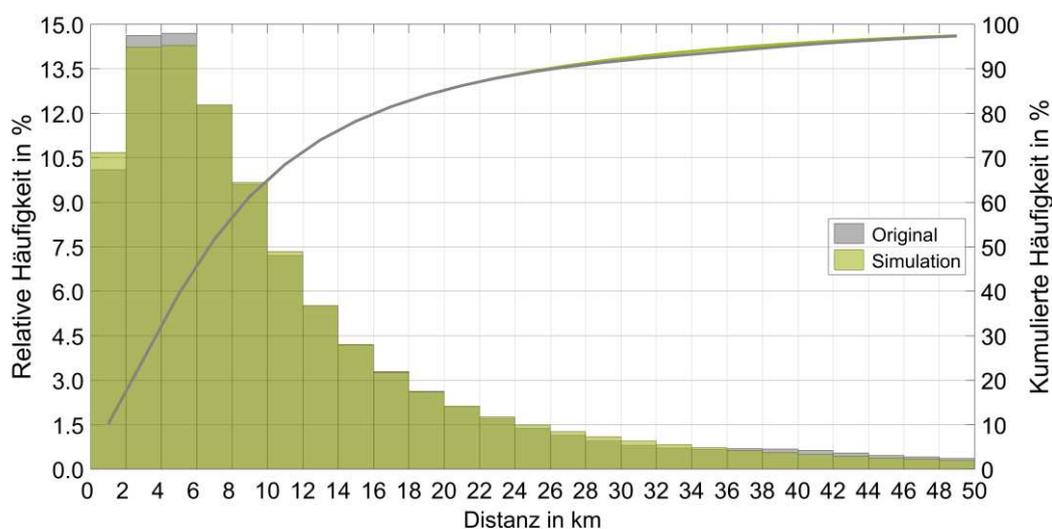


Abbildung 5-4: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen des Merkmals „Distanz“; Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (GPS-basierte Fahrzeugdaten)

Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 stellen die relativen Häufigkeiten der Merkmale „Fahrdauer“ und „Distanz“ entsprechend aller generierten Werte der gesamten E-Taxiflotte (Simulation) und den enthaltenen Werten der Datengrundlage „GPS-basierte Fahrzeugdaten“ (Original) gegenüber. Aufgrund der modellbedingten Ungenauigkeiten und Einschränkungen ergeben sich bezüglich Form und Kennwerte der Verteilungen gewisse Abweichungen.

Die beiden arithmetischen Mittelwerte (Simulation vs. Original) unterscheiden sich z. B. für das Merkmal „Fahrdauer“ um 1,29 Minuten. Dies entspricht einer mittleren Differenz

<sup>107</sup> Eine stärkere Begrenzung der Fahrdistanzen (z. B. aufgrund der realen Reichweite der E-Fahrzeuge) wird hier nicht vorgenommen. Eine Berücksichtigung von unterschiedlichen Batteriekapazitäten und LIS-Ausbauszenarien erfolgt in der nachfolgenden Machbarkeitsanalyse.

von 3,5 %. Der sich aus der Simulation ergebende arithmetische Mittelwert beträgt dabei 37,6 Minuten. Die stochastisch generierten Fahrdauern werden somit im Durchschnitt geringfügig überschätzt.

Für das Merkmal „Distanz“ zeigen sich ebenfalls leichte Abweichungen. Der Unterschied der arithmetischen Mittelwerte fällt hierbei jedoch geringer aus (absolut: 29 Meter, relativ: 0,23 %). Im Rahmen der Simulation ergibt sich ein Durchschnittswert von 12,8 km je Taxifahrt<sup>108</sup>.

### **Energiebedarf der Taxifahrt**

In der vorliegenden Arbeit wird der Energiebedarf der E-Taxis in zwei Kategorien unterteilt: „Antrieb“ und „Nebenverbraucher“. Dabei wird einerseits die notwendige mechanische Antriebsenergie je Taxifahrt auf Basis der GPS-basierten Fahrzeugdaten (siehe Kapitel 3.1 „GPS-basierte Fahrzeugdaten“) ermittelt und andererseits der elektrische Energiebedarf der Nebenverbraucher (wie Heizung, Klimaanlage, Lüftung, Servolenkung, Scheinwerfer und Radio). Dieser wird laut [78] vereinfacht mit einem konstanten mittleren Leistungswert von 1 kW<sup>109</sup> angenommen.

Dies bedeutet, dass ein E-Taxi trotz abgeschaltetem Motor bei einer Standdauer am TSP von beispielsweise 30 Minuten u. a. aufgrund der aktivierten Klimaanlage einen durchschnittlichen Energiebedarf von 0,5 kWh generiert. Während der Taxifahrt wird zusätzlich zum Energiebedarf des Antriebs (auf Basis der GPS-basierten Fahrzeugdaten) ebenfalls der konstant angenommene Energiebedarf der Nebenverbraucher von umgerechnet 16,7 Wh pro Minute addiert.

In der Realisierung der Energiewerte wird somit zuerst der Energiebedarf des Antriebs auf Basis der Fahrdistanz und danach der Energiebedarf der Nebenverbraucher in Bezug auf die Fahrdauer ermittelt. Wie in Kapitel 4.4.4 dargestellt, kann der Verlauf der relativen Häufigkeit des spez. Energiebedarfs je Taxifahrt (in kWh/100 km, nur Antrieb, exkl. Nebenverbraucher) als logarithmische Normalverteilung interpretiert werden. Dabei hängen die beiden Verteilungsparameter  $\mu$  und  $\sigma$  deutlich von der zurückgelegten Distanz ab. Analog zur Generierung der Distanzwerte wird diese Abhängigkeit ebenfalls

---

<sup>108</sup> Laut [44] wird im Rahmen einer durchschnittlichen Besetztfahrt in Wien mit dem Taxi eine Distanz von ca. 5,4 km zurückgelegt. Zusammen mit einem mittleren Leerkilometeranteil von 57,5 % ergibt sich daraus eine Distanz je Taxifahrt von 12,7 km.

<sup>109</sup> Hierbei wird der Einsatz von Wärmepumpen und Sitzheizungen vorausgesetzt. Ohne Vorconditionierung des Fahrgastraumes ergeben sich bei Betriebsbeginn Leistungswerte von einigen kW. Durchschnittlich zeigt sich ein mittlerer Leistungsbedarf von einem kW.

mittels Polynomfunktionen berücksichtigt und hierfür zwischen vier Distanz-Intervallen unterschieden<sup>110</sup>.

Nach Auswahl des entsprechenden Intervalls und Ermittlung der zugehörigen Verteilungsparameterwerte wird der spez. Energiebedarf auf Basis der MATLAB®-Funktion „random“ berechnet und mit dem vorgegebenen Distanzwert multipliziert. Aus Plausibilitätsgründen wird der Vorgang wiederholt, sofern sich ein resultierender Energiebedarf (exkl. Nebenverbraucher) kleiner null bzw. größer 150 kWh<sup>111</sup> ergibt.

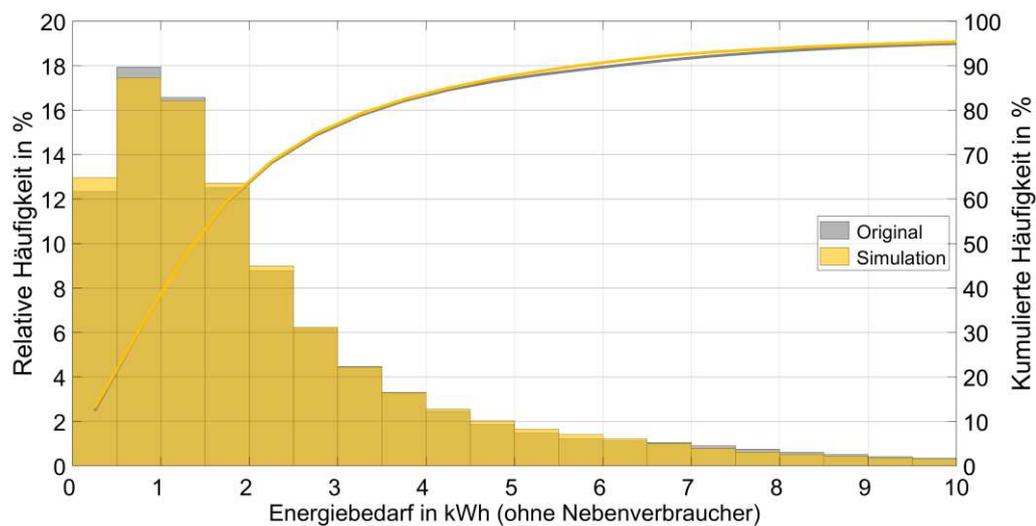


Abbildung 5-5: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen des Merkmals „Energiebedarf Antrieb“ (ohne Nebenverbraucher); Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (GPS-basierte Fahrzeugdaten)

Abbildung 5-5 stellt die relativen Häufigkeiten für das Merkmal „Energiebedarf des Antriebs“ (ohne Nebenverbraucher) von Simulation und Original gegenüber. Wie bereits erläutert, kommt es modellbedingt zu Abweichungen bezüglich Form und Kennwerte der

<sup>110</sup> Vier Distanz-Intervalle sind hier definiert:

- 1) Distanz < 3 km
- 2)  $3 \text{ km} \leq \text{Distanz} < 30 \text{ km}$
- 3)  $30 \text{ km} \leq \text{Distanz} < 50 \text{ km}$
- 4) Distanz  $\geq 50 \text{ km}$

<sup>111</sup> Dieser Maximalwert entspricht der Kombination aus einem spezifischen Energiebedarf von 30 kWh/100 km und einer Distanz von 500 km.

Verteilungen. Dabei liegt der arithmetische Mittelwert der generierten Energiebedarfsmengen mit 2,5 kWh um etwa 5,1 Wattstunden je Taxifahrt unter dem Original. Dies entspricht einer relativen Abweichung von minus 0,2 %.

Zum Energiebedarf des „Antriebs“ wird – wie bereits beschrieben – noch zusätzlich die berechnete Energiemenge der Nebenverbraucher summiert. Dieser Gesamtbetrag wird für die Berechnung des Batterieladezustandes der E-Taxis im Rahmen des Kapitels 6 „Technische Machbarkeitsanalyse“ herangezogen. Eine Darstellung der Verteilung des gesamten Energiebedarfs je Taxifahrt („Antrieb“ plus „Nebenverbraucher“) erfolgt unter Kapitel 6.3 „Detaillierte Ergebnisse zur Machbarkeitsanalyse“.

### **Taxistandplatzauswahl**

Sofern die aktuelle Taxischicht noch nicht vorüber ist, endet jede Taxifahrt wieder an einem TSP. Ausgehend vom  $TSP_{\text{Start}}$ , an dem die gegenwärtige Taxifahrt beginnt, wird die Übergangswahrscheinlichkeit zu einem konkreten  $TSP_{\text{Ziel}}$  auf Basis der relativen Anfahrtshäufigkeiten gebildet. Diese sind wiederum aus den historischen GPS-basierten Fahrzeugdaten zu extrahieren (siehe Kapitel 4.1 „Die Taxistandplätze – Ein Netzwerk von Warteschlangen“).

Da Angebot und Nachfrage mit der Uhrzeit schwanken (siehe Kapitel 3.2 „GPS-basierte Fahrzeugdaten“), weisen die Übergangswahrscheinlichkeiten ebenfalls zeitliche Abhängigkeiten auf. Aus diesem Grund wird für jedes Stundenintervall (z. B.  $6 \text{ Uhr} < t \leq 7 \text{ Uhr}$ ) sowie für jeden Wochentag (Montag bis Sonntag) die entsprechende Übergangsmatrix separat kalkuliert. Daraus resultieren zusammen  $24 \times 7$  Matrizen.

Mit dem Wissen über die bereits festgelegten Werte von  $TSP_{\text{Start}}$ , dem Zeitpunkt der Abfahrt und dem zugehörigen Wochentag<sup>112</sup> kann die passende Übergangsmatrix sowie daraus die Zeile mit den entsprechenden Übergangswahrscheinlichkeiten für den aktuellen  $TSP_{\text{Start}}$  ausgewählt und damit zufallsbasiert ein  $TSP_{\text{Ziel}}$  ermittelt werden. Abbildung 5-6 stellt beispielhaft die relativen Anfahrtshäufigkeiten (Übergangswahrscheinlichkeiten) und die zugehörige Summenhäufigkeit der TSP im 1. Bezirk dar. In diesem

---

<sup>112</sup> Die Simulationszeit wird laufend in Bezug auf den Anfang des Betrachtungszeitraumes (Datum und Zeitpunkt) kalkuliert, wodurch eine Bestimmung des aktuellen Wochentages möglich ist.

Fallbeispiel werden die TSP mit der Kennnummer 101 bis 136<sup>113</sup> berücksichtigt und die restlichen TSP anderer Bezirke zunächst vernachlässigt.

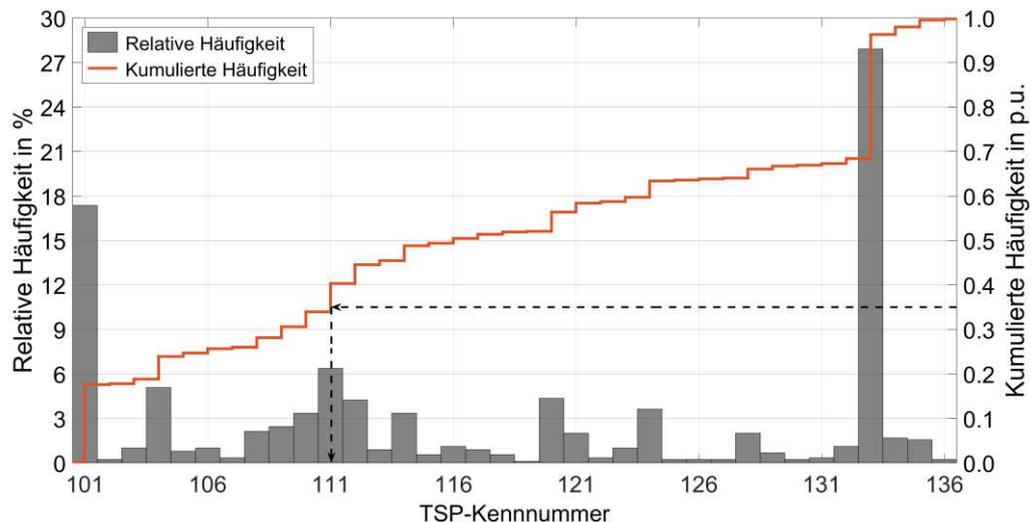


Abbildung 5-6: Verteilung der Anfahrtshäufigkeit der TSP im 1. Bezirk, ausgehend vom Taxistandplatz mit der TSP-Kennnummer 101 (exkl. der TSP anderer Bezirke)

Wie sich aus Abbildung 5-6 erkennen lässt, folgt die Verteilung der Anfahrtshäufigkeiten keiner „Standardverteilung“ (wie z. B. Exponential-, Gamma- oder Normalverteilung), sondern verläuft eher willkürlich, u. a. abhängig von der Wahl der TSP-Kennnummer. Um trotzdem die empirisch erhobene Verteilung der Übergangswahrscheinlichkeiten bei der stochastischen Ermittlung eines konkreten  $TSP_{Ziel}$  berücksichtigen zu können, wird in der vorliegenden Arbeit ein Zufallsgenerator auf Basis der „Inversionsmethode“ implementiert. Dabei beruht die „Inversionsmethode“ auf einer überaus einfachen Idee. Es soll eine beliebige Verteilungsfunktion  $F$  – wie jene aus Abbildung 5-6 – mit Hilfe einer gleichverteilten Zufallsvariable  $U$  dargestellt werden.

Ist es möglich, die notwendige (verallgemeinerte) Inverse  $F^{-1}$  der Verteilungsfunktion  $F$  zu ermitteln und darüber hinaus den Wert von  $F^{-1}(r)$  für alle  $r \in (0,1)$  zu bestimmen, dann ist das Problem bereits gelöst und es kann eine beliebige Verteilung auf  $\mathbb{R}$  simuliert werden. [79]

<sup>113</sup> Allgemein geben Zehner- und Einerstelle die Nummerierung der TSP innerhalb eines Bezirkes an. Die weiteren Vorkommastellen kennzeichnen den Bezirk selbst. Der TSP mit der Kennnummer 101 befindet sich z. B. in der Rotenturmstraße 2 (1010 Wien) entlang des Erzbischöflichen Palais. [51]

Um jedoch den mathematischen Ansatz der „Inversionsmethode“ besser zu verstehen, werden im Folgenden die wesentlichen Definitionen und Sätze in Bezug auf das zugrundeliegende Verfahren aus [79] zusammenfassend beschrieben. Für eine detaillierte Beweisführung wird jedoch an dieser Stelle direkt auf [79] verwiesen. Informationen zur Realisierung in MATLAB® können darüber hinaus in [80] nachgeschlagen werden.

Ganz allgemein wird eine Funktion  $F: \mathbb{R} \rightarrow [0,1]$  als Verteilungsfunktion bezeichnet, sofern  $t \mapsto F(t)$  monoton steigend und rechtsseitig stetig ist sowie das Grenzwertverhalten

$$\lim_{t \rightarrow -\infty} F(x) = 0 \quad \text{und} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} F(x) = 1 \quad (5.2)$$

besitzt. Wird die Verteilungsfunktion  $F$  zudem noch erweitert und als Funktion auf  $\bar{\mathbb{R}}: \mathbb{R} \cup \{-\infty, +\infty\}$  angesehen<sup>114</sup>, dann kann die Verteilungsfunktion  $F$  angeschrieben werden als

$$F: \bar{\mathbb{R}} \rightarrow [0,1] \quad \text{mit} \quad F(-\infty) := 0, \quad F(+\infty) := 1. \quad (5.3)$$

Dieser Definition genügt die in Abbildung 5-6 dargestellte relative Summenhäufigkeit. Zur Realisierung der „Inversionsmethode“ ist jedoch die zur Summenhäufigkeit gehörende Inverse erforderlich, die es im nächsten Schritt zu bestimmen gilt. Dabei kann die verallgemeinerte Inverse  $F^{-1}: [0,1] \rightarrow \bar{\mathbb{R}}$  aufgrund der vorgenommenen Erweiterung wie folgt dargestellt werden<sup>115</sup>:

$$F^{-1}(r) := \inf \{t \in \bar{\mathbb{R}} \mid F(t) \geq r\}, \quad r \in [0,1] \quad \text{mit} \quad \inf \emptyset = +\infty \quad (5.4)$$

Ist  $F^{-1}$  also die verallgemeinerte Verteilungsfunktion von  $F$ , dann gilt darüber hinaus:

- a)  $F^{-1}(r) := \min \{t \in \bar{\mathbb{R}} \mid F(t) \geq r\}, \quad r \in [0,1]$
- b)  $F^{-1}(r) \leq t \Leftrightarrow F(t) \geq r$  für alle  $r \in [0,1]$  und  $t \in \bar{\mathbb{R}}$ .

<sup>114</sup>  $\bar{\mathbb{R}}$  bezeichnet die affine Erweiterung der reellen Zahlen um zwei vorzeichenbehaftete uneigentliche Punkte.

<sup>115</sup> Im Gegensatz zur inversen Funktion (Umkehrabbildung) kann jeder Verteilungsfunktion eine verallgemeinerte inverse Verteilungsfunktion zugeordnet werden. Nur unter gewissen Bedingungen sind diese ident.

- c) Ist  $F$  streng monoton steigend und stetig, dann ist  $F^{-1}$  die inverse Funktion von  $F$ . Allgemein gilt lediglich  $F^{-1}(F(t)) \leq t$  und  $F(F^{-1}(r)) \geq r$ .
- d)  $r \mapsto F^{-1}(r)$  ist monoton steigend und von links stetig.

Lassen sich nun die Wert von  $F^{-1}(r)$  für alle  $r \in (0,1)$  auf dem Rechner bestimmen, dann kann allgemein mit Hilfe einer auf dem Intervall  $[0,1]$  gleichverteilten Zufallsvariable  $U$  die reelle Zufallsvariable  $Y := F^{-1}(U)$  ermittelt werden, die der Verteilungsfunktion  $F$  genügt. Es besteht allgemein der Zusammenhang:

$$P(Y \leq t) = F(t), \quad t \in \mathbb{R} \quad (5.5)$$

Für diskrete Verteilungsfunktionen, wie sie in der vorliegenden Arbeit gegeben sind, gilt insbesondere

$$F(m) = \sum_{i=1}^m p_i, \quad m \in \mathbb{N}. \quad (5.6)$$

wobei die Verteilung der zugrundeliegenden Zufallsvariablen  $X$  durch den Vektor der Wahrscheinlichkeitsfunktion  $(p_1, \dots, p_K)$  mit  $p_i := P(X = i) > 0$ ,  $1 \leq i \leq K$  bestimmt ist. Für  $r \in (0,1]$  folgt daher:

$$\begin{aligned} F^{-1}(r) &= \min \left\{ m \in \{1, \dots, K\} \mid \sum_{i=1}^m p_i \geq r \right\} \\ &= \text{dasjenige } m \in \{1, \dots, K\} \text{ mit } \sum_{i=1}^{m-1} p_i < r \leq \sum_{i=1}^m p_i \end{aligned} \quad (5.7)$$

Eine Implementierung von  $F^{-1}$  besteht nun darin, den passenden Wert in der Liste der  $\sum_{i=1}^m p_i$ ,  $m = 1, \dots, K$  zu finden.

Zur Ermittlung des  $TSP_{\text{Ziel}}$  ist somit als erstes die diskrete Verteilungsfunktion  $F(m)$  durch Berechnung der relativen Summenhäufigkeit  $\sum_{i=1}^m p_i$ ,  $m = 1, \dots, K$  zu bilden. In Bezug auf die betrachteten Taxistandplätze sind die Elemente  $p_i$  durch die relativen Anfahrtsfrequenzen gegeben. Im nächsten Schritt wird mittels der MATLAB®-Funktion „rand“ eine gleichverteilte Zufallszahl  $r$  aus dem Intervall  $[0,1]$  erzeugt und schlussendlich jener Taxistandplatz als neuer  $TSP_{\text{Ziel}}$  ausgewählt, dessen zugehörige Summenhäufigkeit den kleinsten Wert größer gleich  $r$  besitzt. Die Pfeile in Abbildung 5-6 verdeutlichen nochmals grafisch die Vorgehensweise der „Inversionsmethode“ für das Beispiel  $r = 0,35$ . Für  $F^{-1}(0,35)$  ergibt sich damit als neues Ziel der TSP mit Kennnummer 111.

Da für eine eindeutige Zuordnung  $p_i > 0$  gefordert ist, müssen all jene TSP gesondert behandelt werden, die eine zugehörige Anfahrtsfrequenz von null besitzen. Dies bedeutet lediglich, dass nicht in jedem der  $24 \times 7$  Stundenintervalle alle möglichen Kombinationen von  $TSP_{\text{Start}}$  und  $TSP_{\text{Ziel}}$  enthalten sind. Um in der Simulation jedoch die Werte

$p_i = 0$  auszuschließen zu können, werden diese mit einem Tausendstel der kleinsten von null verschiedenen Übergangswahrscheinlichkeit ersetzt und das neue Maximum der Summenhäufigkeit auf Eins normiert. Damit wird einerseits der Forderung  $p_i > 0$  Genüge getan und andererseits die grundsätzliche Möglichkeit implementiert, alle TSP anfahren zu können.

Eine Sonderstellung bei der Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten besitzt darüber hinaus der Fall „Schichtbeginn“ (Übergang „Quelle zu TSP“), da hier nicht von einem konkreten TSP als Startpunkt ausgegangen werden kann. Es werden somit vereinfacht die absoluten Anfahrtshäufigkeiten je TSP als Grundlage herangezogen, ohne nach den diversen TSP als Ausgangspunkte zu unterscheiden. Damit ergibt sich für den Fall „Schichtbeginn“ lediglich ein Spaltenvektor (eine „Quelle“ als Start und rund 280 TSP als mögliches Ziel).

Einen weiteren Sonderfall betrifft das Ereignis „Schichtende“. Hierbei sind die einzelnen Übergangswahrscheinlichkeiten („TSP zu Senke“) nicht von der Uhrzeit abhängig, sondern ereignisorientiert (z. B. „Schichtende“ erreicht). Darüber hinaus können die Wahrscheinlichkeiten ausschließlich die Werte „null“ oder „eins“ annehmen. Im vorhergegangenen Abschnitt „Initialisierung“ wurden bereits die Zeitpunkte für Beginn und Ende aller Schichten ermittelt. Wird im Rahmen der Simulation das festgelegte Schichtende eines E-Taxis erreicht, dann wird für diesen konkreten Simulationsschritt die Übergangswahrscheinlichkeit vom aktuellen  $TSP_{\text{Start}}$  zur „Senke“ auf „eins“ gesetzt und alle anderen Übergänge auf „null“. Damit wird bewerkstelligt, dass der Zustand „Quelle/Senke“ (betrieblicher Abstellplatz) jedenfalls eingenommen wird. Ist zum darauffolgenden Ereignis „Beginn der nächsten Taxischicht“ das gewählte Simulationende<sup>116</sup> noch nicht erreicht, dann wird der Zustand „Quelle/Senke“ wieder mit den zuvor beschriebenen Übergangswahrscheinlichkeiten in Richtung TSP verlassen.

Mit Hilfe der beschriebenen „Inversionsmethode“ und unter Berücksichtigung der aufgezeigten Sonderfälle können nun aus den ermittelten Übergangsmatrizen sukzessive die zusammenhängenden Folgen von  $TSP_{\text{Start}}$  und  $TSP_{\text{Ziel}}$  je E-Taxi berechnet werden. Abbildung 5-7 stellt die relativen Häufigkeiten für  $TSP_{\text{Start}}$  (links) und  $TSP_{\text{Ziel}}$  (rechts) zusammengefasst je Gemeindebezirk dar. Es werden wiederum die stochastisch generierten Simulationsergebnisse mit den originalen Werten (GPS-basierte Fahrzeugdaten) verglichen.

---

<sup>116</sup> Ende des Betrachtungszeitraums

Dabei zeigt sich eine leichte, modellbedingte Verschiebung der TSP-Nutzungshäufigkeiten in Richtung südlicher und östlicher Randbezirke. Die mittlere, absolute Abweichung beträgt auf Bezirksebene 0,24 % für  $TSP_{Start}$  und 0,10 % für  $TSP_{Ziel}$ .

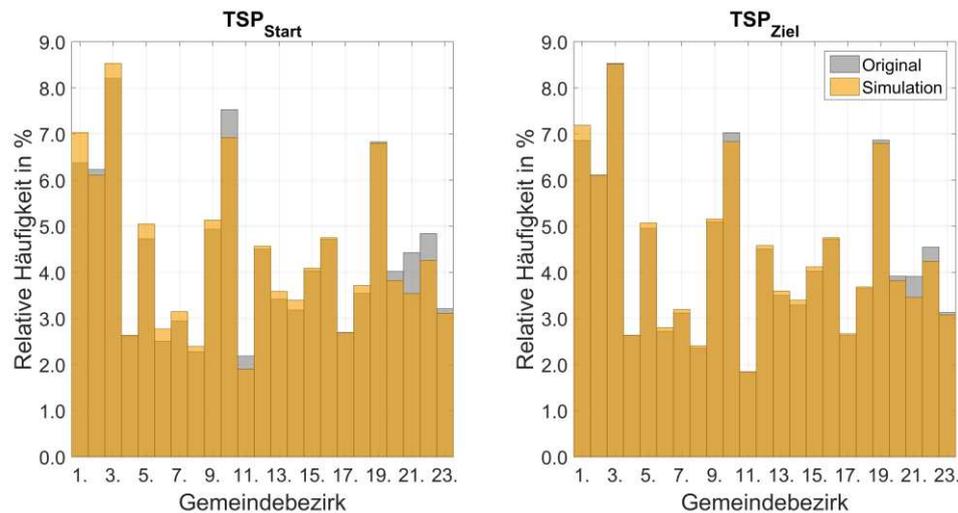


Abbildung 5-7: Vergleich der relativen Häufigkeiten für  $TSP_{Start}$  (links) und  $TSP_{Ziel}$  (rechts) je Gemeindebezirk; Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (GPS-basierte Fahrzeugdaten)

### Standdauer zwischen den Taxifahrten

Bis die nächste KundInnenfahrt vermittelt wird bzw. ein weiterer Fahrgast zusteigt, kommt es zu einer gewissen Wartezeit am TSP. Wie in Kapitel 4.4.2 untersucht, können die Standdauern am TSP als Weibull-Verteilung interpretiert werden. Auch hierbei lassen sich deutliche zeitliche Abhängigkeiten erkennen. Deshalb werden die beiden Parameterwerte der Weibull-Verteilung entsprechend des Ankunftszeitpunkts am Taxistandplatz (Stunden-Intervalle) und des zugehörigen Wochentags ausgewählt. Neuerlich wird die MATLAB®-Funktion „random“ zur Generierung einer passenden Standdauer am TSP (in Minuten) herangezogen. Werte über 200 Minuten (entspricht dem Maximum der Originaldaten) werden aus Plausibilitätsgründen nicht zugelassen.

Analog zu den zuvor betrachteten Mobilitätsmerkmalen, wird auch für die generierten Werte der Standdauer am TSP ein Vergleich mit den zugrunde gelegten Originaldaten durchgeführt. Abbildung 5-8 stellt die relativen Häufigkeitsverteilungen des Merkmals „Standdauer am TSP“ von Simulation (stochastisch generiert) und Original (GPS-basierte Fahrzeugdaten) gegenüber. Es zeigt sich eine mittlere Überschätzung von rund 21 Sekunden je Aufenthalt am Taxistandplatz. Dies entspricht einer durchschnittlichen

Abweichung von 1,9 %. Der arithmetische Mittelwert aller in der Simulation generierten Standdauern am TSP ergibt sich zu 19,0 Minuten.

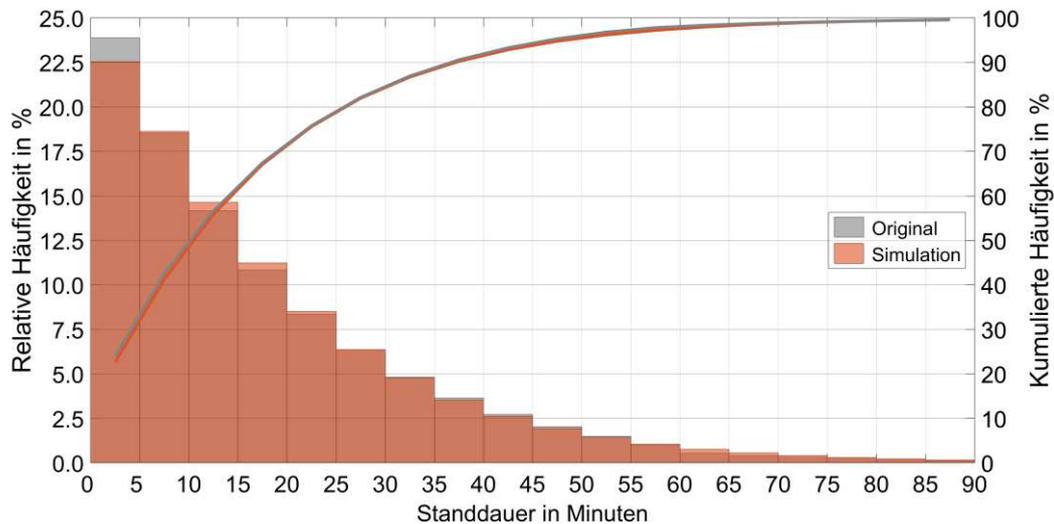


Abbildung 5-8: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen des Merkmals „Standdauer am TSP“; Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (GPS-basierte Fahrzeugdaten)

### Die nachfolgende Taxifahrt

Grundsätzlich wird nach Generierung aller notwendigen Attribute einer Taxifahrt sowie der darauffolgenden Standdauer die Berechnungsschleife von Neuem begonnen. Mit dem Ende einer Taxifahrt können in Abhängigkeit der definierten Betriebsarten/Schichtsysteme allgemein drei verschiedene Wege eingeschlagen werden:

- A) TaxilenkerIn führt weitere Taxifahrten durch (Schichtende noch nicht erreicht)
- B) TaxilenkerIn nimmt das E-Taxi außer Betrieb (Schichtende erreicht)
- C) TaxilenkerIn wird gewechselt, E-Taxi bleibt in Betrieb (alternatives Schichtende)

Solange kein Schichtende bzw. -wechsel erfolgt (Fall A), repräsentiert der aktuell ausgewählte  $TSP_{Ziel}$  ebenfalls den  $TSP_{Start}$  der nächsten Taxifahrt. Dabei ergibt sich der Startzeitpunkt der nächsten Taxifahrt modellbedingt aus der Summe der ermittelten Werte für Ankunftszeit am TSP und zugehöriger Standdauer am TSP.

Wird hingegen mit Abschluss der Taxifahrt die aktuelle Taxischicht beendet, z. B. weil das geplante Schichtende erreicht ist, so müssen die beiden Fälle B und C unterschieden werden.

Dabei tritt Fall C praktisch nur bei E-Taxis im 2-Schichtensystem auf („Doppelschicht“). Es ergibt sich eine relativ kurze Standdauer, da während dieser lediglich das E-Fahrzeug

übergeben und der Lenker bzw. die Lenkerin getauscht wird. Aus Sicht der Simulation bleibt das E-Taxis somit in Betrieb. In der vorliegenden Arbeit wird für den LenkerInnen-Wechsel – zusätzlich zur Standdauer am TSP – vereinfacht eine pauschale Zeitspanne von 15 Minuten angenommen und eine Änderung des TSP vernachlässigt, d.h.  $TSP_{\text{Start}}$  (neu) bleibt ident mit  $TSP_{\text{Ziel}}$  (alt).

Hingegen wird im Fall B das E-Taxi nach Schichtende außer Betrieb genommen und kann danach u. a. für private Zwecke<sup>117</sup> weiter genutzt oder am betrieblichen Abstellplatz geparkt werden. Dieser Fall tritt vor allem dann auf, wenn das E-Taxi einem 1-Schichtsystem zugeordnet wird (z. B. nur „Tagesschicht“) und die Zeitspanne bis zum nächsten Schichtbeginn entsprechend lange ist (größtenteils mehrere Stunden). Wird im Anschluss eine neue Taxischicht gestartet und das E-Taxi wieder in Betrieb genommen, dann wird ebenfalls ein neuer  $TSP_{\text{Start}}$  ausgewählt. Die Realisierung erfolgt mittels zufallsbasierter Generierung (siehe Abschnitt „Taxistandplatzauswahl“).

In Ausnahmefällen wird das E-Taxi auch im 2-Schichtsystem („Doppelschicht“) nach Schichtende außer Betrieb genommen (Zuordnung zum Fall B). Wenn dies geschieht, dann aufgrund zu geringer Nachfrage vorrangig beim Schichtwechsel in den späten Nachtstunden/frühen Morgenstunden (siehe Auswertungen Kapitel 5.2 „Validierung und Visualisierung“).

Darüber hinaus stimmen aufgrund der mehrstufigen, stochastischen Generierung der Zeitpunkt für das Schichtende und jener für das Ende der letzten Taxifahrt einer Taxischicht nicht zwangsläufig überein. Deshalb werden diese Zeitpunkte im Nachhinein gleichgesetzt<sup>118</sup>. Um das angepasste Schichtende jedoch nicht ausschließlich in Richtung spätere Zeitpunkte zu verschieben, kann es auch zu einem verfrühten Schichtende kommen. Liegen zwischen dem geplanten Schichtende und dem Abschluss der aktuellen Taxifahrt weniger als 30 Minuten, so wird das Schichtende entsprechend vorgezogen.

Im Laufe der Simulation wechseln sich somit die Berechnungen für Taxifahrten und Standdauern sowie Zeitspannen, in denen die E-Taxis außer Betrieb sind, kontinuierlich ab. Die Simulation ist daher erst bei Überschreiten des festgelegten Betrachtungszeitraums (ein Kalenderjahr) und einer vollständigen Generierung der ausgewählten Anzahl an E-Taxis abgeschlossen (vergleiche Abbildung 5-2).

---

<sup>117</sup> Private Fahrten werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt.

<sup>118</sup> Damit keine Verletzung der Kausalitätsgründe entsteht, wird der Beginn der nachfolgenden Taxischicht bei Bedarf ebenfalls verschoben.

Damit steht nach Simulationsende eine gesamte E-Taxiflotte mit 4.500 Fahrzeugen zur Verfügung und wird anschließend im Rahmen der Machbarkeitsanalyse für vertiefende Untersuchungen herangezogen. Zuvor werden die in der Simulation stochastisch generierten Mobilitätsdaten jedoch noch in Bezug auf die gewählten Betriebsarten analysiert, auf Flottenebene visualisiert und mit Hilfe der kumulierten Flottendaten validiert.

## 5.2 Validierung und Visualisierung

Im vorangegangenen Kapitel wurden die einzelnen Schritte zur stochastischen Generierung einer gesamten E-Taxiflotte detailliert erläutert und bereits ein primärer Vergleich der Simulationsergebnisse mit den originären GPS-basierter Mobilitätsdaten auf Ebene der einzelnen Merkmale vorgenommen. Nun werden die resultierenden Mobilitätsdaten, die 4.500 E-Fahrzeuge und einen Betrachtungszeitraum von 12 Monaten umfassen, einerseits auf Basis der resultierenden Ganglinien<sup>119</sup> validiert und andererseits erste Erkenntnisse auf Ebene der definierten Betriebsarten dargelegt.

Zur Validierung der stochastisch generierten Mobilitätsdaten werden die noch ungenutzten Bestandteile der kumulierten Flottendaten herangezogen. Wie in Kapitel 3.2 „Kumulierte Flottendaten“ dargestellt, sind die Originaldaten als Zeitreihen<sup>120</sup> vorhanden und repräsentieren die Summenwerte aller registrierten Taxis der Vermittlungsgesellschaft. Sie geben u. a. darüber Auskunft, wie viele Taxis zeitgleich am Vermittlungssystem an- bzw. abgemeldet sind. Die zugehörige Ganglinie der gleichzeitig angemeldeten Taxis wird in der vorliegenden Arbeit schlicht als Anmeldeprofil bezeichnet.

Aus den stochastisch generierten Mobilitätsdaten kann ferner das Anmeldeprofil ermittelt werden. Dazu wird analog zu den originären Werten die Summe über alle gleichzeitig am Vermittlungssystem angemeldeten E-Taxis der gesamten generierten E-Taxiflotte als Ganglinie gebildet<sup>121</sup>. Für einen anschaulichen Vergleich der Anmeldeprofile von Original und Simulation sind diese jeweils auf die zugrundeliegenden Flottengrößen normiert und in Abbildung 5-9 als gemittelte Wochenprofile dargestellt.

---

<sup>119</sup> Zeitlicher Verlauf der Summe aller Taxis, die gleichzeitig u. a. am Vermittlungssystem angemeldet sind, Taxifahrten durchführen oder am TSP stehen.

<sup>120</sup> Die Originaldaten besitzen eine zeitliche Auflösung von 10-20 Minuten und umfassen einen geschlossenen Zeitbereich von 12 Monaten.

<sup>121</sup> Wie in Kapitel 4.2 „Bestimmung der Betriebsarten und -zeiten“ beschrieben, wird im Rahmen der Simulation ein E-Taxi am Vermittlungssystem angemeldet, sobald es in Betrieb geht (Schichtbeginn). Gleiches gilt für Abmeldung und Außerbetriebnahme (Schichtende).

Bedingt durch die vereinfachte Modellannahme von ausschließlich drei Betriebsarten sowie aufgrund der Durchführung notwendiger Anpassungen beim Schichtenden (im Rahmen der Simulation<sup>122</sup>) zeigen sich geringfügige Abweichungen zwischen den beiden Anmeldeprofilen (Simulation und Original). Durchschnittlich ergibt sich ein Unterschied von 0,75 Prozentpunkten<sup>123</sup>.

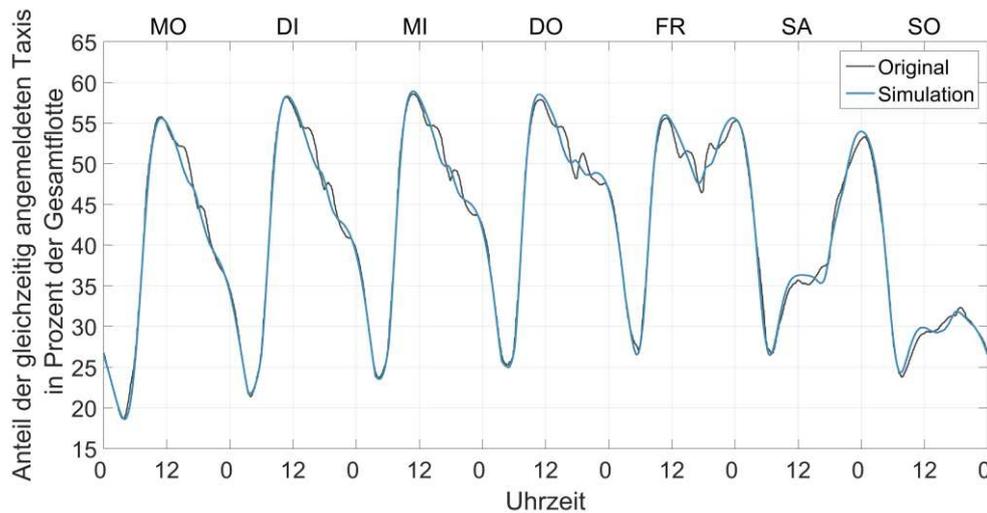


Abbildung 5-9: Vergleich der gemittelten Anmeldeprofile der gesamten E-Taxiflotte: Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (kumulierte Flottendaten)

Da ferner der saisonale Verlauf in der Simulation Berücksichtigung findet, bilden die stochastisch generierten Mobilitätsdaten saisonbedingte Schwankungen ab (Methode siehe Abschnitt „Initialisierung“). Entsprechend des Detaillierungsgrades der Modellierung ergeben sich leichte Unterschiede zwischen Original und Simulation (siehe Abbildung 5-10). Diese betragen im Mittel 2,8 Prozentpunkte<sup>124</sup>.

<sup>122</sup> Dadurch ergeben sich auch leichte Unterschiede im Vergleich zu Abbildung 4-10 (siehe Kapitel 4.2 „Bestimmung der Betriebsarten und -zeiten“).

<sup>123</sup> Wochenprofil: Das arithmetische Mittel der relativen Abweichung vom Original beträgt 1,8 %.

<sup>124</sup> Saisonaler Verlauf: Das arithmetische Mittel der relativen Abweichung vom Original beträgt hingegen 7,0 %.

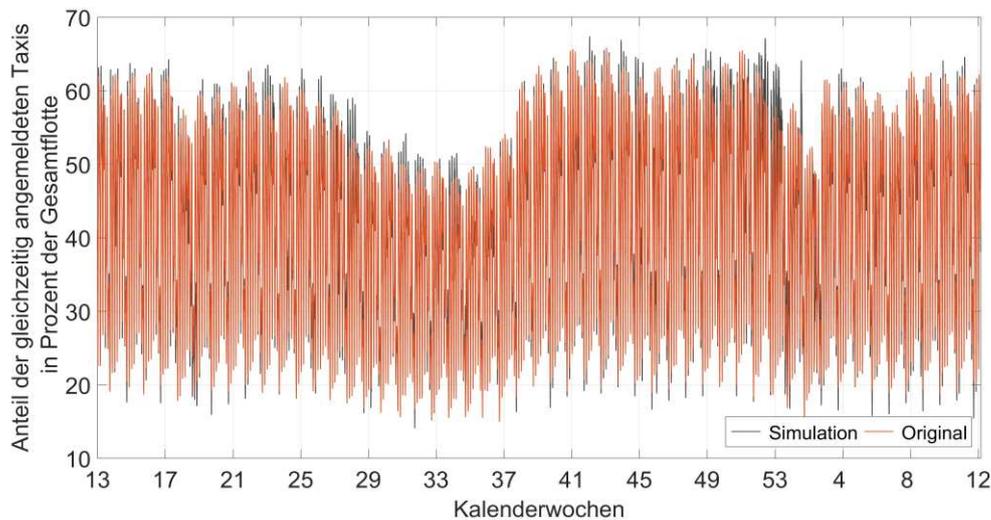


Abbildung 5-10: Vergleich des saisonalen Verlaufs der Anmeldeprofile der ges. E-Taxiflotte: Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (kumulierte Flottendaten)

Die kumulierten Flottendaten enthalten – über das Anmeldeprofil hinaus – weiters die Ganglinien der gleichzeitig fahrenden und stehenden Taxis. Dabei ist hier mit „fahren“ der Zeitraum einer Taxifahrt und mit „stehen“ die Standdauer am TSP zu interpretieren. Da die zugrundeliegenden Daten der beiden Ganglinien (Fahrt- und Standprofil) weder zur Modellierung noch zur Simulation herangezogen werden, besteht an dieser Stelle die Möglichkeit sie für eine Validierung zu nutzen.

Wie im Abschnitt „Realisierung“ dargestellt, ergeben sich die stochastisch generierten Mobilitätsdaten nicht aus den kumulierten Flottendaten, sondern aus den Verteilungen der GPS-basierten Fahrzeugdaten. Lediglich Beginn und Ende der jeweiligen Taxischichten werden auf Basis der kumulierten Flottendaten ermittelt (vergleiche Kapitel 4.2 „Bestimmung der Betriebsarten und -zeiten“).

Wird für jeden Zeitpunkt des einjährigen Betrachtungszeitraums berechnet, welcher Anteil der generierten E-Taxiflotte zeitgleich eine Taxifahrt durchführt bzw. simultan an einem TSP steht, so resultieren daraus die gewünschten Fahrt- und Standprofile.

Eine Gegenüberstellung der gemittelten Wochenprofile („fahren“ und „stehen“) für Original und Simulation zeigen Abbildung 5-11 bzw. Abbildung 5-12.

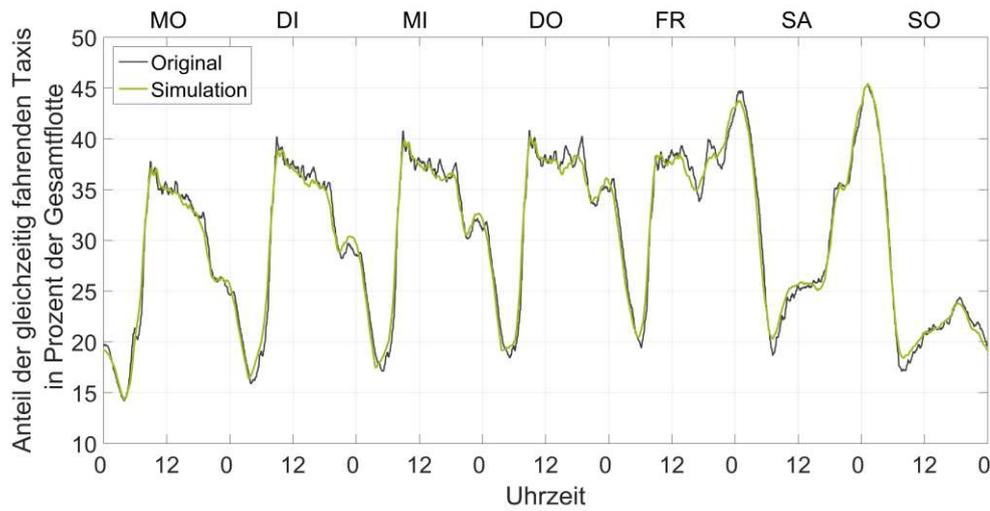


Abbildung 5-11: Vergleich der gemittelten Fahrtprofile der gesamten E-Taxiflotte: Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (kumulierte Flottendaten)

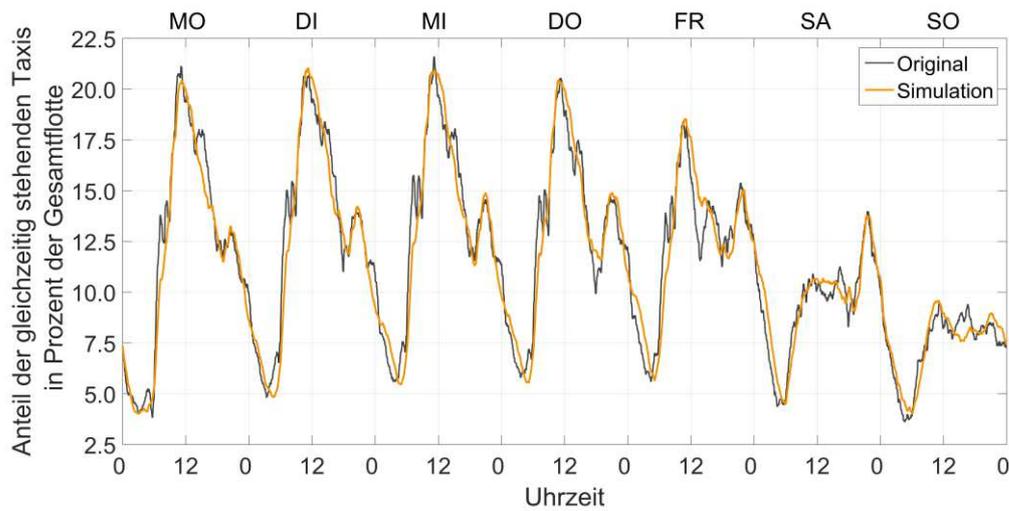


Abbildung 5-12: Vergleich der gemittelten Standprofile der gesamten E-Taxiflotte: Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (kumulierte Flottendaten)

Die Wochentagscharakteristik ist ordnungsgemäß nachgebildet. Aufgrund der modellbedingten Vereinfachungen ergeben sich jedoch gewisse Differenzen im Tagesverlauf.

Die mittlere Abweichung beträgt 0,79 Prozentpunkte für die Fahrprofile und 0,80 Prozentpunkte für die Standprofile<sup>125</sup>.

Aus den gewonnenen Mobilitätsdaten können nun erste Ergebnisse bezüglich der definierten Betriebsarten (Tages-, Nacht- und Doppelschicht) dargestellt werden. In der vorliegenden Arbeit wird jedes generierte E-Taxi genau einer der drei Betriebsarten zugeordnet. Die Verteilung der Zeitpunkte von Beginn und Ende der Taxischichten aus Abbildung 5-13 verdeutlicht nochmals die individuelle Charakteristik der drei Betriebsarten.

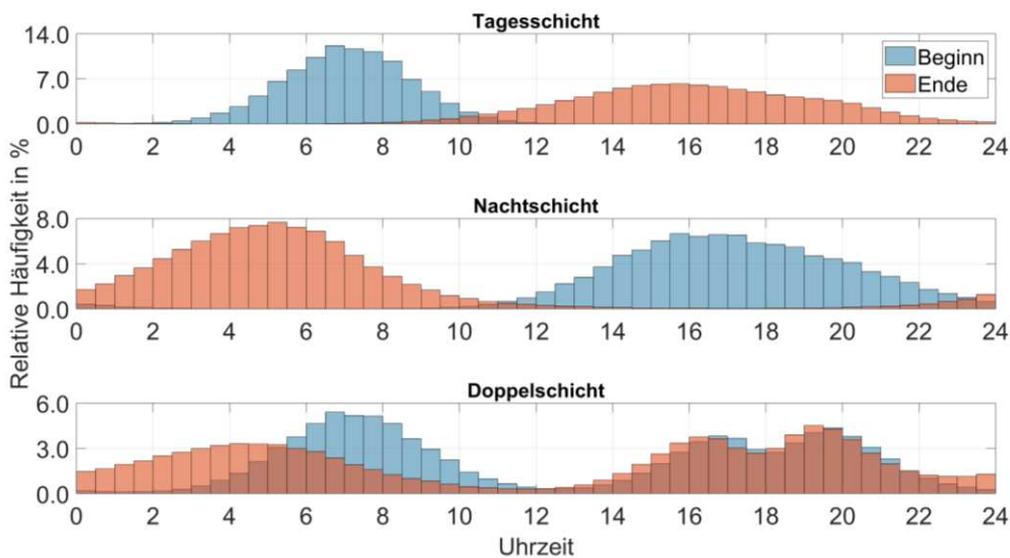


Abbildung 5-13: Verteilung der Zeitpunkte von Beginn und Ende der Taxischichten für die gewählten Betriebsarten Tages-, Nacht-, und Doppelschicht (4.500 generierte E-Taxis, alle Wochentage)

Wie bereits in Kapitel 4.2 „Bestimmung der Betriebsarten und -zeiten“ erläutert, wird im Rahmen der Betriebsart „Doppelschicht“ einmal pro Tag ein FahrerInnen-Wechsel vorgenommen, wodurch jedes E-Taxi, das dieser Betriebsart angehört, zwei Taxischichten je Tag absolviert. Der LenkerInnen-Wechsel erfolgt nachmittags bzw. abends. Aufgrund der vereinfacht gewählten Methode zur Festlegung des Zeitpunkts, zu dem der FahrerInnen-Wechsel stattfindet, bilden sich in den zugehörigen Verteilungen für Ende der ersten und Beginn der zweiten Taxischicht jeweils zwei zusätzliche Gipfel aus (vergleiche dazu Kapitel 5 „Generierung einer gesamten E-Taxiflotte“).

<sup>125</sup> Der arithmetische Mittelwert der relativen Abweichung vom Original beträgt hingegen für das Fahrprofil 2,9 % und für das Standprofil 7,8 %.

Abgesehen davon spiegelt Abbildung 5-13 genau die definierten Erwartungswerte und Standardabweichungen aus Tabelle 4-2 wider (siehe Kapitel 4.2 „Bestimmung der Betriebsarten und -zeiten“) und verdeutlicht die konsistente Umsetzung der Modellierung bis hin zur Simulation.

Die Differenz aus den Zeitpunkten für Beginn und Ende bestimmt die Dauer der Taxischichten. Aufgrund der stochastischen Mobilitätsgenerierung auf Fahrzeugebene kann die Dauer jeder einzelnen Taxischicht aus den Simulationsergebnissen extrahiert und je Betriebsart visualisiert werden. Abbildung 5-14 stellt die jeweilige Verteilung der Taxischichtdauer für die drei Betriebsarten Tages-, Nacht- und Doppelschicht dar.

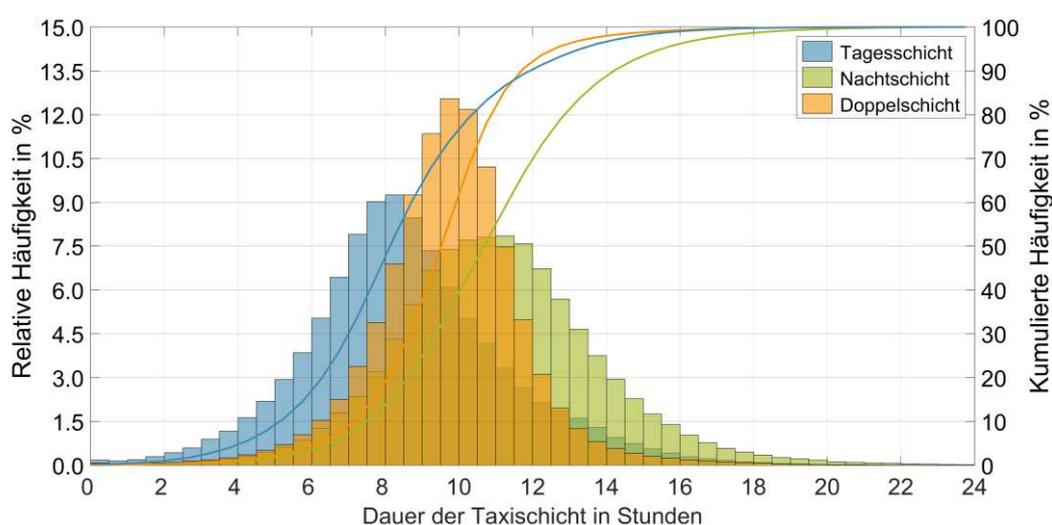


Abbildung 5-14: Verteilung der Taxischichtdauern für die gewählten Betriebsarten Tages-, Nacht- und Doppelschicht (4.500 generierte E-Taxis, alle Wochentage)

Übergeordnet – für alle Wochentage und Betriebsarten – ergibt sich daraus eine mittlere Taxischichtdauer von 10,2 Stunden. Bedingt durch den originären Verlauf des kumulierten Anmeldeprofils, auf dem die Definition der Betriebsarten beruht, zeigen sich einerseits klare Unterschiede zwischen den Betriebsarten, andererseits besitzt die Verteilung der Taxischichtdauern ebenfalls eine deutliche Wochentagsabhängigkeit.

Im Mittel besitzen die Taxis der Betriebsart „Tagesschicht“ die kürzesten Taxischichten (9,1 Stunden), gefolgt von jenen der „Doppelschicht“ (10,2 Stunden) und jenen der „Nachtschicht“ (11,5 Stunden). In Bezug auf die Wochentagsabhängigkeit heben sich vor allem Freitag, Samstag und Sonntag von den restlichen Wochentagen ab (vergleiche dazu Tabelle B-2 im Anhang).

Werden die stochastisch generierten Mobilitätsdaten – ausgehend von den Taxischichten – eine Ebene tiefer betrachtet, so zeigen sich die individuellen Taxifahrten. Die Taxifahrten selbst wurden zwar in Bezug auf Distanz und Dauer im vorangegangenen Kapitel dargestellt, an dieser Stelle soll jedoch die Anzahl der Taxifahrten je Taxischicht noch zusätzlich analysiert werden.

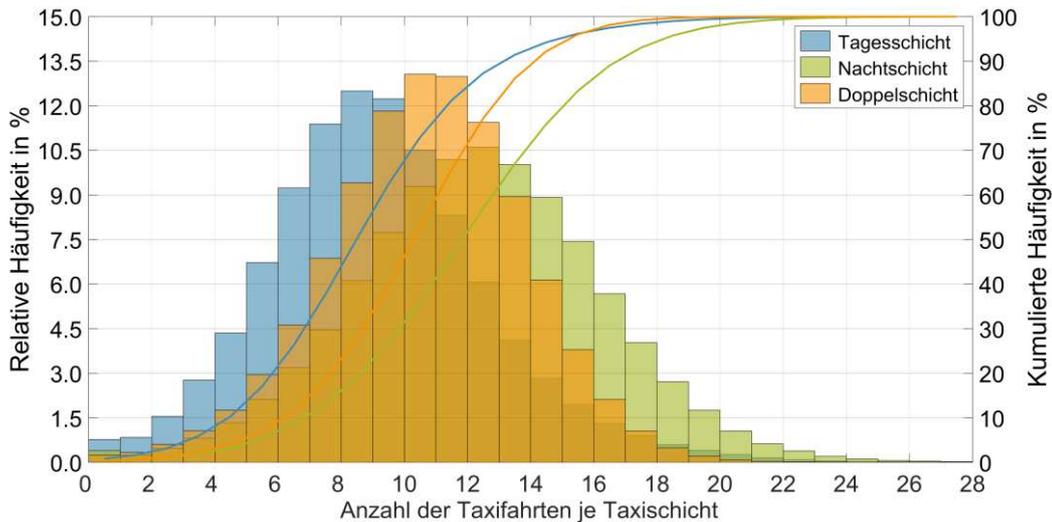


Abbildung 5-15: Verteilung der Anzahl an Taxifahrten je Taxischicht für die gewählten Betriebsarten Tages-, Nacht- und Doppelschicht (4.500 generierte E-Taxis, alle Wochentage)

Im Mittel über alle Betriebsarten und alle Wochentage ergibt sich eine Anzahl von 11,1 Taxifahrten je Taxischicht<sup>126</sup>. Analog zu den Taxischichtdauern zeigen sich auch hier ähnlich Unterschiede je Betriebsarten und je Wochentag (vergleiche dazu Abbildung 5-15 und Tabelle B-3 im Anhang). Für die Taxis der Betriebsart „Tagesschicht“ beträgt der arithmetische Mittelwert 9,7 Taxifahrten, für jene der „Doppelschicht“ sind es 11,2 Taxifahrten und für jenen der „Nachtschicht“ 12,8 Taxifahrten.

Es besteht somit eine proportionale Tendenz zwischen der Anzahl der Taxifahrten und der Dauer der jeweiligen Taxischicht sowie im gleichen Maße auch für die zugehörige Kilometerleistung der Taxischicht. In Zusammenhang mit der betrieblichen Kilometerleistung der E-Taxis ist jedoch weniger die Kilometerleistung je Taxischicht von Interesse

<sup>126</sup> Es soll nochmals explizit darauf hingewiesen werden, dass in der vorliegenden Arbeit eine Taxifahrt aus Besetzt- und Leerfahrten bestehen kann. Eine Taxifahrt ist damit nicht zwingend ident mit der Beförderung eines Fahrgastes.

als jene pro Arbeitstag (Nutzungstag). Für die Betriebsarten „Tagesschicht“ und „Nachtschicht“ ergeben sich diesbezüglich keine Unterschiede, da hierbei lediglich eine Taxischicht je Nutzungstag durchgeführt wird, hingegen werden im Rahmen der „Doppelschicht“ zwei Taxischichten von verschiedenen TaxilenkerInnen – jedoch mit demselben E-Fahrzeug – absolviert.

In Abbildung 5-16 sind die Kilometerleistungen je Nutzungstag für die drei definierten Betriebsarten aufgetragen. Im Mittel werden von E-Taxis der Betriebsart „Tagesschicht“ 125 km und von jenen der „Nachtschicht“ 164 km pro Nutzungstag zurückgelegt. Die Unterschiede entstehen wiederum aufgrund des zugrundeliegenden, originären Anmeldeprofils und der daraus ermittelten Betriebsarten bzw. -zeiten. Außerdem besitzt das Merkmal „Kilometerleistung“ eine deutliche Wochentagsabhängigkeit (vergleiche dazu Tabelle B-4 im Anhang). Die Kilometerleistung der E-Taxis im 2-Schichtensystem ergibt sich zu 285 km je Nutzungstag und ist damit – wie zu erwarten – etwa doppelt so hoch wie die Summe aus „Tages- und Nachtschicht“.

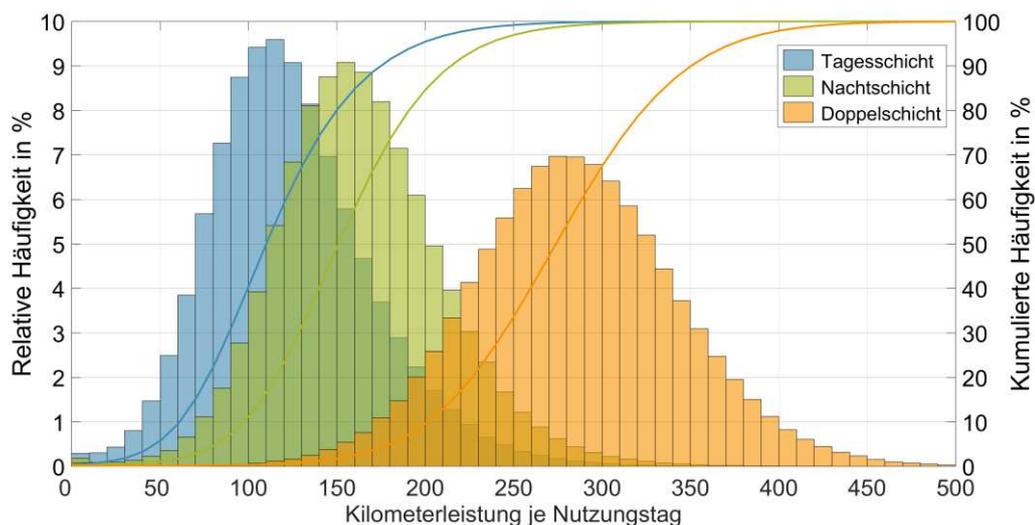


Abbildung 5-16: Verteilung der Kilometerleistungen je Nutzungstag für die gewählten Betriebsarten Tages-, Nacht- und Doppelschicht (4.500 generierte E-Taxis, alle Wochentage)

Zusammen mit der Anzahl der Nutzungstage lässt sich daraus einfach die mittlere Jahreskilometerleistung ermitteln. Im Rahmen der „Nachtschicht“ werden durchschnittlich 34.565 km je Kalenderjahr zurückgelegt. Dies sind rund 16 % mehr als in der Betriebsart „Tagesschicht“ und ca. 59 % weniger als in der Betriebsart „Doppelschicht“.

Aufgrund des 2-Schichtensystems und der damit verbundenen höheren Anzahl an Nutzungstagen kommt es in Bezug auf die „Doppelschicht“ zu einer deutlich höheren

Jahreskilometerleistung, die sogar über der Summe von „Tages- und Nachtschicht“ liegt. Für alle Betriebsarten zusammen ergibt sich im Mittel eine Jahreskilometerleistung von 49.686 km je E-Taxi, also rund 50.000 km/Jahr.

Tabelle 5-2 fasst nochmals die Mittelwerte der Merkmale „Jahreskilometerleistung“, „Taxisschichtdauer“, „Anzahl der Taxifahrten je Taxischicht“ und „Anzahl der Nutzungstage pro Jahr“ für alle drei Betriebsarten zusammen. Damit ist abschließend ein quantitativer Überblick der „Mobilitätsausprägungen“ der stochastisch generierten E-Taxiflotte gegeben.

Nachfolgend werden nun auf Basis dieser Mobilitätsdaten die Ermittlung des Ladeinfrastrukturbedarfs durchgeführt, die zu untersuchenden Szenarien entwickelt und die Ergebnisse zur technischen Machbarkeitsanalyse erarbeitet.

Tabelle 5-2: Vergleich der arithmetischen Mittelwerte diverser Merkmale der drei Betriebsarten

Betriebsarten	Mittlere Jahreskilometerleistung in km	Mittlere Anzahl der Taxifahrten je Taxischicht	Mittlere Taxischichtdauer in Stunden	Mittlere Anzahl der Nutzungstage pro Jahr *)
Tagesschicht	29.869	9,7	9,1	240
Nachtschicht	34.565	12,8	11,5	211
Doppelschicht	83.904	11,2	10,2	295
Gesamt	49.686	11,1	10,2	250

\*) Mittlerer Anzahl der Kalendertage, an denen das E-Fahrzeug als Taxi genutzt wird.

## 6 Technische Machbarkeitsanalyse

Die im Kapitel zuvor generierten Mobilitätsdaten beinhalten alle relevanten zeitlichen, räumlichen und energetischen Informationen über die durchzuführenden Taxifahrten, das Warten an den TSP sowie Beginn und Ende der jeweiligen Taxisschichten einer gesamten E-Taxiflotte.

Im vorliegenden Kapitel wird nun basierend auf diesen Mobilitätsdaten analysiert, welche Taxifahrten rein elektrisch durchführbar sind und wie sich Änderungen diverser Rahmenbedingungen (wie Batteriekapazität oder Ladeinfrastrukturausbau) auf die Ergebnisse auswirken. So können u. a. einzelne Taxifahrten nicht angenommen werden, wenn einerseits die zurückzulegende Distanz und der damit verbundene Energiebedarf die maximal nutzbare Batteriekapazität des betrachteten E-Taxis überschreiten oder andererseits der aktuelle Batterieladezustand schlicht nicht mehr für die nächste Taxifahrt ausreicht. Darüber hinaus können während der Ladevorgänge keine Taxifahrten durchgeführt werden, wodurch es womöglich erneut zum Verlust von lukrativen Taxifahrten kommt.

Dabei ist die Anzahl der Ladevorgänge je Taxischicht wiederum direkt mit der Größe der nutzbaren Batteriekapazität gekoppelt. Weitere Abhängigkeiten ergeben sich ferner u. a. zwischen der mittleren Dauer der Anfahrt zur Ladestation (sowie der darauffolgenden Wartezeit am Ladepunkt) und dem Ausbaugrad der Ladeinfrastruktur oder zwischen der Dauer des Ladevorganges und der verfügbaren Ladeleistung am LIS-Standort. Dies sind allerdings nur vereinzelte Aspekte aus einer Vielzahl von Gesichtspunkten, die ebenfalls Berücksichtigung finden und für die nachfolgend der Einfluss auf die technische Machbarkeit ermittelt wird.

Zusammen mit einer Beschreibung des Simulationsablaufs wird im Rahmen der anschließenden Unterkapitel der methodische und funktionale Sachverhalt zur Optimierung des bedarfsgerechten Ladeinfrastrukturausbaus dargestellt sowie die Entwicklung der zu untersuchenden Szenarien erläutert.

Darüber hinaus werden die erarbeiteten Ergebnisse und Erkenntnisse aus der technischen Machbarkeitsanalyse im Detail beschrieben und damit die Beantwortung zumindest folgender Details zur übergeordneten Kernfrage vorgenommen:

- Welcher Anteil der Taxifahrten ist mittels rein elektrisch betriebener Taxifahrzeuge durchführbar und wie viele Taxifahrten müssen aus Gründen der beschränkten Reichweite abgelehnt werden?
- Wo soll vorrangig Ladeinfrastruktur entstehen, wie muss diese beschaffen sein und welche Ausbaustufen sind in Bezug auf die Flottengröße relevant?

- Wie sind die Ladevorgänge u. a. bezüglich Anzahl, Dauer sowie geladene Energiemenge verteilt und welche Nutzungsgrade ergeben sich für die einzelnen Ladestationen?
- Wie sehen die Ganglinien der resultierenden Summenladeprofile an den betrachteten Ladestationen aus und welche Auswirkungen ergeben sich daraus für das lokale elektrische Stromnetz?

## 6.1 Simulationsablauf und Funktionsblöcke

Im Gegensatz zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmaschinen, bei denen Reichweite und Tankvorgänge untergeordnete Rollen spielen, dreht sich bei der oftmals sehr emotional geführten Diskussion über Elektrofahrzeuge fast alles rund um Batteriekapazität und Ladeinfrastruktur. Zusammen entscheiden sie über den Erfolg der Elektromobilität und zählen daher zu den wichtigsten Gesichtspunkten der hier durchgeführten technischen Machbarkeitsanalyse sowie der daraus abgeleiteten Ergebnisse.

Batteriekapazität und Ladeinfrastruktur sind im Wesentlichen deshalb so relevant, da sie im Prinzip die Grenzen der Reichweitenverfügbarkeit von E-Fahrzeugen vorgeben. In Bezug auf die nachfolgende Simulation wird die verfügbare Reichweite eines E-Taxis wiederum durch den zeitabhängigen Parameter „Batterieladezustand“ (engl. „State of Charge“, kurz SOC) repräsentiert. Auf Basis des aktuellen SOC-Wertes kann u. a. entschieden werden, ob noch eine weitere elektrische Taxifahrt möglich ist oder ob bereits ein Ladevorgang notwendig wird.

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Simulationsprogramm bietet daher die Möglichkeit, unter den gewählten Voraussetzungen und Einschränkungen den aktuellen Batterieladezustand aller E-Taxis zu berechnen (u. a. zu Beginn und nach Ende jeder Taxifahrt bzw. zu jedem Ladevorgang, siehe Abbildung 6-1).

Darauf aufbauend wird regelbasiert ermittelt wann, wo und wie Ladevorgänge an öffentlichen bzw. betrieblichen Ladestationen<sup>127</sup> auftreten und welche Taxifahrten aufgrund von akuten Reichweitenproblemen bzw. wegen noch nicht abgeschlossener Ladevorgänge entfallen müssen.

---

<sup>127</sup> In der vorliegenden Arbeit wird mit „öffentlichen Ladestationen“ Ladeinfrastruktur im öffentlichen bzw. halböffentlichen Raum verstanden. Hingegen werden mit dem Begriff „betrieblich“ Ladestationen am Firmengelände des Taxiunternehmers/der Taxiunternehmerin bzw. Ladeinfrastruktur am gesetzlich vorgeschriebenen Abstellplatz beschrieben.

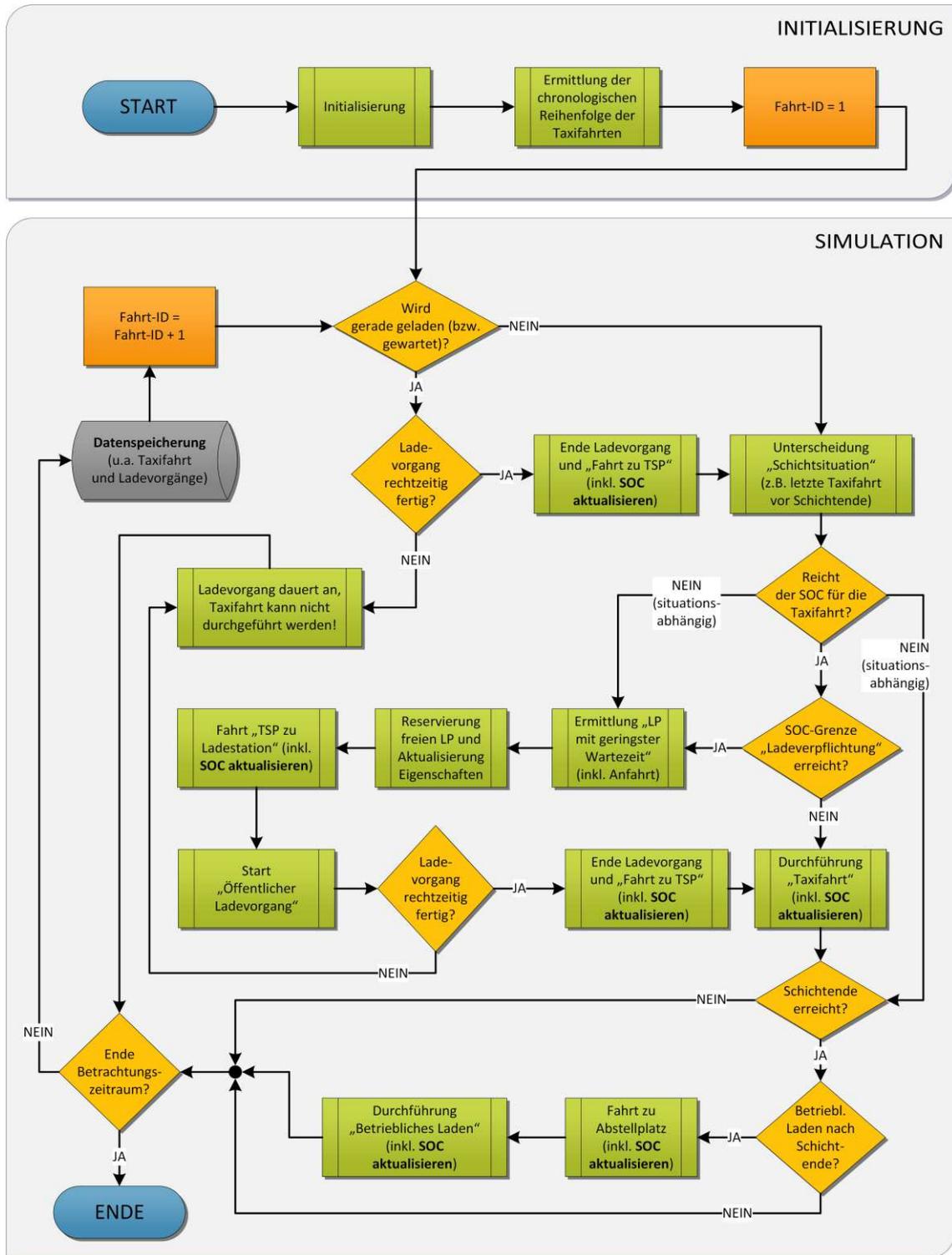


Abbildung 6-1: Überblick zum Programmablaufplan des entwickelten Simulationsprogramms (SOC-basierte Entscheidung über die Durchführung von Ladevorgängen und Taxifahrten)

Um einen detaillierten Überblick des gesamten Simulationsablaufs zu erlangen, werden im Folgenden die wichtigsten enthaltenen Funktionsblöcke herausgegriffen und näher spezifiziert.

### 6.1.1 Initialisierung und Parametrierung

Bevor die eigentliche Simulation abläuft, werde in einer Initialisierungssequenz manuell die wichtigsten Parameterwerte festgelegt und damit der Simulationsrahmen abgesteckt. Die Auswirkungen zahlreicher Variationen der folgenden Parameter werden in diversen Szenarien im Anschluss untersucht:

- Mobilitätsdatengrundlage (wie Anzahl E-Taxis und Betrachtungszeitraum)
- Kapazität der E-Taxi-Antriebsbatterien (verbaut und nutzbar)
- Start- und Grenzwerte für den möglichen Ladezustand der Batterien
- Ladecharakteristik der Batterien (u. a. Parametrisierung des IU-Ladeverfahrens)
- Art des optimierten LIS-Ausbaus („flächendeckend“ oder „bedarfsgerecht“)
- Ausbaugrad der öffentlichen Ladeinfrastruktur (Anzahl der LIS-Standorte)
- Anzahl der Ladepunkte je Ladestandort
- Maximale Ladeleistung je Ladepunkt (z. B. DC-Laden, max. 50 kW)
- Abbruchbedingungen für Ladevorgänge (Voll- oder Teilladen, z. B. bis 80 %)
- Eigenschaften „betriebliche Ladeinfrastruktur“ (z. B. AC-Laden, 16 A je Phase)
- Leit- & Reservierungssystem „öffentliche LIS“ (Aktivierung bzw. Deaktivierung)

### 6.1.2 Leit- & Reservierungssystem

Um E-Taxi-LenkerInnen stets zum Ladepunkt mit der geringsten Summe aus Anfahrts- und Wartezeit zu leiten, wird im Rahmen der Simulation ein übergreifendes Leit- und Reservierungssystem (LURS) für die öffentliche Ladeinfrastruktur der E-Taxis berücksichtigt. Das LURS ermittelt den nächstgelegenen freien Ladestandort auf Basis der bereits angemeldeten Ladewünsche und reserviert den gewählten Ladepunkt bis zur Ankunft<sup>128</sup>. Damit können punktuelle Überlastungen und lange Wartezeiten an Ladestandorten vermieden werden, wodurch sich der Komfort sowie die Akzeptanz verbessern. Darüber hinaus wird durch den Einsatz des LURS der Nutzungsgrad der LIS-Standorte optimiert.

---

<sup>128</sup> Verstellte Parkplätze an den Ladestationen – verursacht durch nicht ladende Fahrzeuge – werden hierbei vernachlässigt. In der Praxis ist dies jedoch ein evidentes Problem, das nur schwer ohne Aufwand z. B. durch manuelle bzw. automatische Überwachung eingedämmt werden kann.

Dazu ist es jedoch erforderlich, die im Zeitplan des LURS gespeicherten Ladevorgänge chronologisch abzuarbeiten<sup>129</sup>. Im Rahmen der Simulation werden zu diesem Zweck zuerst die einzelnen Taxifahrten der gesamten E-Taxiflotte (mittels fortlaufender Fahrt-ID) in eine chronologische Reihenfolge gebracht und danach die Untersuchungen ereignisorientiert durchgeführt.

Auf die wichtigsten Ereignisse, die im Laufe der Simulation auftreten können, die damit verknüpften Bedingungen und die daraus resultierenden Entscheidungswege wird im Folgenden näher eingegangen.

### 6.1.3 Situationsabhängige Entscheidungspfade

Je nachdem in welcher Situation sich das gerade betrachtete E-Taxi befindet (z. B. letzte Taxifahrt vor dem Schichtwechsel/-ende), wird auf Basis des zugehörigen Batterieladezustands (SOC) entschieden, ob die darauffolgende Taxifahrt durchgeführt werden kann oder ob ein Ladevorgang von Nöten ist, und wenn ja, an welchem LIS-Standort geladen werden soll (vergleiche dazu die „situationsabhängigen“ Entscheidungspfade in Abbildung 6-1). Dabei muss jedoch nicht nur der Energiebedarf der Taxifahrt, sondern auch genügend Reserve für eine anschließende Fahrt zur Ladestation (öffentlich oder betrieblich) einkalkuliert werden. Dies ist eine zwingende Voraussetzung dafür, dass der berechnete Batterieladezustand der E-Taxis an keinem der durchgeführten Simulations-schritte zu null bzw. die dafür gewählte Grenze unterschritten wird.

Genügt die Reichweite, dann wird die aktuelle Taxifahrt durchgeführt und der Batterieladezustand des E-Taxis entsprechend des zugehörigen Energiebedarfs reduziert (inkl. Klimatisierung). Ist hingegen für die durchzuführende Taxifahrt nicht genügend Batteriekapazität vorhanden bzw. reicht der aktuelle Batterieladezustand nicht aus, so resultieren daraus mehrere Entscheidungswege, die nachfolgend beschrieben werden:

- 1) Batteriekapazität zu gering → Taxifahrt entfällt
- 2) Aktuelle Reichweite zu gering → Ladevorgang notwendig
  - Fall A) Ladevorgang rechtzeitig abgeschlossen → Taxifahrt wird durchgeführt
  - Fall B) Ladevorgang dauert weiter an → Taxifahrt entfällt

Ist der Energiebedarf der Taxifahrt größer als die maximal nutzbare Batteriekapazität (Variante 1), so kann diese Taxifahrt unter keinen Umständen vom betrachteten E-Taxi

---

<sup>129</sup> Eine sequenzielle Durchführung der Simulation auf Basis der Fahrzeug-ID ist hierbei nicht zielführend.

durchgeführt werden und muss entfallen<sup>130</sup>. Ein Ladevorgang ist jedoch nicht zwingend notwendig, wenn für die darauffolgende Taxifahrt der aktuelle Batterieladezustand ausreicht.

Besitzt hingegen das E-Taxi einen zu geringen Batterieladezustand<sup>131</sup>, dann wird stets ein Ladevorgang eingeleitet (Variante 2). Dieser kann grundsätzlich an einer betrieblichen oder einer öffentlichen Ladestation stattfinden. Dabei wird vereinfacht angenommen, dass Ladevorgänge an „betrieblichen“ Ladestationen (Abstellplatz) lediglich nach Ende einer Taxischicht durchgeführt werden<sup>132</sup>, also während sich das E-Taxi außer Betrieb befindet.

Treffen diese Voraussetzungen zu und erfolgt der Ladevorgang an einem „betrieblichen“ Ladepunkt, dann wird die Fahrt dorthin pauschal mit einer Energiemenge von 1,25 kWh in der Simulation berücksichtigt. Dies entspricht für einen mittleren spezifischen Energiebedarf von 25 kWh/100 km (inkl. Nebenverbraucher) ungefähr 5 km. Selbiges wird für die Fahrt zum ersten TSP der nächsten Taxischicht angenommen.

Wird indessen entschieden, den Ladevorgang an einer „öffentlichen“ LIS zu absolvieren, dann werden der Weg zwischen TSP und „öffentlicher“ LIS entsprechend den Abständen ihrer Verortungen<sup>133</sup> individuell ermittelt. Daraus ergeben sich je nach LIS-Ausbaugrad unterschiedliche An- und Abfahrtswege, die zeitlich und energetisch in die Berechnung einbezogen werden.

Auf Basis der Gesamtzeitdauer aus Anfahrtszeit zur Ladestation und Wartezeit an der Ladestation wird weiters die Selektion und Reservierung des konkreten Ladepunktes durch das LURS vorgenommen. Diesbezüglich werden – vom zugrunde gelegten Ladestationsnetz<sup>134</sup> – alle enthaltenen Ladepunkte betrachtet und die zugehörigen Gesamtzeitdauern ermittelt. Jener Ladepunkt, für den sich ein minimaler Zeitaufwand ergibt, wird für die Durchführung des entsprechenden Ladevorgangs ausgewählt.

Je nachdem wie viel Energie nach Ankunft am „öffentlichen“ Ladepunkt geladen wird und wie lange der Ladevorgang inklusive Anfahrt zur Ladestation und Rückfahrt zum

---

<sup>130</sup> Ladevorgänge während der Durchführung einer Taxifahrt werden ausgeschlossen.

<sup>131</sup> Zu „gering“ bezieht sich hier auf den Energiebedarf der nachfolgenden Taxifahrt.

<sup>132</sup> Im Rahmen der Initialisierung kann die Möglichkeit des „betrieblichen“ Ladens auch gänzlich deaktiviert werden.

<sup>133</sup> Vergleich dazu Abbildung 6-4 (links) „Verteilung der Wiener Taxistandplätze“

<sup>134</sup> Je nach Ladeinfrastruktur-Ausbaugrad ergibt sich eine entsprechende Anzahl an Ladestationen und Ladepunkte. Die konkrete Verteilung/Verortung der Ladeinfrastruktur ist in Kapitel 6.2.1 „Optimierte Ladestandortauswahl“ nachzulesen.

TSP dafür dauert, kann die nachfolgende Taxifahrt angenommen werden (Fall A) oder muss entfallen (Fall B).

Reicht die zugrundeliegende *Standdauer*<sup>135</sup> aus, um rechtzeitig den Ladevorgang abzuschließen und vor Beginn der nachfolgenden Taxifahrt am TSP einzulangen, dann kann die Taxifahrt trotz Ladevorgang durchgeführt werden (vergleiche Abbildung 6-2, Fall A).

Wird allgemein der LIS-Ausbau – bezogen auf die Flottengröße – zu gering dimensioniert, dann kommt es zu längeren Wartezeiten an den Ladestationen. Dies hat wiederum zur Folge, dass vereinzelte E-Taxis mitunter nicht nur eine Taxifahrt aufgrund des notwendigen Ladevorgangs verlieren (wie in Abbildung 6-2, Fall B dargestellt), sondern womöglich mehrere Taxifahrten auf einmal ausfallen. Im Gegensatz dazu erhöht eine Überdimensionierung die notwendigen Investitionen für den LIS-Ausbau unnötig. Es ist somit auf eine ausgewogene Balance zwischen Kosten und Nutzen zu achten. Für nähere Details wird an dieser Stelle jedoch auf das Kapitel 6.2 „Ladeinfrastrukturausbau und Szenarien“ verwiesen.

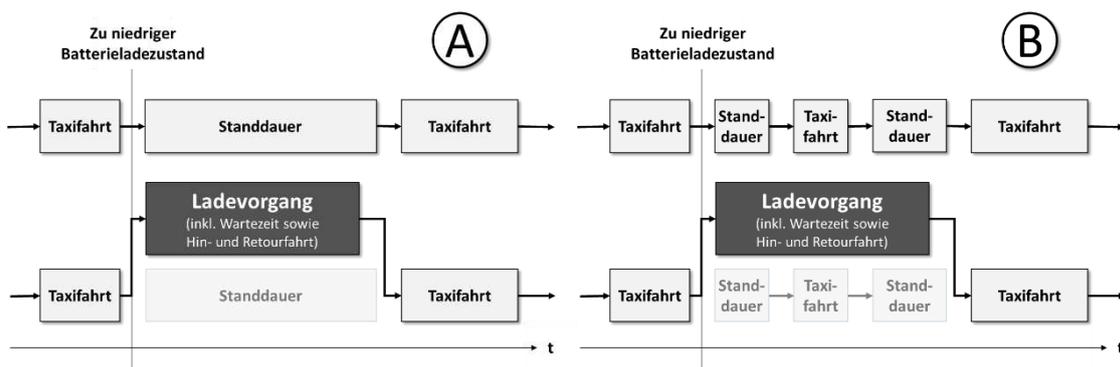


Abbildung 6-2: Schema „Einfügen eines Ladevorgangs“  
(links: Fall A – Standdauer reicht zum Laden, rechts: Fall B – Taxifahrt entfällt)

Unabhängig davon, ob Taxifahrten ausfallen oder nicht, nach Abschluss eines Ladevorgangs an einem „öffentlichen“ Ladepunkt fährt der/die E-Taxi-LenkerIn zu jenem TSP, an dem – laut der zugrundeliegenden Mobilitätsdaten – die nächste Taxifahrt startet. Dabei ist mit „nächste“ Taxifahrt jene darauffolgende Taxifahrt bezeichnet, die sowohl zeitlich als auch energetisch durchführbar ist.

<sup>135</sup> Die „Standdauer“ entspricht der Zeitspanne zwischen zwei Taxifahrten.

Dafür ist es jedenfalls notwendig, den Energiebedarf einer Taxifahrt bereits vor Fahrtantritt zu kennen. Im Rahmen der Simulation wird diese Information aus den generierten Mobilitätsdaten entnommen. In der Realität ist dies natürlich nicht so einfach möglich. Dennoch ist eine bestmögliche Abschätzung für den Energiebedarf der Taxifahrten im realen E-Taxibetrieb von hoher Relevanz, damit es während des Transports von Personen zu keinem Engpass bezüglich der noch vorhandenen Restreichweite kommt. Dies führt zwangsweise zu einer konsequenten, vorausschauenden Planung. Aber nicht nur der E-Taxilenker bzw. die E-Taxilenkerin muss hier entsprechend agieren, sondern auch die vorhandenen Vermittlungssysteme sind diesbezüglich anzupassen und zu erweitern.

### **SOC-Werte aktualisieren**

Wie bereits erläutert, spielt der Parameter „Batterieladezustand“ (SOC) eine wesentliche Rolle im Rahmen der technischen Machbarkeitsanalyse. Jeweils zu den Ereignissen „Ende der Taxifahrt“, „Ende des Ladevorgangs“ und „Ende der Standdauer“ wird der SOC des zugehörigen E-Taxis aktualisiert (siehe Abbildung 6-1).

Hierfür wird der Energiebedarf der Fahrt<sup>136</sup> (Antrieb + Nebenverbraucher) aber auch der auftretende Energiebedarf beim Warten am Taxistandplatz (u. a. Klimatisierung des PKW-Innenraums) berücksichtigt. Der Energiebedarf für Nebenverbraucher ist dabei vereinfacht mit einer konstanten Leistung von einem Kilowatt angenommen (siehe Kapitel 5.1.2 „Realisierung“). Der daraus resultierende Energiebedarf in kWh wird für beide Fälle „Fahren“ und „Stehen“ in Prozent der verbauten Batteriekapazität umgerechnet und vom SOC-Wert<sup>137</sup> des vorangegangenen Ereignisses subtrahiert. Muss hingegen ein Ladevorgang durchgeführt werden, dann ist der zugehörige SOC-Wert entsprechend der aufgenommenen Energiemenge zu erhöhen.

Wie bereits in Kapitel 2.3.3 „Ladecharakteristik“ beschreiben, basieren heutige Ladevorgänge hauptsächlich auf dem zweistufigen CCCV-Ladeverfahren. In der CC-Phase (Constant Current) wird die Batterie zuerst mit konstantem, maximal möglichem Strom<sup>138</sup> geladen. Dabei steigt die Zellspannung kontinuierlich an bis die Ladeschlussspannung  $U_{LS}$  und somit der Ladeumschaltpunktes  $s$  erreicht ist (vergleiche Abbildung 2-8).

---

<sup>136</sup> Dies betrifft konkrete Taxifahrten sowie Leerfahrten zwischen Taxistandplätzen und „öffentlicher“ bzw. „betrieblicher“ Ladeinfrastruktur oder betrieblichen Abstellplätzen ohne Lademöglichkeit.

<sup>137</sup> Der SOC-Wert ist von der gewählten Batteriekapazität des zugrundeliegenden Szenarios abhängig.

<sup>138</sup> Der maximale Strom wird allgemein durch die Gegebenheiten des E-Fahrzeugs begrenzt. Der Maximalstrom kann aber auch aufgrund von Limitationen der Ladestation bzw. durch Vorgaben des übergeordneten Ladestellenmanagementsystems noch weiter eingeschränkt werden.

Danach folgt zum Schutz vor „Überladung“ der Antriebsbatterie die CV-Phase (Constant Voltage). In dieser wird die Ladespannung konstant gehalten und der Ladestrom verringert sich allmählich. Bei Annahme eines strombasierten Abbruchkriteriums ist der Ladevorgang bei Erreichen des Ladeabschaltstromes  $I_{LS}$  vollständig abgeschlossen. Da die Batteriezellen nicht beliebig tief entladen bzw. hochgeladen werden dürfen, wird der Batterieladezustand nach unten bzw. oben durch  $SOC_{min}$  und  $SOC_{max}$  begrenzt<sup>139</sup> (siehe dazu Abbildung 2-10).

Tabelle 6-1: Definierte Parameterwerte der verwendeten Batterie-Ladecharakteristik für DC-Schnellladen mit 22 und 50 kW

Parametertyp	Formelzeichen	Parameterwert	
Konstantladeleistung	$P_{konst}$	22 kW	50 kW
Ladeumschaltpunkt	$s$	67 %	60 %
Minimaler Batterieladezustand	$SOC_{min}$	5 %	
Maximaler Batterieladezustand	$SOC_{max}$	95 %	
Ladeschlussspannung	$U_{LS}$	4,2 V	
Nennspannung	$U_N$	3,6 V	
Ladeabschlussstrom	$I_{LS}$	0,03 C-Rate <sup>140</sup>	
Ladewirkungsgrad	$\eta_L$	95 %	

<sup>139</sup> Nachfolgend wird bei Angabe eines Batterieladezustands in % oder p.u. jeweils der SOC-Wert bezogen auf die verbaute Batteriekapazität verstanden. Bei Ausnahmen wird explizit darauf hingewiesen.

<sup>140</sup> Wird der Ladevorgang auf Basis des Stromkriteriums beendet, dann ergibt sich laut [81] üblicherweise ein Ladeabschaltstrom zwischen 0,03 und 0,1 C-Rate. Dabei wird die Einheit der C-Rate in der Praxis meist in  $A / Ah = 1 / h$  angegeben.

Um das beschriebene CCCV-Ladeverfahren in der vorliegenden Arbeit zu berücksichtigen, werden die gemessenen Ladevorgänge aus Abbildung 2-9 herangezogen und die Verläufe durch die Parameterwerte der Tabelle 6-1 approximiert<sup>141</sup>.

Da der Spannungsanstieg während der CC-Phase relativ gering ausfällt, wird für die Simulation vereinfacht ein gleichbleibender Spannungswert angenommen. Zusammen mit dem konstanten Strom ergibt sich somit ebenfalls eine konstante Ladeleistung (Konstantladeleistung  $P_{konst}$ ). Darüber hinaus wird in der vorliegenden Arbeit die Ladeleistungsreduktion in der CV-Phase als exponentiell abklingend modelliert. Hiermit resultiert nach [38, 81, 82] folgender Zusammenhang für die netzseitige Ladeleistung  $P_L(t)$ .

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq s \quad \Rightarrow \quad P_L(t) = P_{konst} \quad (6.1)$$

$$s < SOC(t) \leq SOC_{max} \quad \Rightarrow \quad P_L(t) = P_{konst} \cdot e^{-\frac{s-SOC(t)}{k_L}} \quad (6.2)$$

Gemeinsam mit dem Ladewirkungsgrad  $\eta_L$  des Gleichrichters, der beim DC-Laden in der Ladestation verbaut ist, ergibt sich für den zeitlichen Verlauf des Batterieladezustands  $SOC(t)$  nachstehende Rekursionsgleichung.

$$SOC(t) = SOC(t-1) \cdot \frac{P_L(t) \cdot \Delta t}{E_{Batt}} \cdot \eta_L \quad (6.3)$$

Damit des Weiteren das Erreichen des Vollladezustandes der Batterie mit dem festgelegten Ladeabschaltstrom  $I_{LS}$  zusammenfällt, wird der Ladekorrekturfaktor  $k_L$  und die zugehörige Ladeabschaltleistung  $P_{LS}$  entsprechend den Formeln (6.4) und (6.5) definiert, wobei in der Ladeabschaltstrom  $I_{LS}$  in C-Rate und die verbaute Batteriekapazität  $E_{Batt}$  in kWh einzufügen sind.

$$k_L = \frac{100 - s}{\ln\left(\frac{P_{konst}}{P_{LS}}\right)} \quad (6.4)$$

$$P_{LS} = \frac{U_{LS}}{U_N} \cdot I_{LS} \cdot E_{Batt} \quad (6.5)$$

<sup>141</sup> Ladevorgänge werden ebenfalls durch die thermischen Eigenschaften der Batterie beeinflusst. Die damit verbundenen Effekte wie z. B. die Veränderung der nutzbaren Batteriekapazität werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch aufgrund der Komplexität vernachlässigt.

Abbildung 6-3 zeigt zwei DC-Schnellladevorgänge für 22 und 50 kW unter Verwendung der erläuterten Formeln und den aus Abbildung 2-9 abgeleiteten Parameterwerten. Dabei stellt die Ladeleistung  $P_L(t)$  die netzseitige Summe der einzelnen Phasenwirkleistungen dar. Ergänzend zu den Ladeleistungsverläufen (durchgezogen) sind in Abbildung 6-3 zusätzlich die Batterieladezustandsverläufe (strichliert) eingetragen. Der verbauten Batteriekapazität  $E_{Batt}$  liegt hierbei ein Wert von 24 kWh zu Grunde. Dies entspricht einer nutzbaren Batteriekapazität von ca. 21,6 kWh.

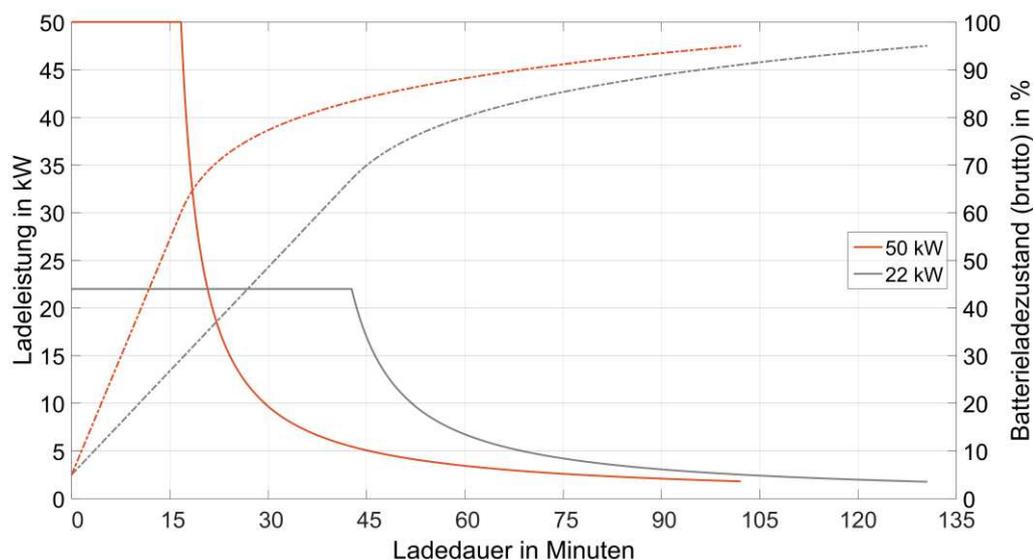


Abbildung 6-3: Modellierte Ladevorgänge für DC-Schnellladen (22 und 50 kW); verbaute Batteriekapazität: 24 kWh; (Primärachse: durchgezogen; Sekundärachse: strichliert)

Um die Verschiebung des Ladeumschaltpunktes  $s$  in Abhängigkeit verschiedener Ladeleistungsklassen berücksichtigen zu können, werden die approximierten Ladeumschaltpunkte aus Tabelle 6-1 entnommen und folgende logarithmische Gleichung im Zusammenhang mit der Konstantladeleistung  $P_L$  formuliert. Dadurch ergibt sich für 1-phasiges AC-Laden mit 3,7 kW ein Ladeumschaltpunkt  $s$  von ca. 80 % und für 150 kW DC-Ultra-Schnellladen etwa 50 %. Somit können mit Hilfe der Formel (6.6) im Rahmen der Simulationen nicht nur Ladevorgänge verschiedener Batteriekapazitäten, sondern auch unterschiedlicher Ladeleistungsklassen, einkalkuliert werden.

$$s = -0,074 \cdot \ln(P_{konst}) + 0,894 \quad (6.6)$$

Wie sich aus Abbildung 6-3 entnehmen lässt, sinkt die „Ladegeschwindigkeit“ nach Erreichen des Ladeumschaltpunktes deutlich ab. Um beispielsweise von 10 % auf 60 %

zu gelangen dauert es bei 50 kW etwa 15 Minuten. Für die nächsten 20 % wird ungefähr dieselbe Zeitspanne benötigt. Dies entspricht bereits einer Reduktion der „Ladegeschwindigkeit“ um den Faktor 2,5. Im Vergleich zu 22 kW nimmt der zeitliche Vorteil der höheren Ladeleistung aufgrund des vorgezogenen Umschaltpunktes im oberen SOC-Bereich ab. Ein Ladevorgang zwischen 60 % und 80 % dauert für 22 kW nur unwesentlich länger.

Auch wenn durch die Annahme eines exponentiellen Abklingterms die Leistungsreduktion im Vergleich zur Praxis etwas rascher abläuft, verdeutlichen die angeführten Werte den überproportional hohen zeitlichen Mehraufwand, der sich ergibt, wenn die Batterie wirklich vollgeladen werden soll. Da jede zusätzliche Standdauer gleichsam eine Reduktion der Einnahmen für den/die E-TaxilenkerIn bedeutet, muss die Ladedauer so gering wie möglich gehalten werden. Deshalb erscheint es als sinnvoll, die Ladevorgänge vorzeitig abzubrechen<sup>142</sup>, um nicht unnötig Zeit beim Laden mit geringer „Ladegeschwindigkeit“ zu vergeuden. Dies hat jedoch eine höhere Anzahl an Ladevorgängen zur Folge.

Darüber hinaus sind Ladevorgänge nicht nur mit der eigentlichen Ladedauer verknüpft, sondern auch mit der Dauer für Hin- und Rückfahrt sowie gegebenenfalls mit einer zusätzlichen Wartezeit an der Ladestation bis zum Freiwerden des reservierten Ladepunkts. Demzufolge muss die gesamte, notwendige Zeitdauer und nicht nur die reine Ladedauer berücksichtigt bzw. entsprechend minimiert werden.

Bei zeitunkritischen Ladevorgängen wie z. B. an betrieblichen Ladestationen, während sich die E-Fahrzeuge außer Betrieb befinden, kann hingegen die Batterie vollständig aufgeladen und zusätzlich die eingesetzte Ladeleistung entsprechend reduziert werden. Dies minimiert einerseits die Infrastrukturkosten und maximiert andererseits die verfügbare Reichweite bei Beginn der nächsten E-Taxischicht.

Überdies zeigen weiterführende Analysen, dass ein Vorschreiben von möglichen „Ladeverpflichtungen“ (z. B. bei Unterschreiten eines Batterieladezustands von 30 %) nicht zielführend ist. Im Einzelfall senken vorgezogene Ladevorgänge das Risiko eine KundInnenfahrt aufgrund zu geringer Reichweite ablehnen zu müssen. Generell wird durch eine vorgeschriebene „Ladeverpflichtung“ die nutzbare Batteriekapazität lediglich eingeschränkt, wodurch die Anzahl der erforderlichen Ladevorgänge unnötig steigt und

---

<sup>142</sup> Durchgeführte Analysen zeigen, dass es unter den hier definierten Rahmenbedingungen empfehlenswert ist, Ladevorgänge ab einem Batterieladezustand von etwa 65 % vorzeitig zu beenden. Dieser Wert wird in den nachfolgenden Simulationen als Abbruchkriterium für Ladevorgänge an öffentlichen Ladestationen herangezogen.

ein negativer Gesamteinfluss entsteht. Mögliche „Ladeverpflichtungen“ werden daher in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet.

Auf Basis der beschriebenen Vorgehensweise kann nun während des gesamten Simulationsablaufs der SOC stets aktuell gehalten und somit Aussagen über die Machbarkeit getroffen werden. Darüber hinaus ist durch die Formeln (6.1) und (6.2) der Ladeleistungsverlauf bekannt, der wiederum Auskunft über die resultierende Netzbelastung gibt (vergleiche dazu Kapitel 7 „Auswirkungen auf das elektrische Verteilernetz“).

#### 6.1.4 Simulationsdaten speichern

Im Rahmen des Simulationsablaufs werden zu den bereits bekannten Mobilitätsdaten der E-Taxis und den initial gewählten Rahmenbedingungen alle auftretenden Ereignisse und deren Eigenschaften protokolliert. Dazu gehören:

- Beginn und Ende der Ladevorgänge
- Ladestandort sowie Warte- und Ladedauer,
- aufgenommene Energiemenge und zugehöriger SOC,
- Batterieladezustand zu Beginn und Ende aller Taxifahrten sowie
- Durchführbarkeit bzw. Ablehnungsgrund jeder einzelnen Taxifahrt

Wie bereits erklärt, erfolgt die Auswahl des Ladepunktes für einen konkreten Ladevorgang auf Basis der Summe aus Anfahrtszeit zur Ladestation und Wartedauer an der Ladestation. Diesbezüglich wird das Minimum ermittelt und der ausgewählte Ladepunkt explizit für das E-Taxi mit „Ladewunsch“ bis zum Eintreffen reserviert.

Dafür wird ein entsprechendes Register benötigt, in dem die aktuellen Statuswerte aller Ladepunkte laufend aufgezeichnet werden. Damit ist es möglich, in jedem Simulations-schritt die Reservierungen, Wartezeiten und Belegungen zu prüfen und zu aktualisieren.

Nach Beenden der Simulation sind hiermit alle relevanten Informationen bekannt, um daraus repräsentative Erkenntnisse ableiten zu können. Diese beziehen sich jedoch lediglich auf das zugrundeliegende Szenario. Um hingegen unterschiedlichste Blickwinkel einzunehmen, wird nicht nur eine bestimmte Simulation durchgeführt, sondern nachfolgend eine Vielzahl von komplementären Szenarien betrachtet.

## 6.2 Ladeinfrastrukturausbau und Szenarienentwicklung

Bevor jedoch die Auswirkungen einer Umstellung auf rein elektrisch betriebene E-Taxis untersucht wird, soll zunächst der Frage nachgegangen werden, wie ein sinnvoller Ladeinfrastrukturausbau aussehen könnte.

Allgemein sind dabei in Bezug auf den Ladeinfrastrukturausbau zwei wesentliche Herangehensweisen zu unterscheiden:

- Flächendeckend
- Bedarfsgerecht

Unter „bedarfsgerecht“ wird nach [30] eine ausreichende Anzahl verfügbarer Ladepunkte verstanden, die den tatsächlichen Strombedarf zum Laden der Antriebsbatterien vorhandener – aber auch zukünftiger – elektrisch betriebener Fahrzeuge deckt, und zwar dort, wo er anfällt. Somit ist eine „bedarfsgerechte“ Ladeinfrastruktur von einer „flächendeckenden“ Ladeinfrastruktur klar zu unterscheiden. Bei einem „flächendeckenden“ Ladeinfrastrukturausbau werden die Ladepunkte sozusagen räumlich gleichverteilt und Ladestationen womöglich auch dort errichtet, wo gar kein Bedarf besteht. Eine „flächendeckende“ Ladeinfrastruktur geht – zumindest aus heutiger Sicht – über den tatsächlichen Bedarf hinaus. Der Wunsch nach einer „flächendeckenden“ Ladeinfrastruktur liegt nach [30] vermutlich in bestehenden Reichweitenängsten begründet und scheint vielmehr ein „Bedürfnis“ als ein tatsächlicher Bedarf zu sein.

Infolge der genannten Argumente wird in der vorliegenden Arbeit eine „flächendeckende“ Ladeinfrastruktur (LIS) lediglich für Vergleichszwecke herangezogen und der „bedarfsgerechte“ LIS-Ausbau als primärer Entwicklungspfad angesehen.

Um jedoch eine „bedarfsgerechte“ Ladeinfrastruktur zu erlangen, sind zunächst folgende Fragen zu beantworten [30]:

- Wo? (Standorte und Verortung der Ladeinfrastruktur)
- Was? (Welche Technik, z. B. AC- oder DC-Laden)
- Wann? (Zeitlicher Horizont bzw. Zukunftssicherheit der Infrastruktur)
- Wie viel? (Anzahl der aufzubauenden Ladepunkte)
- Für wen? (Nutzergruppen bzw. Anwenderfälle, Authentifizierung)

Die Frage „Für wen?“ lässt sich aufgrund des Fokus der vorliegenden Arbeit rasch beantworten. Der hier betrachtete Ladeinfrastrukturausbau soll einen ausfallfreien E-Taxibetrieb im urbanen Raum gewährleisten und die TaxilenkerInnen bei einem Umstieg auf rein elektrisch betriebene Taxifahrzeuge unterstützen. Da der tatsächliche Strombedarf mit der Anzahl der E-Taxis ansteigt, ist es jedenfalls sinnvoll den LIS-Ausbaugrad schrittweise mit der Durchdringungsrate an E-Taxis auszurollen. Jedoch sollte dabei das Angebot an Ladeinfrastruktur stets gewisse Reserven für einen zukünftigen Bedarf aufweisen, denn eine Errichtung von Ladestationen im urbanen Raum kann mitunter auf deutliche bauliche und bürokratische Hürden stoßen. Im Rahmen der nachfolgenden technischen Machbarkeitsanalyse sind die Fragen „Wann?“

und „Wie viel?“ untrennbar mit der Anzahl an E-Taxis verbunden und werden durch die Betrachtung unterschiedlicher Hochlauf- und Ausbau-Szenarien berücksichtigt.

Die Frage „Was?“ umfasst zumindest die Auswahl von Ladetechnologie, Ladebetriebsart und Ladeleistungsklasse (vergleiche Kapitel 2.3 „Ladeinfrastruktur“). In der vorliegenden Arbeit wird primär kabelgebundenes, leitendes Laden mittels Ladebetriebsart 3 (AC-Laden) und Ladebetriebsart 4 (DC-Laden) betrachtet. Jedoch können die Ergebnisse der technischen Machbarkeitsanalyse ohne große Mühen auf andere Ladesysteme (wie z. B. leitende Andocksysteme oder induktive Unterbodenladesysteme) übertragen werden, da vorwiegend die Ladeleistungsklasse – unabhängig vom tatsächlichen Ladesystem – von höchster Relevanz ist. Durch die Aufnahme verschiedener Ladeleistungsklassen (wie z. B. AC 11 kW oder DC 50 kW) kann der Einfluss unterschiedlicher „Ladegeschwindigkeiten“ (in kWh pro Zeiteinheit) auf die technische Machbarkeit eruiert werden.

Um die letzte Frage, jene nach dem „Wo?“, ebenfalls in ausreichender Qualität beantworten zu können, ist der Energiebedarf der E-Taxis zuvor zu identifizieren und zu quantifizieren. Ist dies bewerkstelligt, so kann dieser in der Ausbauplanung berücksichtigt werden.

Im vorliegenden Fall ist der Energiebedarf der betrachteten E-Taxis zwar in den stochastisch generierten Mobilitätsdaten enthalten, es ist jedoch noch zu analysieren, wie sich der Energiebedarf über das Einsatzgebiet<sup>143</sup> verteilt und welche zeitliche Abhängigkeiten bestehen.

Für die konkrete Erhebung wird das Wiener Stadtgebiet<sup>144</sup> sowie das angrenzende Umland zunächst in  $25 \times 34$  gleichseitige Sechsecke mit einem Inkreisradius von je 500 m unterteilt<sup>145</sup> und der sich dadurch ergebende Sechseckraster (insg. 850 Hexagone und ca. 736 km<sup>2</sup>) auf einer flachen, zweidimensionalen Landkarte<sup>146</sup> abgebildet. Auf-

---

<sup>143</sup> Im betrachteten Beispiel „Stadt Wien“ umfasst das Einsatzgebiet vorwiegend die 23 Wiener Gemeindebezirke sowie das angrenzende Umland (inkl. Flughafen Wien).

<sup>144</sup> Die Stadt Wien erstreckt sich auf einer Fläche von 415 km<sup>2</sup> [122].

<sup>145</sup> Die Mittelpunkte angrenzender Sechsecke sind somit stets 1.000 Meter voneinander entfernt.

<sup>146</sup> Das verwendete Kartenmaterial beruht auf dem geodätischen Referenzsystem „World Geodetic System of 1984“ (kurz WGS 84 oder EPSG:4326) und einer Mercator-Projektion.

grund der relativ geringen Ausdehnung des aufgespannten Rasters werden die Verzerrungen durch die dreidimensionale Oberfläche der Erde (Rotationsellipsoid) vernachlässigt<sup>147</sup>.

Anschließend erfolgt das Eintragen der bestehenden Taxistandplätze im Sechseckraster sowie eine Zuordnung zwischen den Hexagonen und den darin vorkommenden TSP (siehe Abbildung 6-4, links). Einen illustrativen Überblick häufig frequenter Bereiche bietet hingegen der rechte Teil der Abbildung 6-4. Das in Form einer „Heatmap“ dargestellte Diagramm zeigt die Häufigkeit der Start- und Zielpunkte (vom/zum Taxistandplatz) aller Taxifahrten je Hexagon. Es ergibt sich analog zur Aufteilung der Taxistandplätze ein heterogenes Bild mit einer Verdichtung in Richtung Innenstadt, jedoch mit einigen markanten Bereichen in den Randbezirken.



Abbildung 6-4: Verteilung der Wiener Taxistandplätze (links) und Überlagerung der Start- und Zielpunkte (TSP) der Taxifahrten (rechts)

### 6.2.1 Optimierte Ladestandortauswahl

Auf Basis der Häufigkeitsverteilung aus Abbildung 6-4 wird in der vorliegenden Arbeit ein optimierter Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur (LIS) für E-Taxis durchgeführt und je nach Szenario die zugehörige Anzahl an LIS-Standorten entsprechend der nachstehenden Zielfunktionen am Sechseckraster verteilt.

---

<sup>147</sup> Durch diese Vernachlässigung entsteht für das hier aufgespannte HEX-Feld im Vergleich zur Abstandsberechnung mittels Haversine-Formel (Orthodrome) ein Fehler von rund 2 %.

Die zum „flächendeckenden“ LIS-Ausbau gewählte Zielfunktion lautet dabei wie folgt:

*„Minimierung des größten Abstands zum nächsten LIS-Standort“.*

Durch diese Strategie wird die Ladeinfrastruktur derart am Sechseckraster angeordnet, dass der größte Abstand (Luftlinie) aller „freien“ Sechsecke zum nächstgelegenen Hexagon mit Ladeinfrastruktur ein Minimum einnimmt. Wird dabei im Rahmen der Optimierung sukzessive der aktuell größte Abstand verkleinert, so ergibt sich schlussendlich eine relativ gleichmäßige Verteilung der LIS-Standorte.

In Bezug auf E-Taxis ergibt sich speziell dort ein hoher Bedarf an Ladeinfrastruktur, wo viel Nachfrage vorherrscht und somit überwiegend in der Nähe von stark frequentierten Taxistandplätzen. Dies bedeutet, dass in diesem Fall die Anfahrtswege von stärker frequentierten TSP zu geplanten LIS-Standorten tendenziell kürzer sein sollten.

Aus diesem Grund wird für den „bedarfsgerechten“ Ausbau der Ladeinfrastruktur die folgende Zielfunktion formuliert:

*„Minimierung der gewichteten Anfahrtswege zu den LIS-Standorten“.*

Durch eine entsprechende Gewichtung der Distanzen<sup>148</sup> auf Basis der Anfahrtsfrequenzen (analog zu Abbildung 6-4, rechts) kann der im Stadtgebiet schwankende Energiebedarf angemessen in der Optimierung berücksichtigt werden. Schlussendlich soll mit dieser Vorgehensweise – im Vergleich zum „flächendeckenden“ LIS-Ausbau – eine im Mittel kürzere Anfahrt zur Ladeinfrastruktur erzielt und damit die Effizienz und Akzeptanz erhöht werden.

Generell führt die hier beschriebene Aufgabenstellung eines optimierten Ladeinfrastrukturausbaus zu einem kombinatorischen Optimierungsproblem. Die Anzahl aller möglichen Lösungen lässt sich bei einem Raster mit insgesamt  $n$  Sechsecken und  $k$  LIS-Standorten mit Hilfe des Binomialkoeffizienten wie folgt berechnen:

$$\binom{n}{k} = \frac{n!}{k! \cdot (n - k)!} \quad (6.7)$$

Das naive Verfahren, alle möglichen Hexagon-Kombinationen durchzuprobieren, resultiert bei einem aufgespannten Feld von  $25 \times 34$  Sechsecken und beispielsweise 10 LIS-Standorten bereits in  $5,14 \cdot 10^{22}$  unterschiedliche Lösungen. Da der hierfür erforderliche Rechenaufwand für die zur Verfügung stehenden Ressourcen jedenfalls zu

---

<sup>148</sup> Vereinfacht wird zur Abschätzung der Anfahrtswege (zu den jeweiligen Ladestationen) die Luftlinie zwischen den Mittelpunkten der beiden relevanten Sechsecke herangezogen und unter Zuhilfenahme des Satzes von Pythagoras ermittelt.

umfangreich ist, wird in der vorliegenden Arbeit ein evolutionsstrategisches Optimierungsverfahren eingesetzt.

Der zugrundeliegende Algorithmus bildet die in der Natur vorkommenden Evolutionsprinzipien „Mutation“, „Rekombination“ und „Selektion“ mit dem Ziel ab, jene Erbanlagen zu finden, die ein Individuum am besten dazu befähigen, mit den gegebenen Bedingungen zurecht zu kommen (vergleiche u. a. [83]). Der Algorithmus und die zugehörige Simulation werden in der vorliegenden Arbeit unter Zuhilfenahme der Softwareumgebung MATLAB<sup>®</sup> durchgeführt.

Allgemein bestehen evolutionäre Algorithmen aus einer Population von Individuen mit gleichartiger Genomstruktur, wobei ein Genom bzw. Chromosom wiederum aus einzelnen Genen aufgebaut ist [83]. Im vorliegenden Fall werden die Gene durch unterschiedliche LIS-Standorte repräsentiert. Wird beispielsweise ein Ausbaugrad von 10 LIS-Standorten betrachtet, so setzt sich die Genomstruktur aus genau 10 Genen zusammen.

Das Optimierungsverfahren verläuft dabei iterativ durch Bildung von neuen Generationen. Beginnend bei der ersten Generation (Urpopulation) werden die Nachkommen entweder durch „Replikation“ oder „Rekombination“ erzeugt. Bei der Replikation wird ein Individuum der Elterngeneration lediglich kopiert. Hingegen erfolgt bei der „Rekombination“ eine Kreuzung zwischen den Chromosomen der beiden zufällig ausgewählten Eltern. Ebenfalls zufallsbasiert werden die Gene der Eltern entweder durchmischt und dann neu auf zwei Nachkommen verteilt (direkte paarweise Rekombination) oder durch Mittelung<sup>149</sup> der (Eltern-)Chromosomen ein neues Individuum gebildet (intermediäre paarweise Rekombination). [83]

Um eine Variation der Population zu realisieren und somit im Rahmen der Optimierung das Überwinden von lokalen Optima zu ermöglichen, erfolgt eine entsprechende Mutation der Nachkommen. Diese wird durch die zufällige Auswahl von neuen LIS-Standorten in einem gewissen Umkreis der zu ändernden Gene durchgeführt. Dabei müssen sich im betrachteten Fall alle Gene eines Chromosoms voneinander unterscheiden: Kein LIS-Standort darf mehrmals vorkommen.

Im Anschluss an die Mutation der Nachkommen findet die Selektion der neuen Generation statt, wodurch die Richtung des Evolutionsprozesses vorgegeben wird. Hierbei ist zuerst auf Basis der zugrundeliegenden Zielfunktion eine Bewertung durchzuführen und

---

<sup>149</sup> Die Mittelung erfolgt durch die Berechnung der Luftlinien-Mittelpunkte zwischen den einzelnen LIS-Standorten (Gene) der Eltern.

damit die „Fitness“ jedes einzelnen Individuums festzustellen. Danach erfolgt die eigentliche Selektion. Aus der Gesamtheit der  $k$  Eltern und  $j$  Nachkommen<sup>150</sup> werden die  $k$  „fittesten“ Individuen ausgewählt und zu neuen Eltern gemacht („ $m + n$ “-Strategie, [83]). Sie repräsentieren somit die neue Generation der Population. Auf diese Art und Weise werden so lange neue Generationen erzeugt, bis das hier festgelegte Abbruchkriteriums einer maximalen Anzahl an Generationen erreicht ist und damit der Evolutionsprozess endet.

Tabelle 6-2: Gewählte Einstellungen für die evolutionsstrategische Optimierung

Parameter	Wert / Beschreibung
Anzahl der Eltern	1.000
Anzahl der Nachkommen	10.000
Anzahl an Generationen	1.000
Anzahl an Wiederholungen des Evolutionsprozesses	2.000
Replikationsrate	80 %
Rekombinationsrate	20 %
Rekombinationsstrategien	Direkte und intermediäre paarweise Rekombination (gleichwahrscheinlich)
Mutationsstrategie	Manipulation einer zufälligen Anzahl an Genen (gleichverteilt)
Suchraum für Mutation	80 % der Suchen im Umkreis von 3 km 20 % der Suchen im gesamter Sechseckraster
Selektionsstrategie	Die „fittesten“ Individuen aus Eltern und Nachkommen werden zu neuen Eltern („ $m + n$ “-Strategie)
Bildung der Urpopulation	Zufällige Wahl aus dem gesamten Sechseckraster (gleichverteilt)
Randbedingung	Die Gene eines Chromosoms müssen sich im Wert stets voneinander unterscheiden *)

\*) Kein LIS-Standort darf mehrmals vorkommen.

<sup>150</sup> Nach [121] sollte die Bedingung  $j \geq 6 \cdot m$  erfüllt sein.

Auf Basis diverser Versuchsreihen und quantitativer Bewertungen wurden das Abbruchkriterium, die Anzahl der Eltern und Nachkommen, die Wahrscheinlichkeiten für „Replikation“ und „Rekombination“ sowie die Streuung der „Mutation“ schrittweise verbessert und festgelegt. Die endgültigen Einstellungen sind in Tabelle 6-2 zusammengefasst.

Unter Verwendung der beschriebenen evolutionsstrategischen Optimierung der beiden Zielfunktionen sowie der Einstellungen von Tabelle 6-2 wird für jede gewählte Ausbaustufe (20 bis 400 LIS-Standorte) eine möglichst optimale Verteilung der Ladestandorte berechnet. Dabei kommen – analog zu einer realen Umsetzung – neue LIS-Standorte zusätzlich zu den bestehenden LIS-Standorte hinzu, wodurch sich ein kontinuierlicher LIS-Ausbau ergibt.

Die jeweils besten erzielten Lösungen für einen „flächendeckenden“ sowie „bedarfsgerechten“ LIS-Ausbau sind in Abbildung 6-5 beispielhaft für 20 Standorte dargestellt. Aufgrund der definierten Zielfunktion ergibt sich für den „flächendeckenden“ LIS-Ausbau eine homogene Gleichverteilung, wodurch auch LIS-Standorte in kaum besiedelten Gebieten wie im Bereich des Wienerwaldes oder den Donau-Auen ausgewählt werden. Hingegen verläuft die Anordnung der „bedarfsgerechten“ LIS-Standorte größtenteils an den Hauptverkehrsadern von Wien und verdichtet sich in Richtung Stadtkern.

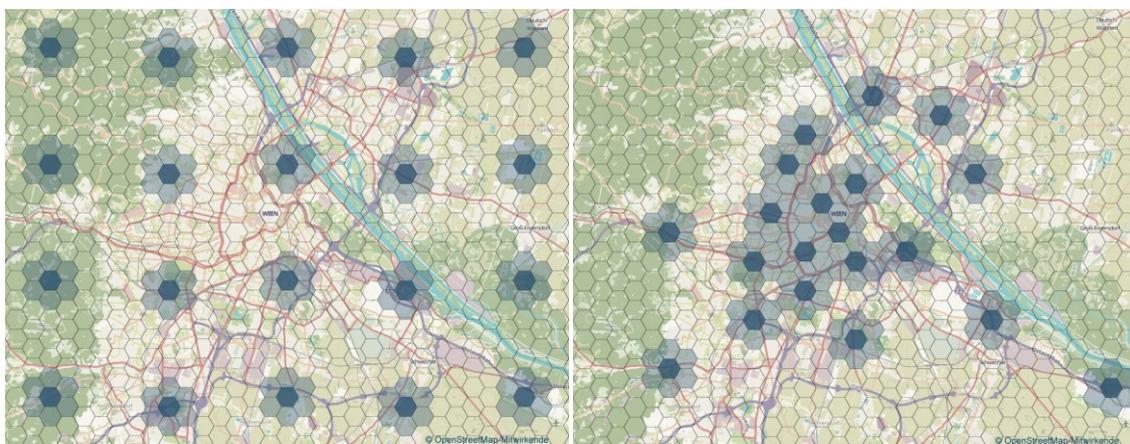


Abbildung 6-5: Optimierte Verteilung für einen LIS-Ausbau mit 20 Standorten  
„flächendeckend“ (links) und „bedarfsgerecht“ (rechts)

Um die Unterschiede der Ergebnisse beider Zielfunktionen noch genauer herauszuarbeiten, stellt Abbildung 6-6 und Abbildung 6-7 die maximalen sowie mittleren Distanzen („Luftlinie“) aller TSP bis zum jeweils nächstgelegenen LIS-Standort in Abhängigkeit der

Gesamtanzahl an Ladestandorten dar. Trivialerweise sinken die Distanzen monoton mit Erhöhung des LIS-Ausbaugrades und streben gegen den Grenzwert von 500 m<sup>151</sup>.

Für eine niedrige Anzahl an LIS-Standorten ergibt sich für den „flächendeckenden“ LIS-Ausbau ein geringerer Wert in Bezug auf die maximale Distanz (siehe Abbildung 6-6). Damit lässt sich zwar die eingangs erwähnte Reichweitenangst – die stets den „schlimmsten Fall“ betrifft – argumentativ verringern, jedoch sind die mittleren Distanzen in jedem Fall höher als bei einem „bedarfsgerechten“ LIS-Ausbau (vergleiche Abbildung 6-7).

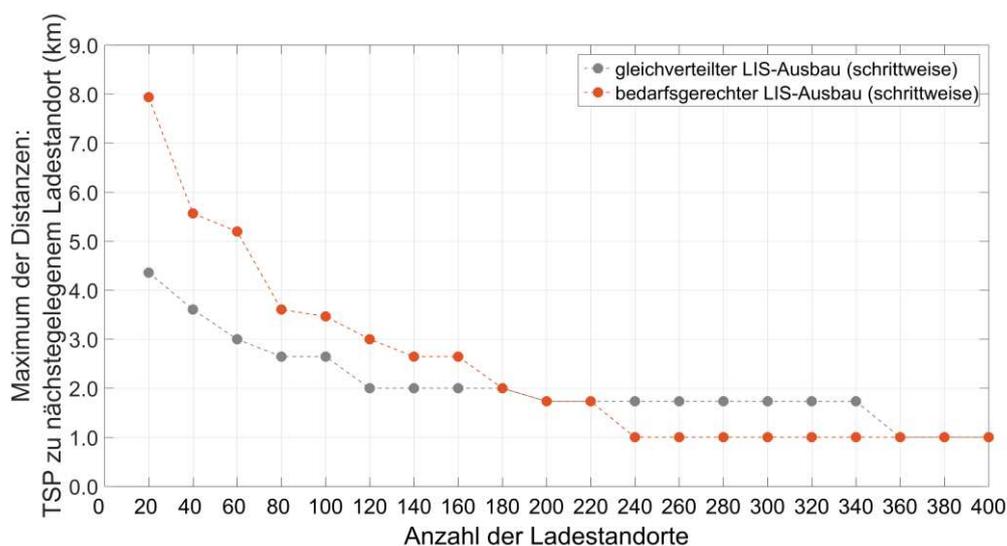


Abbildung 6-6: Maximale Distanz („Luftlinie“) zwischen TSP und dem nächstgelegenen LIS-Standort in Abhängigkeit der Gesamtanzahl an Ladestandorten

Werden weiters die Ergebnisse für verschiedenen Schrittweiten der LIS-Ausbaustufen miteinander verglichen, so zeigt sich, dass eine hinreichende Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen zielführend ist. Wird im Rahmen der Optimierung eine größere Anzahl an neuen LIS-Standorten schrittweise hinzugefügt, ergeben sich in Summe bessere Ergebnisse, als wenn je Optimierung jeweils nur ein einziger LIS-Standort hinzukommt.

Aus diesem Grund ist die Schrittweite der LIS-Ausbaustufen in der vorliegenden Arbeit mit 20 LIS-Standorten festgelegt. Ungeachtet dessen wird für die nachfolgende Analyse

<sup>151</sup> Für TSP und Ladestandorte, die sich gemeinsam innerhalb eines einzelnen Clusters befinden, wird die Distanz zwischen TSP und LIS vereinfacht mit 500 m angenommen.

eine Priorisierung der neuen LIS-Standorte durchgeführt. Die Reihung erfolgt dabei auf Basis des Potenzials je LIS-Standort das er zur Minimierung der Zielfunktion besitzt.

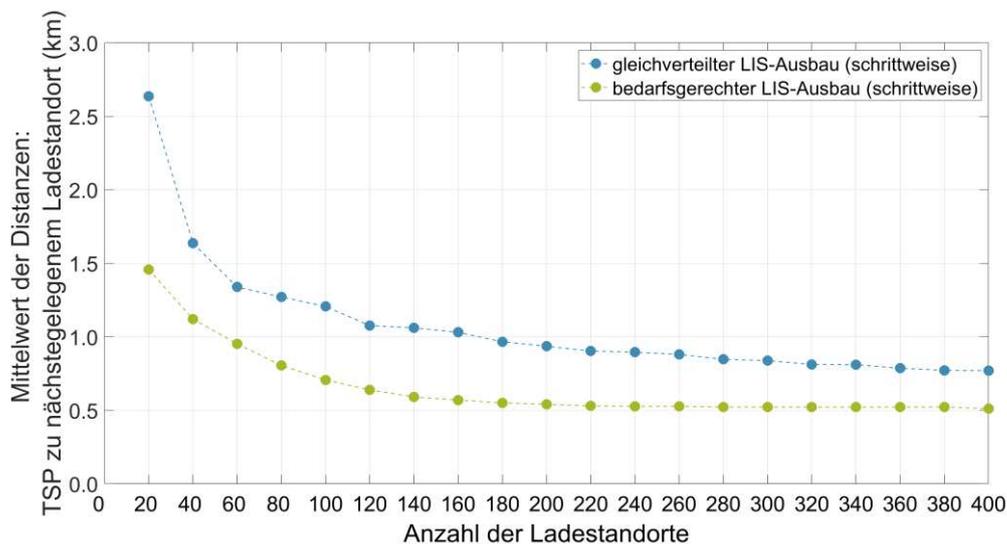


Abbildung 6-7: Mittlere Distanz („Luftlinie“) zwischen TSP und dem nächstgelegenen LIS-Standort in Abhängigkeit der Gesamtanzahl an Ladestandorten

Die ermittelten LIS-Standorte des optimierten Ladeinfrastrukturausbaus werden nachfolgend im Rahmen der Simulationen für die technische Machbarkeitsanalyse herangezogen. Dabei wird u. a. bewertet welche Anzahl an LIS-Standorten für welchen Durchdringungsgrad an E-Taxis und unter welchen Rahmenbedingungen sinnvoll ist. Zunächst wird jedoch noch näher auf die Auswahl der zu betrachtenden Szenarien eingegangen.

### 6.2.2 Szenarienauswahl

Wie bereits im Kapitel 6.1 erläutert, wird im Rahmen der Simulationen für jede einzelne Taxifahrt ermittelt, ob sie „rein elektrisch“ durchführbar ist. Reicht die Batteriekapazität für die gesamte Taxifahrt aus, dann kann sie ohne Weiteres angenommen werden. Ist der aktuelle Batterieladezustand jedoch zu niedrig, muss die Taxifahrt abgelehnt werden und gilt in der vorliegenden Arbeit als nicht durchführbar. Der entsprechende Ablehnungsgrund (wie z. B. Batteriekapazität zu klein oder Ladevorgang noch nicht abgeschlossen) wird dabei für spätere Auswertungen protokolliert.

Je nach zugrunde gelegten Rahmenbedingungen ergibt sich daraus ein höherer oder niedrigerer Anteil an durchführbaren Taxifahrten an der Gesamtheit aller betrachteten Taxifahrten. Wie in Kapitel 5 „Generierung einer gesamten E-Taxiflotte“ beschrieben,

wird als sinnvoller Betrachtungszeitraum ein Kalenderjahr angesehen. Auf Basis dessen umfassen die generierten Mobilitätsdaten für eine Flottengröße von max. 4.500 E-Taxis insgesamt 17,5 Millionen individuelle Taxifahrten.

Werden beispielsweise als Simulationsergebnis 90 % der Gesamtheit aller Taxifahrten als durchführbar ermittelt, dann müssen dennoch 1,75 Millionen Taxifahrten abgelehnt werden. Da dieser Wert stark vom betrachteten Szenario und den zugehörigen Rahmenbedingungen abhängt, wird nachfolgend eine entsprechende Auswahl an komplementären Szenarien getroffen und die resultierenden Ergebnisse miteinander verglichen. Vorrangig beeinflussen dabei folgende Parameter und ihre verschiedenen Ausprägungsformen den aufgespannten Szenarienrahmen:

- Anzahl der betrachteten Flottengröße/E-Taxis
- Batteriekapazität der E-Taxis
- Maximale Ladeleistung je Ladepunkt
- Anzahl der Ladepunkte je LIS-Standort
- Anzahl und Verortung der Ladestandorte

Für die Anzahl der betrachteten E-Taxis wurde als obere Grenze bereits eine Flottengröße von 4.500 E-Taxis festgelegt. Da allgemein die Umstellung von konventionell angetriebenen PKW auf rein batteriebetriebene Fahrzeuge einem langwierigen Prozess gleicht, werden zumindest drei Durchdringungsvarianten von 500, 2.500 und 4.500 E-Taxis betrachtet.

Ähnliches gilt für die verbaute Batteriekapazität der am Markt erhältlichen E-Fahrzeuge. Diese hat sich in der Vergangenheit – getrieben durch die Reichweitenthematik – sukzessive vergrößert und wird aufgrund des technologischen Fortschritts auch zukünftig noch gesteigert werden. Angesichts dessen werden für die verbaute Batteriekapazität zwei Varianten in die Betrachtungen aufgenommen: 40 und 80 kWh.

Die drei noch ausstehenden Parameter beziehen sich in erster Linie auf die Ausprägung der „öffentlichen“ Ladeinfrastruktur. Aktuell unterstützen die meisten E-Fahrzeuge sowie DC-Schnellladestationen Ladeleistungen von maximal 50 kW. Damit die Ladedauer für immer größere Batteriekapazitäten zumindest gleich bzw. sogar abnimmt, werden die verwendeten DC-Schnellladesysteme wie CHAdeMO oder Combo in Richtung höherer Ladeleistungen weiterentwickelt (vergleiche dazu Kapitel 2.3 „Ladeinfrastruktur“). Um die Auswirkungen einer höheren „Ladegeschwindigkeit“ zukünftiger Ladestationen und E-Fahrzeugmodelle auf den E-Taxibetrieb ermitteln zu können, wird in den betrachteten Szenarien eine Verdopplung der maximalen Ladeleistung auf 100 kW berücksichtigt.

Darüber hinaus muss entsprechend der Steigerungsrate der E-Taxi-Durchdringung auch die Ladeinfrastruktur in gleichem Ausmaß dem erweiterten Bedarf gerecht werden. Für

den Ausbau der notwendigen Ladepunkte können zumindest drei Vorgangsweisen unterschieden werden: Entweder wird die Anzahl der Ladestandorte erhöht, die Anzahl der Ladepunkte je Ladestandort erweitert oder eine Kombination aus beiden kommt zum Einsatz. In der vorliegenden Arbeit werden diesbezüglich bis zu zwei Ladepunkte je Ladestandort berücksichtigt und eine Abschätzung der dafür notwendigen Anzahl an LIS-Standorten in Abhängigkeit der verschiedenen Szenarien vorgenommen.

Tabelle 6-3: Definition und Parameterwerte der Basis- und Alternativszenarien

Parameter	Basic	Option 100 kW	Option 2 EVSE	Public
Anzahl an E-Taxis	500, 2.500 oder 4.500 E-Taxis („low“, „mid“, „high“)			
Batteriekapazität	40 oder 80 kWh (z. B. „Basic 40“)			
Batteriecharakteristik und Ladeverfahren	CCCV-Ladeverfahren und Parametereinstellungen laut Tabelle 6-1			
Ladeabbruchsbedingung	SOC $\geq$ 65 % bei Ladevorgängen an „öffentlichen“ Ladestationen			
LIS-Ausbau	bedarfsgerecht			
Anzahl der Ladepunkte je öffentl. Ladestandort	ein Ladepunkt		<b>zwei Ladepunkte</b>	ein Ladepunkt
Maximale Ladeleistung je öffentl. Ladepunkt	DC 50 kW	<b>DC 100 kW</b>	DC 50 kW	
LURS	aktiviert			
Betriebliche LIS	ein Ladepunkt mit zumindest 11 bzw. 22 kW je E-Taxi			<b>keine vorhanden</b>
Betrachtungszeitraum	1 Kalenderjahr			

Wird zunächst noch die Anzahl der Ladestandorte außer Acht gelassen, dann ergeben sich aufgrund der zwei bis drei Ausprägungsformen je Parameter insgesamt 24 mögliche Permutationen. Um eine einfache und nachvollziehbare Benennung zu gewährleisten, werden die einzelnen Varianten in sogenannte Basisszenarien und Alternativszenarien unterteilt. Als oberstes Unterscheidungsmerkmal der Basisszenarien („Basic“) wird die Batteriekapazität herangezogen und diese nachfolgend als „Basic 40“ und „Basic 80“

bezeichnet. Für jedes Basisszenario kann weiters nach den drei E-Taxis-Durchdringungen unterschieden werden. Dies wird mit dem Zusatz „low“, „mid“ und „high“ angezeigt.

Um darüber hinaus noch weitere Varianten mit den Ergebnissen der Basisszenarien zu vergleichen, werden zusätzliche Alternativszenarien definiert. Dabei kommen Varianten in Bezug auf „Ladeleistung“ (100 statt 50 kW) und „Anzahl der Ladepunkte je Ladestandort“ (zwei statt einer) zum Einsatz. Diese sind zur deutlichen Unterscheidung statt „Basic“ mit „Option“ benannt und besitzen die Zusätze „100 kW“ und „2 EVSE“<sup>152</sup>. Außerdem wird jene Variante betrachtet, bei der kein betriebliches Laden vorgesehen ist. Alle Ladevorgänge müssen hierbei an öffentlichen Ladestandorten durchgeführt werden. Deshalb tragen diese Alternativszenarien die markante Bezeichnung „Public“. Eine Zusammenfassung aller festgelegten Parameterwerte der zu betrachtenden Szenarien und ihrer Varianten ist in Tabelle 6-3 geben.

### 6.2.3 Szenarienbasierter LIS-Ausbau

Im Kapitel 6.2 „Ladeinfrastrukturausbau“ wurde bereits eine optimierte Verteilung bzw. Verortung für einen LIS-Ausbau für E-Taxis mit unterschiedlicher Anzahl an Ladestandorten durchgeführt. Auf Grundlage dieser Ergebnisse und der entwickelten Basis- und Alternativszenarien wird nun eine Abschätzung der notwendigen Anzahl an öffentlichen Ladestandorten vorgenommen.

Abbildung 6-8 stellt den Anteil der durchführbaren Taxifahrten für die sechs definierten Basisszenarien dar. Unabhängig von der Batteriekapazität steigt zunächst der Anteil der durchführbaren Taxifahrten rasch mit der Anzahl der Ladestandorte an. Danach verringert sich die erzielbare Verbesserung kontinuierlich bis die szenarienabhängigen Maximalwerte erreicht sind. Im Szenario „Basic 40 low“ liegt das Maximum bei knapp 90 %. Das Ergebnis lässt sich jedoch u. a. durch Erhöhung der Batteriekapazität noch weiter verbessern und erreicht bei 80 kWh („Basic 80 low“) einen Wert von ca. 95 %. Wie in Abbildung 6-8 am rechten Ende der Kurven erkennbar, sind die Grenzwerte nahezu unabhängig von der Anzahl der E-Taxis. Aufgrund einzelner oder mehrerer zu langer Taxifahrten sowie notwendiger Ladevorgänge während der Taxischicht wird ein Anteil von 100 % nie vollständig erreicht.

---

<sup>152</sup> Im englischen Sprachgebrauch wird der Ladepunkt als „electric vehicle supply equipment“ (EVSE) bezeichnet.

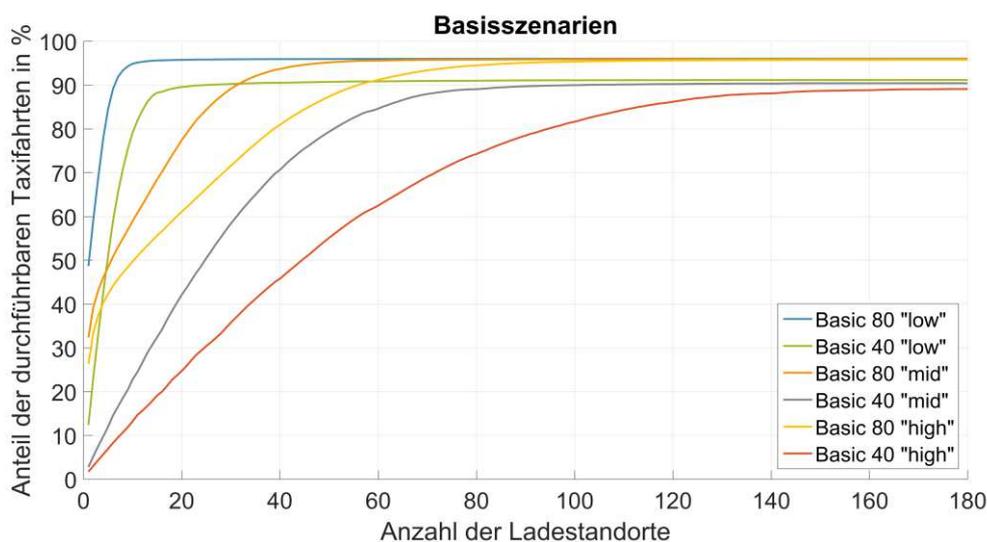


Abbildung 6-8: Mittlerer Anteil der rein elektrisch durchführbaren Taxifahrten (arithmetische Mittelwerte je LIS-Ausbaugrad)

Wie in Tabelle 6-3 vermerkt, liegt den Basisszenarien eine „bedarfsgerechte“ Optimierung der Ladestandorte zu Grunde. In Kapitel 6.2.1 „Optimierte Ladestandortauswahl“ ist der dazu verwendete methodische Ansatz beschrieben. Jedoch wird damit zunächst lediglich eine räumliche Priorisierung der öffentlichen Ladestandorte ermittelt. Die Festlegung einer sinnvollen Anzahl an Ladestandorten und der damit verbundenen Gesamtanzahl an notwendigen Ladepunkten wird nun nachgeholt.

Abbildung 6-8 zeigt allgemein den Trade-off zwischen „Anteil der durchführbaren Taxifahrten“ und „Anzahl an Ladestandorten“. Werden zu wenige Ladestandorte ausgebaut, dann verringert sich die „rein elektrische“ Durchführbarkeit der Taxifahrten und die Systemqualität sinkt rapide. Wird hingegen ein zu starker LIS-Ausbau forciert, dann steigen die Investitionskosten überproportional zur Systemqualität. Um hierfür einen sinnvollen Kompromiss zwischen Qualität und Kosten zu finden, wird in der vorliegenden Arbeit ein weiterer Parameter als Hilfsmittel herangezogen. Abbildung 6-9 stellt die Wartedauer am Ladestandort in Abhängigkeit der Anzahl an Ladestandorten dar. Es sind die Verläufe der arithmetischen Mittelwerte sowie der 95%-Quantile aus den Basisszenarien dargestellt.

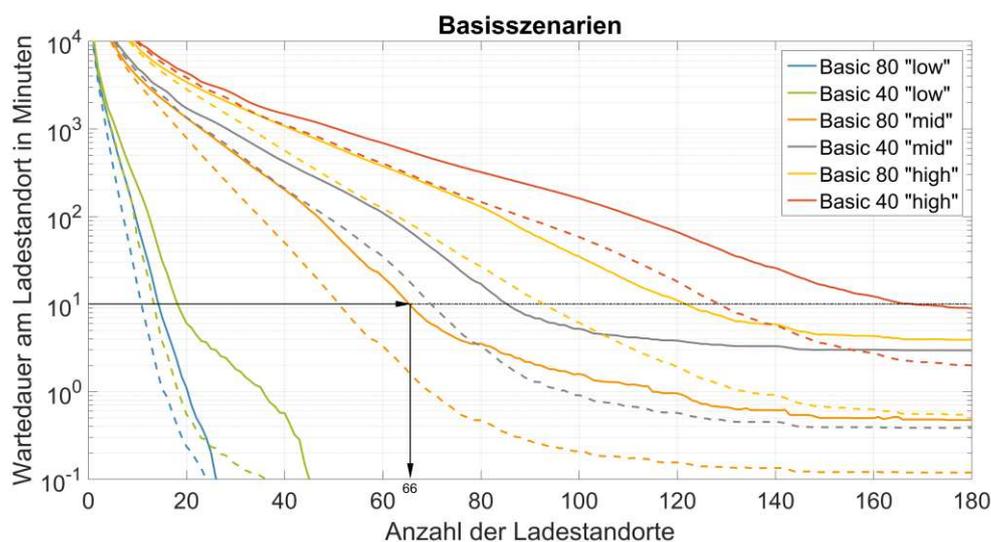


Abbildung 6-9: Wartedauer am Ladestandort in Abhängigkeit der Anzahl an Ladestandorte (arithmetische Mittelwerte: gestrichelte Linien; 95%-Quantile: durchgezogene Linien)

Mit steigender Anzahl an Ladestandorten kann der zugrundeliegende Ladebedarf der E-Taxis besser aufgeteilt und damit eine simultane Durchführung von Ladevorgängen forciert werden. Aus diesem Grund reduziert sich ebenfalls die Länge der Warteschlangen an den einzelnen Ladestationen und die mittlere Wartedauer nimmt ab. Umgekehrt wird mit geringerer Anzahl an Ladestandorten die Wartedauer entsprechend größer. Hierbei steigt die Wartedauer rasch an und erreicht zumindest theoretisch Werte von mehreren Stunden.

In der Realität würde jedoch kein/keine TaxilenkerIn so lange Wartezeiten in Kauf nehmen. Darüber hinaus wirken sich längere Wartezeiten nicht nur negativ auf den Komfort aus, sondern reduzieren gleichermaßen die Anzahl der durchführbaren Taxifahrten (vergleiche Abbildung 6-8) und verschlechtern somit direkt die Einnahmesituation und die Akzeptanz der TaxilenkerInnen. Ein E-Taxibetrieb käme unter solchen Bedingungen nicht zu Stande.

In der vorliegenden Arbeit wird deshalb darauf geachtet, die Wartedauer bis zum Freiwerden des Ladepunktes möglichst kurz zu halten. Eine Wartedauer von über 10 Minuten wird infolgedessen nur dann als tolerierbar angesehen, wenn die Häufigkeit des Auftretens geringer als 5 % bleibt. Wie in Abbildung 6-9 ersichtlich, resultiert aus einer Begrenzung des 95%-Quantils auf 10 Minuten eine noch weitaus geringere mittlere Wartedauer von ein bis zwei Minuten.

Abbildung 6-10 stellt darüber hinaus die Verteilung der Wartedauern für alle Basis-szenarien gegenüber. Es zeigt sich eine gewisse Erhöhung der mittleren Wartedauer mit

Anstieg der E-Taxi-Durchdringung. Dennoch liegt der Anteil der Wartedauern  $\geq 5$  Minuten in keinem Szenario über 16 %. Ferner wird die Majorität stets durch jene Ladevorgänge gebildet, bei denen überhaupt keine Wartezeit auftritt. Diese besitzen je nach Basisszenario einen Anteil zwischen 48 und 85 %.

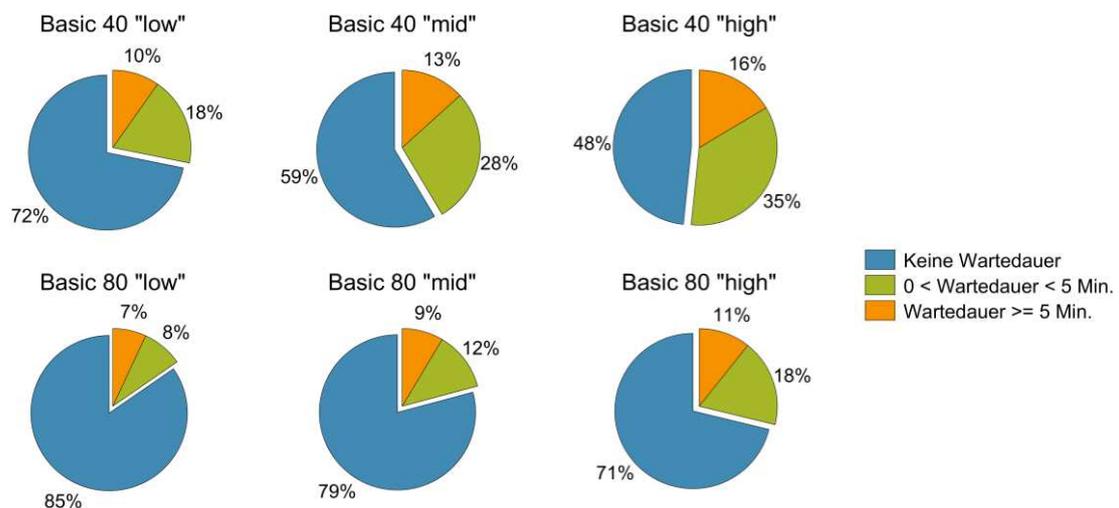


Abbildung 6-10: Verteilung der Wartedauer am Ladepunkt  
(Basisszenarien, 1 LP je Ladestandort mit 50 kW)

Als Grenzwert für die Ermittlung der „notwendigen Anzahl“ an Ladestandorten wird nach der beschriebenen Vorgangsweise jener Schnittpunkt herangezogen, bei dem die Kurve des 95%-Quantils („Wartedauer am Ladestandort“) einen Wert von 10 Minuten unterschreitet. Für das Basisszenario „Basic 80 mid“ ergibt sich hiermit eine notwendige Anzahl von 66 Ladestandorten (siehe Pfeifolge in Abbildung 6-9). Dabei kann der Wert als ein minimaler Bedarf an Ladestandorten angesehen werden. Mit weniger Ladestandorten ist der festgelegte Grenzwert für die Wartedauer nicht mehr einzuhalten. Da in den Basisszenarien jeder Ladestandort genau einen DC-Schnellladepunkt (mit 50 kW) besitzt, sind Anzahl an Ladestandorten und Anzahl an Ladepunkten für alle Basisszenarien ident.

Wird die notwendige Anzahl der öffentlichen Ladestandorte analog für alle Basis- und Alternativszenarien erhoben, dann ergeben sich die individuellen LIS-Ausbaustufen, wie in Abbildung 6-11 dargestellt. Um eine detailliertere Veranschaulichung zu erhalten, wird in diesem Fall eine feinere Abstufung gewählt und die entsprechenden Ergebniswerte für Durchdringungsraten mit einer Schrittweite von 500 E-Taxis ermittelt. Ferner fasst

Tabelle 6-4 die notwendige Anzahl der öffentlichen Ladepunkte nochmals für die Durchdringungsraten von 500, 2.500 und 4.500 E-Taxis nach ihrer Größe aufsteigend gereiht zusammen.

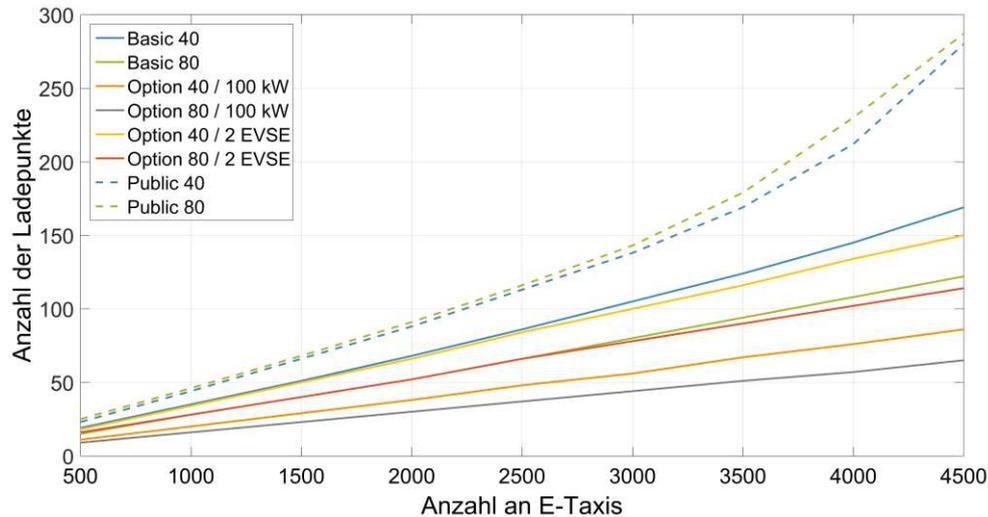


Abbildung 6-11: Optimierter LIS-Ausbau für alle Basis- und Alternativszenarien

Trivialer Weise steigt die Anzahl der benötigten Ladestationen mit der E-Taxi-Durchdringung kontinuierlich an. Dabei zeigt sich im dargestellten Bereich ein nahezu linearer Zusammenhang. Einzige Ausnahmen stellen die Alternativszenarien „Public“ dar (Erläuterung wird nachgeholt).

Für die Basisszenarien ergibt sich jedenfalls ein Bedarf von rund 15 bis 19 Ladepunkten je 500 E-Taxis. Szenarien mit größeren Batteriekapazitäten benötigen dabei weniger Ladepunkte, um den definierten Grenzwert in Bezug auf die Wartezeit am TSP einzuhalten. Zwar bleibt grundsätzlich der Gesamtladebedarf (als Energiemenge in kWh) bei Annahme unterschiedlicher Batteriekapazität beinahe unverändert<sup>153</sup>, jedoch kann bei größeren Batteriekapazitäten ein höherer Anteil des Ladebedarfs nach Ende der Taxischichten gedeckt werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch die Möglichkeit des „betrieblichen Ladens“, wie u. a. in den Basisszenarien erfüllt. Im Vergleich zu den Szenarien „Basic 40“ beträgt somit das durchschnittliche Reduktionspotenzial an Ladepunkten für „Basic 80“ ca. 25 %.

<sup>153</sup> Bei größeren Batteriekapazitäten kann ein etwas höherer Anteil der Taxifahrten rein elektrisch durchgeführt werden, wodurch ebenfalls der elektrische Energiebedarf proportional ansteigt (vergleiche dazu Kapitel 6.3 „Detaillierte Ergebnisse“).

Tabelle 6-4: Anzahl der notwendigen öffentlichen Ladepunkte bzw. Ladestandorte in Abhängigkeit der Szenarien

Szenarien	Anzahl der notwendigen öffentlichen Ladepunkte bzw. Ladestandorte <sup>*)</sup>		
	500 E-Taxis	2.500 E-Taxis	4.500 E-Taxis
<b>Option 80 / 100 kW</b>	9	37	65
<b>Option 40 / 100 kW</b>	11	48	86
<b>Option 80 / 2 EVSE</b>	16 (8)	66 (33)	114 (57)
<b>Basic 80</b>	15	66	122
<b>Option 40 / 2 EVSE</b>	18 (9)	84 (42)	150 (75)
<b>Basic 40</b>	19	86	169
<b>Public 40</b>	23	113	280
<b>Public 80</b>	25	116	287

<sup>\*)</sup> Die Werte in Klammern beschreiben die Anzahl der Ladestandorte, falls diese von der Anzahl der Ladepunkte abweicht.

Wird im Vergleich zu den Basisszenarien die Anzahl der Ladepunkte je Ladestandort auf zwei 50kW-Ladepunkte verdoppelt („Option 2 EVSE“), dann halbiert sich in etwa die Anzahl aller Ladestandorte und die Gesamtanzahl der notwendigen Ladepunkte bleibt nahezu unverändert. Es lässt sich jedoch – zumindest bei höheren E-Taxi-Durchdringungen – eine gewisse Reduktion der minimalen Anzahl an Ladepunkten von max. 10 % erkennen. Eine Ursache dafür sind tendenziell höhere Wartezeiten bei stärker frequentierten Ladestandorten. Diese können mit einem zusätzlichen Ladepunkt eher vermieden werden als durch einen weiteren Ladestandort, der womöglich geografisch schlechter positioniert ist und längere An- und Abfahrtswege erforderlich macht.

Bleibt hingegen die Anzahl der Ladepunkte je Ladestandort konstant und wird stattdessen die Ladeleistung von 50 auf 100 kW je Ladepunkt erhöht („Option 100 kW“), dann zeigt sich das größte Verbesserungspotenzial. Es tritt darüber hinaus bereits bei einer kleinen Anzahl an E-Taxis auf. Die erzielbare Reduktion der Anzahl an notwendigen Ladepunkten liegt bei einer Ladeleistungsverdopplung von 50 auf 100 kW im Bereich

von 40 bis 50 % und ist damit deutlich höher als bei einer Verdopplung der Batteriekapazität von 40 auf 80 kWh. Für die Varianten „Option 100 kW“ ergibt sich damit ein verminderter Bedarf, er liegt bei 9 bis 11 Ladepunkten je 500 E-Taxis.

Wie bereits angemerkt, stellen die Alternativszenarien „Public“ in Bezug auf die erzielten Ergebnisse eine Ausnahme dar. Ladevorgänge werden hierbei lediglich an öffentlichen Ladestationen durchgeführt. Ein Laden an betrieblichen Ladestationen ist nicht vorgesehen. Die Szenarien „Public“ decken somit jene Extremfälle ab, bei denen zwar die gesetzlich vorgeschriebenen Abstellplätze<sup>154</sup> für Taxis vorhanden sind, aber de facto keine betrieblichen Ladestationen errichtet werden. Gründe dafür können u. a. baulicher oder rechtlicher Natur sein (vor allem bei angemieteten Stellplätzen in Garagen). Aber auch finanzielle Aspekte (wie Investitionen für Ladestation, Zuleitung und Netzanschluss) stellen Hürden für den Ausbau von betrieblichen Ladestationen dar.

Jedenfalls muss, wenn die Möglichkeit des betrieblichen Ladens wegfällt, der gesamte Ladebedarf<sup>155</sup> an öffentlichen Ladestationen gedeckt werden. Dadurch erhöht sich die Anzahl der notwendigen öffentlichen Ladestationen. Je nach E-Taxi-Durchdringung und Batteriekapazität erhöht sich der LIS-Bedarf – im Vergleich zu den Basisszenarien – um 20 bis 135 %. Die größte Veränderung ergibt sich bei 4.500 E-Taxis und 80 kWh.

Darüber hinaus wird für die Szenarien „Public“ – im Gegensatz zu allen anderen Szenarien – bei größeren Batteriekapazitäten eine höhere Anzahl an Ladestandorten benötigt. Bei einer Batteriekapazität von 80 kWh müssen zwar seltener Ladevorgänge durchgeführt werden, allerdings dauern diese entsprechend länger und eine Verlagerung auf betriebliche Ladestationen ist in den Szenarien „Public“ definitionsbedingt nicht vorgesehen. Daraus ergibt sich eine negative Auswirkung auf die Wartedauer an den Ladestationen. Die damit verbundene Erhöhung der Anzahl an Ladestandorten fällt jedoch relativ gering aus (im Mittel ca. 5 % zwischen „Public 40“ und „Public 80“).

Des Weiteren zeigt sich bei den Alternativszenarien „Public“ ein verstärkter Bedarfsanstieg an Ladeinfrastruktur im Bereich höherer E-Taxi-Durchdringungen. Dieser Effekt beruht u. a. auf der gewählten Wartedauerbegrenzung als Nebenbedingung in der Optimierung des LIS-Ausbaus und der damit verbundenen Erhöhung der Nutzungshäufigkeit

---

<sup>154</sup> Generell kann der gesetzlich vorgeschriebene Abstellplatz betrieblicher oder privater Natur sein (z. B. auf einem Firmenparkplatz oder in einer Garage eines Mehrparteienhauses). Im Hinblick auf betriebliches Laden wird dieser jedoch in Folge ausschließlich als betrieblicher Abstellplatz bezeichnet.

<sup>155</sup> Der Energiebedarf wird im Kapitel 6.3 „Detaillierte Ergebnisse“ für alle betrachteten Szenarien noch näher quantifiziert.

(vergleiche dazu Kapitel 7.1 „Nutzungshäufigkeit der Ladepunkte“). Sind bei den Szenarien „Public“ für 500 E-Taxis etwa 23 bis 25 Ladestationen notwendig, kommen beim LIS-Ausbau für 4.000 auf 4.500 E-Taxis hingegen 57 bis 68 zusätzliche öffentliche Ladestationen hinzu.

Ganz allgemein kann der LIS-Ausbau – je nach gegebenen Rahmenbedingungen – entlang einer konkreten in Abbildung 6-11 dargestellten Kurve verlaufen. Jedoch ist es in Abhängigkeit aktueller sowie zukünftiger Entwicklungen (u. a. bei E-Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur) nicht zwingend notwendig einer einzelnen LIS-Ausbaukurve bis zur vollkommenen E-Taxi-Durchdringung unnachgiebig zu folgen. Sinnvoller ist es, den LIS-Ausbau schrittweise (z. B. für jeweils 10 bis 20 LIS-Standorte) im Voraus zu planen und entsprechend der erwarteten bzw. geänderten Rahmenbedingungen zwischen den dargestellten Kurven zu springen.

Für einen Ausgangspunkt mit noch wenigen E-Taxis ist es z. B. zunächst wichtiger eine höhere Anzahl an Ladestandorten bedarfsgerecht zu verorten, um längere An- und Abfahrtswege zu vermeiden, als von Beginn an zwei Ladepunkte je Ladestandort zu installieren. Darüber hinaus werden die Batteriekapazitäten sowie die verfügbaren Ladeleistungen<sup>156</sup> zukünftiger E-Fahrzeuge weiter zunehmen und demzufolge der Bedarf an zusätzlichen Ladestandorten tendenziell abnehmen. Es kommt somit zu einer kontinuierlichen Verschiebung in Richtung höherer Batteriekapazitäten bei gleichzeitiger Ausbreitung von Varianten mit höheren Ladeleistungen je LP und mehreren Ladepunkten je Ladestandort.

Für eine bedarfsgerechte LIS-Ausbauplanung ist es jedenfalls von Nöten, zukünftige Entwicklungen vorausschauend zu berücksichtigen, um gegebenenfalls genügend Platzangebot am Ladestandort (z. B. für Parkplätze und LIS) vorzufinden sowie ausreichende Leistungsreserven am Netzanschlusspunkt vorzuhalten bzw. entsprechende Alternativen einzuplanen. Darüber hinaus sind ökologische und ökonomischen Aspekte (wie CO<sub>2</sub>-Emissionen und Infrastrukturkosten) sowie bauliche und politische Rahmenbedingungen (wie Baugenehmigung oder Interoperabilität) in die LIS-Ausbauplanung aufzunehmen und ihre Vor- bzw. Nachteile gegeneinander abzuwägen.

---

<sup>156</sup> Bei Batteriespannungen von derzeit rund 400 Volt können Leistungen größer 50 kW nur durch das Anheben der Stromstärke ermöglicht werden. Dies führt rasch zu Ladekabel mit integriertem Kühlsystem, um den Leitungsquerschnitt entsprechend gering zu halten. Für Ladeleistungen in Richtung 350 kW sind ebenfalls höhere Batteriespannungen (von z. B. 800 Volt) erforderlich.

## 6.3 Detaillierte Ergebnisse zur Machbarkeitsanalyse

Wie in Kapitel 4.2 „Bestimmung der Betriebsarten und -zeiten“ definiert, werden in der vorliegenden Arbeit drei Betriebsarten betrachtet. Auf Basis dieser Ausgangslage können E-Taxis entweder einmal täglich im Rahmen einer Tagesschicht bzw. einer Nachtschicht (1-Schichtsystem) betrieben oder für Doppelschichten (2-Schichtsystem) eingesetzt werden. Diese Unterscheidung ist deshalb so relevant, da es bei E-Taxis im Doppelschicht-Betrieb untertags zu einem TaxilenkerInnen-Wechsel kommt und dabei im Gegensatz zum 1-Schichtsystem zwei Taxischichten je Tag absolviert werden. Dies führt zu einer deutlich höheren Jahreskilometerleistung (vergleiche dazu Tabelle 5-2), die wiederum in einem größeren Energiebedarf und einer höheren Anzahl an Ladevorgängen mündet. Deshalb werden im Folgenden die Ergebnisse jeweils getrennt für die drei verschiedenen Betriebsarten betrachtet.

Bevor jedoch auf den resultierenden Energiebedarf näher eingegangen wird, ist zu Beginn noch ein wesentlicher Punkt zu betrachten:

Die in Tabelle 5-2 beschriebenen Werte wie die durchschnittliche Jahreskilometerleistung von etwa 50.000 km je Taxi beziehen sich auf alle Taxifahrten der generierten Mobilitätsdaten und bilden die Grundlage für die technische Machbarkeitsanalyse. Jedoch kommt es durch die beschränkte Reichweite der E-Taxis und die notwendigen Ladevorgänge zu einer gewissen Zahl an Taxifahrten, die nicht angenommen werden können. Dabei ist die konkrete Anzahl primär von den jeweiligen Gegebenheiten wie verbaute Batteriekapazität oder maximale Ladeleistung abhängig. Reduziert sich aufgrund der Rahmenbedingungen der einzelnen Szenarien der Anteil der durchführbaren Taxifahrten, dann sinkt analog dazu die Jahreskilometerleistung und damit der kumulierte Energiebedarf der E-Taxis im Taxibetrieb.

Um diesbezüglich vollends Klarheiten zu schaffen, werden nachfolgend die notwendigen Informationen nachgereicht und die zugehörigen Erkenntnisse erläutert. Im Anschluss werden darüber hinaus vertiefende Analysen im Hinblick auf Anzahl, Energiemenge, Dauer und Art der notwendigen Ladevorgänge vorgenommen.

### 6.3.1 Anteil der elektrisch durchführbaren Taxifahrten

Auf Basis der in Abbildung 6-11 sowie Tabelle 6-4 festgelegten Mindestanzahl an notwendigen Ladepunkten kann der zugehörige Anteil der elektrisch durchführbaren Taxi-

fahrten je Szenario berechnet werden. Wie mittels Abbildung 6-8 einfach nachvollziehbar ist, ergibt sich bei einer festgelegten Anzahl von 66 Ladepunkten<sup>157</sup> für das Basis-szenario „Basic 80 mid“ ein Anteil der rein elektrisch durchführbaren Taxifahrten von rund 95 %. Es müssen somit – verglichen zu einem konventionell betriebenen Taxi – im Mittel etwa 5 % der Taxifahrten wegen u. a. zu geringem Batterieladezustand abgelehnt werden. In Abbildung 6-12 sind die zugehörigen Werte aller Szenarien gesamt und je Betriebsart getrennt dargestellt.

Grundsätzlich entsprechen die Ergebnisse in Abbildung 6-12 einer Durchdringung von 4.500 E-Taxis („high“). Dies ist jedoch nicht explizit in der Beschriftung vermerkt, da die E-Taxi-Durchdringung kaum einen Einfluss auf den Anteil der durchführbaren Taxifahrten hat. Die Unterschiede, die sich zwischen „low“, „mid“ und „high“ ergeben, liegen im Bereich von  $\pm$  einem Prozentpunkt. Dies gilt im gleichen Maße für einen Großteil aller Ergebnisse. Grund dafür ist einerseits die Unabhängigkeit der generierten Mobilitätsdaten von der E-Taxi-Durchdringung sowie andererseits die systematische Anpassung der Anzahl der notwendigen Ladepunkte an die Größe der E-Taxisflotte (vergleiche dazu u. a. Tabelle 6-4). Deshalb wird in weiterer Folge – bei der Beschreibung der individuellen Ergebnisse – nur dann auf die verschiedenen E-Taxi-Durchdringungen eingegangen, wenn sich signifikante Unterschiede zwischen „low“, „mid“ und „high“ ergeben. Ist dies nicht der Fall, dann beruhen die Erläuterungen konsequent auf einer Durchdringung von 4.500 E-Taxis.

Wie in Abbildung 6-12 ersichtlich, ergibt sich für Szenarien mit einer größeren Batteriekapazität (80 statt 40 kWh) der höchste Anteil an elektrisch durchführbaren Taxifahrten. Je nach Rahmenbedingungen beträgt der Unterschied hierfür bis zu 8,5 Prozentpunkte<sup>158</sup>. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da E-Taxis mit größeren Batteriekapazitäten auch größere Distanzen ohne zusätzliche Ladevorgänge zurücklegen können und somit weniger Situationen auftreten, an denen Taxifahrten z. B. aufgrund eines zu geringen Batterieladezustandes abgelehnt<sup>159</sup> werden müssen.

---

<sup>157</sup> Für die Basisszenarien ist die Anzahl der Ladepunkte stets ident mit der Anzahl der Ladestandorte (ein Ladepunkt je Ladestandort).

<sup>158</sup> Die genauen Anteile je Szenario können in Tabelle B-5 im Anhang nachgelesen werden.

<sup>159</sup> In Abbildung A-7 (Anhang) ist ebenfalls der Anteil der nicht durchführbaren Taxifahrten für alle Szenarien eingetragen. Muss eine Taxifahrt abgelehnt werden, dann geschieht dies in ca. 98 % der Fälle aufgrund eines aktuell zu geringen Batterieladezustandes. In 1-2 % der Fälle würde die gesamte, nutzbare Batteriekapazität nicht ausreichen, um die Taxifahrt durchgängig, ohne zusätzlichem Ladevorgang, zu bewältigen.

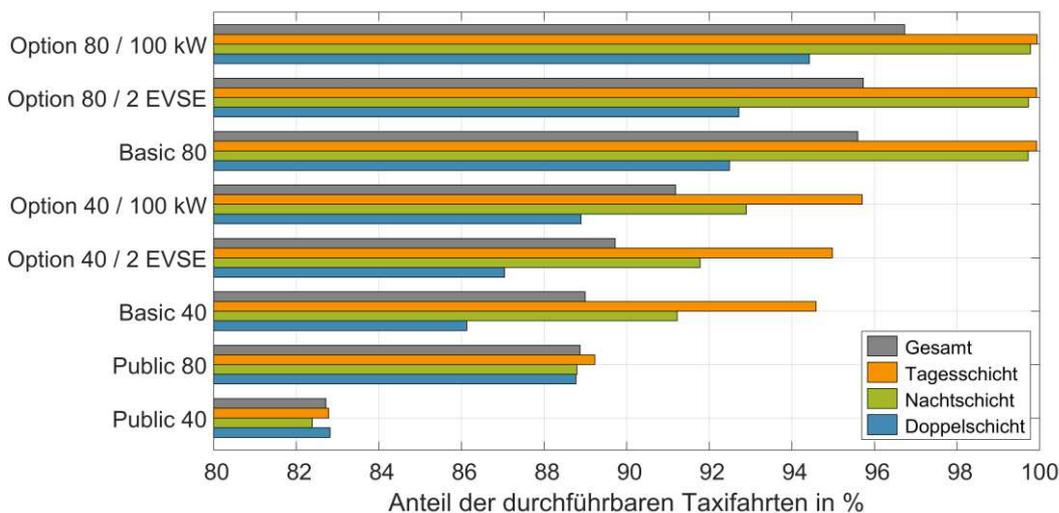


Abbildung 6-12: Anteil der rein elektrisch durchführbaren Taxifahrten  
(für alle Basis- und Alternativszenarien sowie für alle Betriebsarten)

In den Szenarien „Basic 80“ sowie „Option 80 / 100 kW“ und „Option 80 / 2 EVSE“ sind nahezu alle Taxifahrten ( $\geq 99,7\%$ ) der E-Taxis im 1-Schichtsystem elektrisch durchführbar<sup>160</sup>. Vereinfacht ausgedrückt: Unter diesen Rahmenbedingungen (eine Taxischicht pro Tag und eine Batteriekapazität von 80 kWh) können TaxilenkerInnen genauso viele Taxifahrten mit E-Taxis absolvieren wie mit einem konventionell betriebenen Taxifahrzeug. Es wird in Bezug auf die technische Machbarkeit dasselbe Niveau erreicht.

Dies gilt jedoch nicht für E-Taxis mit geringeren Batteriekapazitäten (z. B. 40 kWh) bzw. für E-Taxis, die im 2-Schichtsystem betrieben werden. Absolviert ein E-Taxi „Doppelschichten“, dann ist es annähernd ununterbrochen im Einsatz und steht kaum am vorgeschriebenen Abstellplatz. Ein betriebliches Laden ist daher nur selten möglich und ein Großteil der Ladevorgänge muss an öffentlichen Ladestationen während der Betriebszeit durchgeführt werden (vergleiche dazu u. a. Abbildung 6-24). Gemeinsam führt dies zur Verschlechterung der Ergebnisse.

Hingegen reduziert eine Verdopplung der maximalen Ladeleistung (hierbei von 50 auf 100 kW) wiederum die Ladedauer maßgeblich und erhöht damit die Zeitspanne in der das E-Fahrzeug für Taxifahrten eingesetzt werden kann. Deshalb führt das Szenario

<sup>160</sup> Abgesehen von den Szenarien „Public“ wird stets angenommen, dass E-Taxis außerhalb der Betriebszeiten über eine Lademöglichkeit verfügen (betriebliches Laden).

„Option 80 / 100 kW“ die „technische Machbarkeit“-Rangliste aller betrachteten Szenarien an.

Der Vorsprung fällt jedoch relativ gering aus, da in der vorliegenden Arbeit die Anzahl der Ladepunkte mit einem festen Grenzwert für die Wartedauer an der Ladeinfrastruktur gekoppelt ist (vergleiche Kapitel 6.2.3 „Szenarienbasierter LIS-Ausbau“). Potenzielle zeitliche Vorteile gehen hierbei direkt in eine Reduktion der Ladestandorte über, um u. a. die Investitionskosten für den Infrastrukturausbau zu minimieren.

Ferner zeigen sich kaum Unterschiede zwischen den Alternativszenarien mit zwei Ladepunkten je Ladestandort („Option 2 EVSE“) und den zugehörigen Basisszenarien mit nur einem Ladepunkt je Ladestandort (bei identer Batteriekapazität). Grund dafür ist die fast gleiche Anzahl der verfügbaren Ladepunkte<sup>161</sup> (vergleiche Abbildung 6-11), wodurch die resultierenden Anteile der durchführbaren Taxifahrten ebenfalls kaum variieren.

Wie zu Beginn des Kapitels angemerkt, ergeben sich in Bezug auf die drei definierten Betriebsarten „Tages-, Nacht- und Doppelschicht“ jedoch sehr wohl gravierende Abweichungen. Verglichen mit der Doppelschicht besitzen Tages- und Nachtschichten generell einen höheren Anteil an elektrisch durchführbaren Taxifahrten. Abhängig vom Szenario liegen die Unterschiede im Bereich von ca. 5 bis 9 Prozentpunkten.

Eine generelle Ausnahme bilden jedoch die Szenarien „Public“. Für diese Szenarien besteht definitionsbedingt keine Möglichkeit des betrieblichen Ladens. In diesem Fall ist der gesamte Energiebedarf an öffentlichen Ladestationen zu decken. Bleiben die restlichen Rahmenbedingungen unverändert, dann geht damit eine entsprechende Erhöhung der Gesamtladedauer während des Taxibetriebs einher und die Zeitspanne, in der das E-Taxi für Taxifahrten zur Verfügung steht, nimmt ab. Dies spiegelt sich in den Ergebnissen von Abbildung 6-12 wider. Darüber hinaus verlieren die resultierenden Anteile der elektrisch durchführbaren Taxifahrten ihre Abhängigkeit von den zugrundeliegenden Betriebsarten, da in den Szenarien „Public“ für alle Betriebsarten dieselben Ladevoraussetzungen gelten.

Trotz aller zusätzlichen Herausforderungen, die mit einem ausschließlichen Laden an öffentlichen Ladestationen korrelieren (wie auch ein verstärkter LIS-Ausbau), beträgt der Anteil der rein elektrisch durchführbaren Taxischichten in keinem der betrachteten Szenarien einen Wert unter 82 %.

Ein weiterer essentieller Parameter, der durch eine Reduktion des Anteils an durchführbaren Taxifahrten direkt beeinflusst wird, ist die Anzahl der Taxifahrten je Taxischicht.

---

<sup>161</sup> Mehr Ladepunkte je Ladestandort aber insgesamt weniger Ladestandorte.

Tabelle 6-5 berücksichtigt im Gegensatz zu Tabelle 5-2<sup>162</sup> bereits die Ergebnisse aus Abbildung 6-12 und gibt die Verhältnisse in analoge Weise wieder. Generell werden im Mittel in der Nachtschicht mehr Taxifahrten absolviert als in den anderen Betriebsarten. Die Bandbreite reicht hier je nach Szenario und Betriebsart von durchschnittlich 8 bis 13 Taxifahrten je Taxischicht.

Tabelle 6-5: Mittlere Anzahl der Taxifahrten je Taxischicht in Abhängigkeit der Szenarien

Szenarien	Mittlere Anzahl der Taxifahrten je Taxischicht			
	Gesamt	Tagesschicht	Nachtschicht	Doppelschicht
<b>Option 80 / 100 kW</b>	10,8	9,7	12,8	10,6
<b>Option 80 / 2 EVSE</b>	10,7	9,7	12,8	10,4
<b>Basic 80</b>	10,6	9,7	12,8	10,4
<b>Option 40 / 100 kW</b>	10,2	9,3	11,9	10
<b>Option 40 / 2 EVSE</b>	10	9,2	11,8	9,8
<b>Basic 40</b>	9,9	9,2	11,7	9,7
<b>Public 80</b>	9,9	8,6	11,4	9,9
<b>Public 40</b>	9,2	8	10,6	9,3

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Betriebsart „Doppelschicht“ zwei Taxischichten je Tag beinhaltet. Für das 2-Schichtsystem müssen demzufolge die zugehörigen Werte aus Tabelle 6-5 verdoppelt werden, um die durchschnittliche Anzahl der Taxifahrten je Tag zu erhalten. In Bezug auf die 1-Schichtsysteme ist die Anzahl der Taxifahrten je Tag sowie je Taxischicht ident.

<sup>162</sup> In Tabelle 5-2 sind lediglich die Mittelwerte für die generierten Mobilitätsdaten dargestellt, ungeachtet der Veränderungen durch die jeweiligen Szenarien in Rahmen der Machbarkeitsanalyse.

Wie bereits angemerkt, resultiert aus der Notwendigkeit, einzelne Taxifahrten ablehnen zu müssen, ebenfalls eine Reduktion der Jahreskilometerleistung. Dies wird im Folgenden gemeinsam mit dem kumulierten Energiebedarf (mit und ohne Nebenverbraucher) untersucht.

### 6.3.2 Jahreskilometerleistung und kumulierter Energiebedarf

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird zur Berechnung der Jahreskilometerleistung und des daraus abgeleiteten Gesamtenergiebedarfs einerseits die Distanzen aller elektrisch durchführbaren Taxifahrten herangezogen sowie andererseits die notwendigen Wege zur öffentlichen bzw. betrieblichen Ladeinfrastruktur berücksichtigt. Diese sind in Tabelle 5-2 noch nicht enthalten.

Für den Weg zur bzw. vom betrieblichen Ladestation wird aufgrund fehlender Detailinformationen pauschal eine mittlere Distanz von 5 km<sup>163</sup> je Richtung angenommen. Wird indessen ein Ladevorgang an einer öffentlichen Ladestation durchgeführt, dann findet die jeweilige Distanz zwischen TSP und dem nächsten freien Ladepunkt Berücksichtigung. Dieser ist primär von der Anzahl sowie der Verortung der Ladestandorte und somit direkt vom zugrundeliegenden Szenario abhängig. Im Mittel beträgt der Abstand zwischen TSP und LIS-Standort für alle Szenarien zwischen 1,1 und 3,4 km und wird primär vom zugrundeliegenden LIS-Ausbau beeinflusst.

Generell gilt natürlich, je höher der LIS-Ausbaugrad desto geringer ist der durchschnittliche Weg zur öffentlichen Ladeinfrastruktur. Dennoch sind die angeführten Werte etwas höher als die entsprechenden Distanzen zwischen TSP und öffentlicher LIS aus Abbildung 6-7. Grund dafür ist der Einsatz des übergeordneten Leit- und Reservierungssystems. Das LURS verursacht zwar im Mittel eine etwas größere Wegstrecke zur Ladestation, im Gegensatz dazu wird jedoch die Zeitspanne aus Ladedauer, Wartezeit am Ladepunkt plus Hin- und Rückfahrt durch das LURS minimiert und somit die Verfügbarkeit der E-Taxis optimiert (vergleiche Kapitel 6.1.2 „Leit- & Reservierungssystem“).

Je nach Länge der Warteschlangen an den verschiedenen Ladepunkten ist es mitunter sinnvoller, nicht den nächstgelegenen und womöglich besetzten Ladestandort anzufahren, sondern einen kleinen Umweg zu einem freien Ladepunkt in Kauf zu nehmen. Welche Option wann zu bevorzugen ist, ermittelt das LURS und reserviert darüber hinaus den geeigneten Ladepunkt.

---

<sup>163</sup> Vergleiche dazu Kapitel 6.1.3 „Situationsabhängige Entscheidungspfade“.

Werden die Distanzen der zurückgelegten Taxifahrten sowie die zusätzlichen Wegstrecken von und zur Ladeinfrastruktur bzw. vom und zum vorgeschriebenen Abstellplatz entsprechend addiert, so ergeben sich die zugehörigen Jahreskilometerleistungen je Szenario und Betriebsart (siehe Tabelle 6-6).

Dabei beträgt zum Beispiel die zusätzliche Kilometerleistung aufgrund der Wege zwischen TSP und LIS bzw. Abstellplatz für das Szenario „Option 80 / 100 kW“ in etwa 2.600 km. Dies sind rund 5 % der gesamten Jahreskilometerleistung von 49.183 km (siehe Tabelle 6-6).

Tabelle 6-6: Mittlere Jahreskilometerleistung je E-Taxi in Abhängigkeit der Szenarien

Szenarien	Mittlere Jahreskilometerleistung je E-Taxi in km			
	Gesamt	Tagesschicht	Nachtschicht	Doppelschicht
<b>Option 80 / 100 kW</b>	49.183	31.917	36.091	79.080
<b>Option 80 / 2 EVSE</b>	48.537	31.906	36.050	77.229
<b>Basic 80</b>	48.599	31.906	36.050	77.411
<b>Option 40 / 100 kW</b>	45.130	29.546	32.239	73.089
<b>Option 40 / 2 EVSE</b>	43.991	29.126	31.620	70.731
<b>Basic 40</b>	44.167	29.113	31.714	71.176
<b>Public 80</b>	44.925	27.775	31.222	75.238
<b>Public 40</b>	41.572	25.803	28.676	69.714

Wegen der beschränkten Reichweite der E-Taxis steht der genannten Erhöhung durch die Zusatzwege im Allgemeinen aber eine noch größere Verringerung der Jahreskilometerleistung gegenüber. Einerseits können nicht alle Taxifahrten rein elektrisch durchgeführt werden und andererseits müssen tendenziell Taxifahrten mit größeren Distanzen abgelehnt werden.

In Bezug auf das Szenario „Option 80 / 100 kW“ reduzieren beide Effekte zusammen die Jahreskilometerleistung aus Tabelle 5-2 um etwa 3.100 km (~ 6 %). Finden die zusätzlichen Wege zwischen TSP und LIS bzw. Abstellplatz ebenfalls Berücksichtigung, dann ergibt sich für das Szenario „Option 80 / 100 kW“ schlussendlich ein Verringerung von durchschnittlich 500 km (vergleiche dazu Tabelle 6-6 und Tabelle 5-2).

Logischer Weise besitzen E-Taxis mit Doppelschicht-Betrieb die höchsten Jahreskilometerleistungen. Wie die Zahlenwerte der Tabelle 6-5 zeigen, beträgt die Anzahl der Taxifahrten je Tag für E-Taxis der Betriebsart „Doppelschicht“ etwas weniger als die Summe der Werte von „Tages- und Nachtschicht“. Dennoch ist die Jahreskilometerleistung der E-Taxis mit Doppelschichten um mehr als das Zweifache größer als die entsprechende Jahreskilometerleistung jener E-Taxis, die im 1-Schichtsystem betrieben werden (siehe Tabelle 6-6).

Die kleinen Unterschiede in Bezug auf die Anzahl der Taxifahrten je Tag lassen sich durch den geringeren Anteil an elektrisch durchführbaren Taxifahrten für die Betriebsart „Doppelschicht“ erklären. Die Abweichungen der Jahreskilometerleistung basieren hingegen auf einem anderen Grund. Wie in Tabelle 5-2 ersichtlich, ist die mittlere Anzahl der Kalendertage – an denen die E-Fahrzeug als Taxis genutzt werden – für E-Taxis im 1-Schichtsystem wesentlich geringer (bis zu 28 %) und daher im Umkehrschluss die Jahreskilometerleistung der E-Taxis mit Doppelschichten entsprechend größer.

Zusammengefasst ergeben sich für E-Taxis – mit der Möglichkeit zum betrieblichen Laden – durchschnittliche Jahreskilometerleistungen von rund 44.000 bis 49.000 km. Getrennt für die Betriebsarten betrachtet, zeigen sich Bandbreiten von etwa 29.000 bis 36.000 km pro Jahr (für „Tages- und Nachtschicht“) und etwa 71.000 bis 79.000 km pro Jahr (für die Betriebsart „Doppelschicht“).

Basierend auf den Jahreskilometerleistungen und mit Hilfe des spezifischen Energiebedarfs wird nachfolgend der kumulierte Energiebedarf der gesamten E-Taxiflotte ermittelt.

Wie bereits in Kapitel 5 „Generierung einer gesamten E-Taxiflotte“ beschrieben, wird in der vorliegenden Arbeit der Energiebedarf der E-Taxis in zwei Kategorien unterteilt: „Antrieb“ und „Nebenverbraucher“. Die Nebenverbraucher (wie Heizung, Klimaanlage, Lüftung und Radio) werden dabei vereinfacht mit einem konstanten mittleren Leistungswert von 1 kW<sup>164</sup> berücksichtigt, der nicht nur während der Taxifahrt, sondern ebenfalls beim Stehen am Taxistandplatz auftritt. Dies führt dazu, dass der spezifische Energiebedarf als Quotient aus absolutem Energiebedarf (kWh) und Gesamtdistanz (km) zusätzlich eine Abhängigkeit von der Standdauer am TSP erhält. Um die Verhältnisse besser zu veranschaulichen, wird der spezifische Energiebedarf im Anschluss sowohl inklusive wie auch exklusive Standdauer am TSP analysiert.

---

<sup>164</sup> Vergleiche dazu Kapitel 5.1.2 „Realisierung“.

Im Gegensatz zur Standdauer am TSP ist der spezifische Energiebedarf nahezu unabhängig von den verschiedenen Szenarien und E-Taxi-Durchdringungen. Da die Schwankungen innerhalb eines Prozents liegen, werden diesbezüglich keine getrennten Darstellungen vorgenommen.

Abbildung 6-13 zeigt die Verteilung des spezifischen Energiebedarfs je Taxifahrt mit und ohne Nebenverbraucher. Darüber hinaus ist der spezifische Energiebedarf inklusive Nebenverbraucher einerseits für „nur Fahren“ und andererseits für „Fahren und Stehen“ separat eingetragen. Die Variante „nur Fahren“ beinhaltet jenen Energiebedarf der für „Antrieb“ und „Nebenverbraucher“ lediglich während der Taxifahrt anfällt. Bei der Variante „Fahren und Stehen“ kommt noch der Energiebedarf für den Betrieb der Nebenverbraucher während der Standdauer am TSP hinzu. Die Gesamtdistanz ändert sich jedoch nicht, wodurch der resultierende spezifische Energiebedarf entsprechend ansteigt.

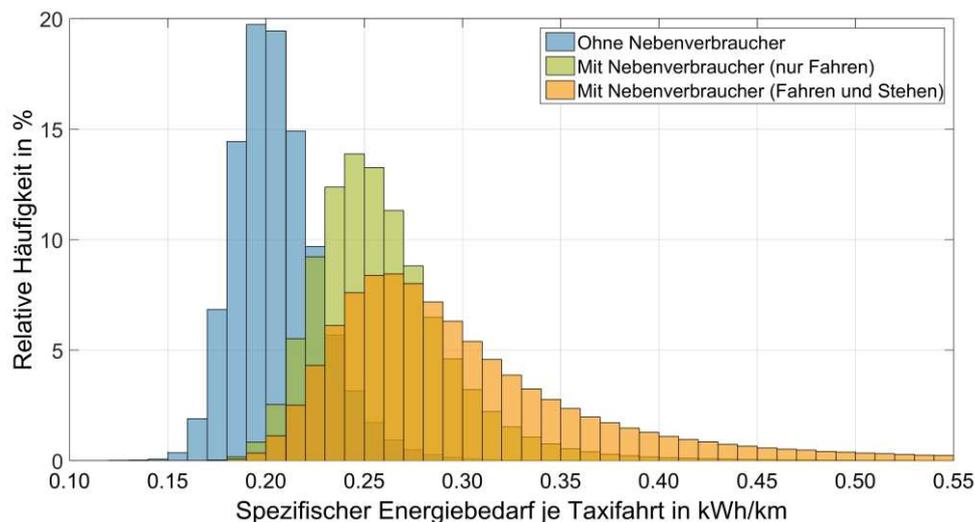


Abbildung 6-13: Verteilung des spezifischen Energiebedarfs  
(mit und ohne Nebenverbraucher; Grundgesamtheit der generierten Mobilitätsdaten)

In Bezug auf die Kategorie „Antrieb“ ergibt sich für den spezifischen Energiebedarf ein Durchschnittswert von etwa 0,20 kWh/km. Dieser lässt sich einfach aus dem mittleren Energiebedarf von 2,5 kWh je Taxifahrt und der durchschnittlichen Distanz von 12,8 km ermitteln (vergleiche Kapitel 5 „Generierung einer gesamten E-Taxiflotte“). Wird die Variante „Fahren“ betrachtet, addiert sich noch eine Energiemenge von 16,7 Wh je Fahrminute für den Betrieb der Nebenverbraucher während der Taxifahrt hinzu. Die mittlere Fahrdauer je Taxifahrt beträgt 37,6 Minuten, wodurch sich ein zusätzlicher Energiebedarf von durchschnittlich 0,63 kWh je Taxifahrt ergibt. Dadurch erhöht sich der Energiebedarf je Taxifahrt im Mittel auf 3,1 kWh und der spezifische Energiebedarf auf

0,25 kWh/km. Dies entspricht einem Plus von 25 %. Eine deutliche Erhöhung, die vor allem deshalb so enorm ausfällt, da die Durchschnittsgeschwindigkeit der Taxis im Stadtverkehr mit etwa 22 km/h<sup>165</sup> sehr gering ist und somit der energetische Anteil der Nebenverbraucher einen größeren Stellenwert besitzt.

Laut dem geltenden Kraftfahrzeuggesetz [84] sind LenkerInnen eines Kraftfahrzeuges verpflichtet, nicht mehr Rauch, üblen Geruch und unnötige Luftverunreinigung zu verursachen, als dies bei ordnungsgemäßem Zustand und sachgemäßem Betrieb des Kraftfahrzeuges unvermeidbar wäre. Aus diesem Grund ist generell auch der Motor eines Taxis beim Warten am Taxistandplatz abzustellen, wenn z. B. damit lediglich die Heizung oder die Klimaanlage betrieben werden. Diesbezüglich nimmt das E-Taxis jedoch eine gesonderte Rolle ein, da es über eine Antriebsbatterie verfügt und somit im Stillstand und bei abgestelltem Motor – ohne lokale Zusatzemissionen – Nebenverbraucher versorgen kann. Nichtsdestotrotz benötigen die Nebenverbraucher beim Stehen am TSP elektrische Energie. Dies erhöht wiederum den Gesamtenergiebedarf und damit den spezifischen Energiebedarf.

Bei der Variante „Fahren und Stehen“ kommt somit während der Standdauer am TSP noch zusätzlich die elektrische Energie zum Betrieb der Nebenverbraucher hinzu. Die mittlere Standdauer am TSP beträgt laut Abbildung 5-8 rund 19,0 Minuten<sup>166</sup>. Dies entspricht vereinfacht – bei einem kontinuierlichen Leistungsbedarf der Nebenverbraucher von 1 kW – in etwa einem Energiebedarf von 0,32 kWh je TSP-Aufenthalt. Dadurch steigt der mittlere Energiebedarf je Taxifahrt auf 3,4 kWh an. Dies entspricht einer zusätzlichen Erhöhung von 11,4 Prozentpunkten und einer absoluten Erhöhung – im Vergleich zum Fall „ohne Nebenverbraucher“ – von rund 36,4 %. Wird nun der Gesamtenergiebedarf für die Variante „Fahren und Stehen“ ermittelt und durch die Summe der Distanzen aller Taxifahrten dividiert, so ergibt sich ein spezifischer Energiebedarf von durchschnittlich 0,27 kWh/km (vergleiche Abbildung 6-13).

Um realitätsnahe Werte zu erlangen, wird für die weiteren Untersuchungen im Rahmen der technischen Machbarkeitsanalyse der Energiebedarf stets inklusive Nebenverbraucher in der Variante „Stehen und Fahren“ berücksichtigt.

Wird nun der Energiebedarf aller Taxischichten für die Grundgesamtheit der generierten Taxifahrten als Histogramm dargestellt (siehe Abbildung 6-14), dann lässt sich im Prinzip

---

<sup>165</sup> Die Taxifahrten – als Basis zur Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit – inkludieren in der vorliegenden Arbeit u. a. auch Wartezeiten bei der Abholadresse des Fahrgastes.

<sup>166</sup> Die Standdauer an TSP wird hierbei der Taxifahrt davor zugerechnet.

bereits die maximal notwendige Batteriekapazität abschätzen, um alle Taxischichten ohne zusätzliche Ladevorgänge während der Betriebszeit zu absolvieren.

Abbildung 6-14 beinhaltet generell keine Fahrten zu öffentlichen Ladestationen, aber jene zum vorgeschriebenen betrieblichen Abstellplatz. Wie sich ablesen lässt, können mit 80 kWh an Batteriekapazität<sup>167</sup> bereits fast alle Taxifahrten einer Taxischicht abgedeckt werden (99,8 %). Dieses Ergebnis gilt im Mittel für alle Betriebsarten zusammen.

Werden die Betriebsarten einzeln untersucht, dann ergeben sich differenzierte Ergebnisse. E-Taxis der Tagesschicht weisen aufgrund der geringsten Taxischichtdauer und der kleinsten Kilometerleistung (siehe Abbildung 5-14 und Abbildung 5-16), den niedrigsten Energiebedarf je Taxischicht auf. Hingegen besitzen E-Taxis, die im Rahmen der Nachtschicht betrieben werden, den höchsten Energiebedarf je Taxischicht. In Abhängigkeit der Betriebsart schwankt die „maximal erforderliche“ Batteriekapazität somit zwischen 72 und 87 kWh (0,998-Quantil).

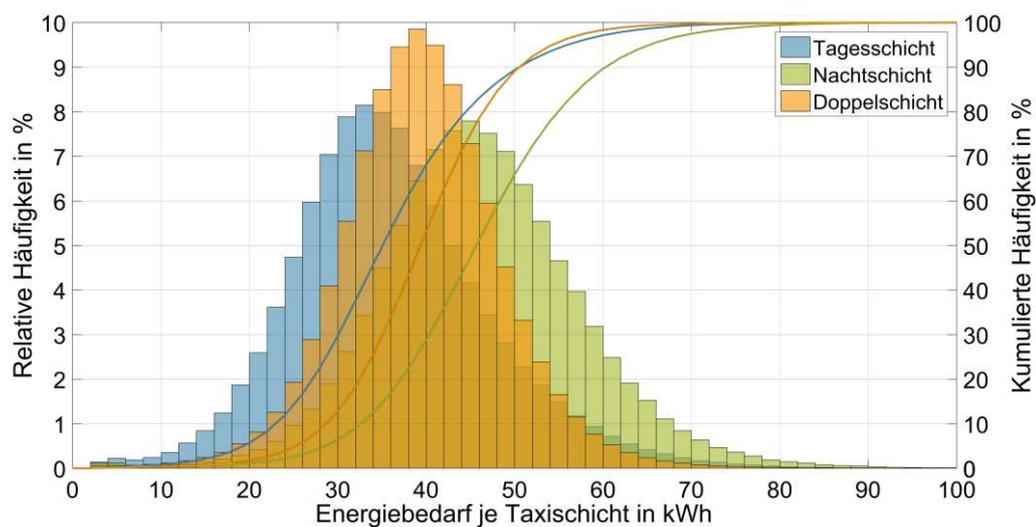


Abbildung 6-14: Häufigkeit des Energiebedarfs je Taxischicht und Betriebsart (inkl. Nebenverbraucher; Grundgesamtheit der generierten Mobilitätsdaten)

Nach den Ergebnissen der Abbildung 6-14 liegt der durchschnittliche Energiebedarf je Taxischicht für E-Taxis der Doppelschicht zwischen jenen der Tages- und jenen der Nachtschicht. Der maximale Energiebedarf je Taxischicht liegt sogar unter jenem der

<sup>167</sup> Dies entspricht dem Bruttowert. Unter den gegebenen Annahmen sind lediglich 72 kWh nutzbar (netto).

1-Schichtsysteme. Dennoch ist der Anteil der rein elektrisch durchführbaren Taxifahrten für E-Taxis der Betriebsart „Doppelschicht“ stets deutlich niedriger als für E-Taxis im 1-Schichtsystem (vergleiche Abbildung 6-12). Diese Diskrepanz liegt in der Tatsache begründet, dass im Rahmen der Doppelschicht zwei – fast nahtlos aneinander folgende – Taxischichten je Tag absolviert werden. Einerseits verdoppelt sich dadurch der Energiebedarf je Tag und andererseits muss ein Großteil aller Ladevorgänge während der Betriebszeit an öffentlichen Ladestationen durchgeführt werden.

Tabelle 6-7: Mittlerer Energiebedarf je Taxischicht in Abhängigkeit der Szenarien

Szenarien	Mittlerer Energiebedarf je Taxischicht in kWh			
	Gesamt	Tagesschicht	Nachtschicht	Doppelschicht
<b>Option 80 / 100 kW</b>	38,0	35,9	45,7	36,4
<b>Option 80 / 2 EVSE</b>	37,5	35,9	45,7	35,6
<b>Basic 80</b>	37,6	35,9	45,7	35,6
<b>Option 40 / 100 kW</b>	35,2	33,5	41,3	34,0
<b>Option 40 / 2 EVSE</b>	34,4	33,1	40,5	32,9
<b>Basic 40</b>	34,5	33,1	40,7	33,2
<b>Public 80</b>	34,9	31,6	39,9	34,7
<b>Public 40</b>	32,8	29,7	37,2	32,6

Tabelle 6-7 fasst nochmals den mittleren Energiebedarf je Taxischicht in Abhängigkeit der Szenarien sowie für alle Betriebsarten zusammen. Die zugehörigen Durchschnittswerte schwanken hierbei je nach Betriebsart und Anteil der rein elektrisch durchführbaren Taxifahrten zwischen 30 und 46 kWh.

Eine genaue Analyse darüber, zu welchen Anteilen der benötigte Energiebedarf an öffentlichen bzw. betrieblichen Ladestationen gedeckt wird und zu welchen Tageszeiten dies erfolgt, wird im anschließenden Kapitel durchgeführt.

Abgesehen vom Energiebedarf je Taxischicht sind die Jahresenergiemengen pro E-Taxi und jene für die gesamte Flotte von Interesse. Diese dienen vor allem im Kapitel 8 „Umwelteffekte und Energiebereitstellung“ als Datenbasis für die Ermittlung der mög-

lichen Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. des notwendigen Ausbaus von erneuerbaren Energiequellen beim Umstieg von konventionell auf rein elektrisch betriebene Taxifahrzeugen.

An dieser Stelle wird lediglich eine Zusammenfassung der berechneten Werte je Szenario, Betriebsart und Durchdringungsrate gegeben.

Tabelle 6-8: Mittlerer Jahresenergiebedarf je E-Taxi in Abhängigkeit der Szenarien

Szenarien	Mittlerer Jahresenergiebedarf je E-Taxi in kWh/a			
	Gesamt	Tagesschicht	Nachtschicht	Doppelschicht
<b>Option 80 / 100 kW</b>	13.269	8.596	9.643	21.392
<b>Option 80 / 2 EVSE</b>	13.101	8.593	9.633	20.910
<b>Basic 80</b>	13.118	8.593	9.633	20.962
<b>Option 40 / 100 kW</b>	12.298	8.029	8.713	19.964
<b>Option 40 / 2 EVSE</b>	12.003	7.923	8.552	19.352
<b>Basic 40</b>	12.062	7.925	8.583	19.497
<b>Public 80</b>	12.202	7.562	8.428	20.424
<b>Public 40</b>	11.439	7.119	7.843	19.170

Tabelle 6-8 stellt den mittleren Jahresenergiebedarf je E-Taxi in Abhängigkeit der betrachteten Szenarien und Betriebsarten dar. Die Größenverhältnisse ergeben sich analog zu den Jahreskilometerleistungen. Bei Division aus Energiebedarf und Kilometerleistung je Kalenderjahr resultiert der bereits zuvor ermittelte spezifische Energiebedarf von etwa 0,27 kWh/km (inkl. Nebenverbraucher auch während der Standdauer am TSP). Den höchsten Energiebedarf besitzen wiederum die E-Taxis der Betriebsart „Doppelschicht“, allen voran jene des Szenarios „Option 80 / 100 kW“. In diesem Fall beträgt der Jahresenergiebedarf durchschnittlich 21,4 MWh je E-Taxi und Jahr. Über alle Betriebsarten gemittelt reicht die Bandbreite des Jahresenergiebedarfs je E-Taxi von etwa 11,4 bis 13,4 MWh.

Zum Vergleich beträgt der elektrische Energiebedarf eines durchschnittlichen österreichischen Haushaltes im Mittel ca. 4,5 MWh pro Jahr [85]. Der Jahresenergiebedarf eines

E-Taxis entspricht damit etwa dem Jahresenergiebedarf von zwei bis drei mittleren Haushalten.

Der Jahresenergiebedarf der gesamten E-Taxiflotte ist trivialerweise proportional zur Durchdringungsrate der E-Taxis. Tabelle 6-9 listet den Gesamtjahresenergiebedarf für die Flottengrößen von 500, 2.500 und 4.500 E-Taxis auf. Dabei liegt der Jahresenergiebedarf für 500 E-Taxis im Bereich von 5,6 bis 6,7 GWh. Bei einer Flottengröße von 4.500 E-Taxis werden hingegen gesamt zwischen 51,5 und 59,7 GWh pro Jahr benötigt.

Was dies in Bezug auf die generierten CO<sub>2</sub>-Emissionen bedeutet und welcher Ausbau an erneuerbaren Energieträgern zur Deckung dieses Energiebedarfs erforderlich ist, wird – wie bereits angedeutet – detailliert in Kapitel 8 „Umwelteffekte und Energiebereitstellung“ betrachtet.

Tabelle 6-9: Jahresenergiebedarf der gesamten E-Taxiflotte in Abhängigkeit der Durchdringungsrate an E-Taxis

Szenarien	Jahresenergiebedarf der gesamten E-Taxiflotte in GWh/a		
	500 E-Taxis	2.500 E-Taxis	4.500 E-Taxis
<b>Option 80 / 100 kW</b>	6,66	33,21	59,71
<b>Option 80 / 2 EVSE</b>	6,57	32,80	58,95
<b>Basic 80</b>	6,57	32,80	59,03
<b>Option 40 / 100 kW</b>	6,16	30,74	55,34
<b>Option 40 / 2 EVSE</b>	6,04	30,01	54,01
<b>Basic 40</b>	6,02	30,08	54,28
<b>Public 80</b>	6,05	30,32	54,91
<b>Public 40</b>	5,63	28,20	51,48

In den folgenden Abschnitten werden im Hinblick auf Anzahl, Energiemenge, Standort, Ladebeginn und -dauer die Gesamtheit der Ladevorgänge noch näher betrachtet sowie je Szenario und Betriebsart untersucht. Im Anschluss darauf folgt eine Analyse der resultierenden Nutzungsgrade der einzelnen Ladestationen und der voraussichtlichen Netzbelastungen, die sich daraus ergeben.

### 6.3.3 Öffentliche und betriebliche Ladevorgänge

Um einen reibungslosen E-Taxibetrieb aufrecht zu erhalten, muss der im Kapitel zuvor ermittelte Energiebedarf entsprechend der gegebenen Rahmenbedingungen und Möglichkeiten entweder an öffentlichen oder an betrieblichen Ladestationen gedeckt werden. In welcher Weise sich die dafür notwendigen Ladevorgänge verteilen, wird folgend näher analysiert.

Wie bereits im Kapitel 6.2.2 „Szenarienauswahl“ definiert, wird – abgesehen von den Alternativszenarien „Public“ – eine betriebliche Ladeinfrastruktur am vorgeschriebenen Abstellplatz vorausgesetzt. Eine Nutzung dieser Ladestationen erfolgt dabei in jener Zeitspanne, in der sich das E-Taxi außer Betrieb befindet.

Unter diesen Voraussetzungen besteht für E-Taxis im 1-Schichtbetrieb grundsätzlich die Möglichkeit, während der zweiten Tageshälfte die Antriebsbatterie an der betrieblichen LIS wieder aufzuladen. In Bezug auf die Betriebsarten „Tages- und Nachtschicht“ ergibt sich damit am vorgeschriebenen Abstellplatz ein mittlerer Energiebedarf von rund der halben Batteriekapazität<sup>168</sup>. Die zugehörige Zeitspanne, in der sich das E-Taxi außer Betrieb befindet, liegt für 95 % der Fälle über 8 Stunden (Details dazu folgen). Dadurch können Ladestationen mit niedriger Ladeleistung eingesetzt werden. Wird angenommen, dass an den gesetzlich vorgeschriebenen Abstellplätzen eine entsprechende betriebliche Ladeinfrastruktur installiert wird (z. B. AC- oder DC-Wallboxen mit Ladeleistungen  $\geq 11$  kW) und die E-Taxis ebenfalls dafür ausgelegt sind, dann kann die Antriebsbatterie bis zum Beginn der nächsten Taxischicht wieder vollgeladen werden.

Reicht hingegen die Standdauer am Abstellplatz nicht aus bzw. ist gar keine betriebliche Ladeinfrastruktur vorhanden, dann muss der Energiebedarf vorrangig an öffentlichen Ladestationen gedeckt werden. Diesbezüglich besitzen E-Taxis der Betriebsart „Doppelschicht“ aufgrund der nahezu durchgängigen Betriebszeiten kaum die Möglichkeit zur Nutzung von betrieblichen Ladestationen.

Noch drastischer ist es bei allen E-Taxis der Alternativszenarien „Public“. Hier kann generell nur an öffentlichen Ladestationen geladen werden, da bedingt durch die gewählte Definition keine betriebliche Ladeinfrastruktur vorhanden ist. Damit wird der Extremfall abgedeckt, bei dem zwar die gesetzlich vorgeschriebenen Abstellplätze für Taxis vorhanden sind, aber de facto keine betrieblichen Ladestationen errichtet werden.

---

<sup>168</sup> Bei einer zugrundeliegenden, verbauten Batteriekapazität von 80 kWh ergibt sich somit ein Energiebedarf von rund 40 kWh.

Wie bereits im Kapitel 6.2.3 „Szenarienbasierter LIS-Ausbau“ erläutert, können die Gründe dafür sehr vielfältig ausfallen und u. a. auf baulichen, rechtlichen und/oder finanziellen Hürden basieren.

Aufgrund der großen Bandbreite der unterschiedlichen Szenarien und Betriebsarten ergeben sich mitunter große räumliche und zeitliche Unterschiede bei der Deckung des zugrundeliegenden Energiebedarfs. Diese werden im Anschluss für die Gesamtheit aller notwendigen Ladevorgänge analysiert und dafür u. a. die folgenden Kennwerte je Szenario, Betriebsart und Durchdringungsrate untersucht:

- Anzahl der Ladevorgänge an betrieblichen und öffentlichen Ladestationen
- Energiemenge je Ladevorgang sowie betrieblicher und öffentlicher Anteil
- Beginn und Ladedauer je Ladevorgang an betrieblicher und öffentlicher LIS

Im ersten Schritt wird betrachtet, wie viele Ladevorgänge im Mittel je E-Taxis benötigt werden, um den Energiebedarf einer ganzen Taxischicht zu decken, und welche zugehörigen Häufigkeitsverteilungen sich dabei ergeben.

### **Anzahl der Ladevorgänge**

Je nachdem, welche Rahmenbedingungen im betrachteten Szenario vorliegen, teilen sich die Energiemenge und die Anzahl der Ladevorgänge unterschiedlich auf betriebliche bzw. öffentliche Ladestationen auf.

Diesbezüglich beschreibt Abbildung 6-15 die Häufigkeit je Taxischicht, mit der E-Taxis betriebliche Ladestationen nutzen, und wie sich diese für die drei Betriebsarten unterscheidet.

Da betriebliche Ladevorgänge nach der zugrunde gelegten Annahme nur zwischen zwei Taxischichten – also in der betriebsfreien Zeit – durchgeführt werden, kann je Taxischicht maximal ein betrieblicher Ladevorgang auftreten.

Darüber hinaus wird in der vorliegenden Arbeit die Durchführung eines betrieblichen Ladevorgangs über die Verweildauer am vorgeschriebenen Abstellplatz geregelt bzw. vorgegeben (Annahme: Vollladung bei einer Standdauer von  $\geq$  vier Stunden). Dadurch weisen die Ergebnisse aller Szenarien dieselben Verhältnisse auf ( $\pm$  ein Prozentpunkt).

Dies gilt natürlich nur, sofern das betriebliche Laden nicht generell ausgeschlossen wird, wie in den Szenarien „Public“. Jedenfalls wird in weiterer Folge bei der Beschreibung der individuellen Ergebnisse nur dann explizit auf die verschiedenen Varianten eingegangen, wenn sich signifikante Unterschiede ergeben.

Logischer Weise treten bei den Szenarien „Public“ keine betrieblichen Ladevorgänge auf (siehe Abbildung 6-15). Alle Ladevorgänge müssen an öffentlichen Ladestationen durchgeführt werden. Für die Szenarien „Basic“ und „Option“ ergibt sich – ebenfalls wie erwartet – bezüglich der Betriebsarten „Tages- und Nachtschicht“ jeweils ein betrieblicher Ladevorgang pro Taxischicht. Es wird dementsprechend nach Betriebsschluss stets am betrieblichen Abstellplatz geladen. Aufgrund der langen Standdauer von über vier Stunden ist ein Ausbau von betrieblicher Ladeinfrastruktur für E-Taxis im 1-Schichtbetrieb durchaus empfehlenswert.

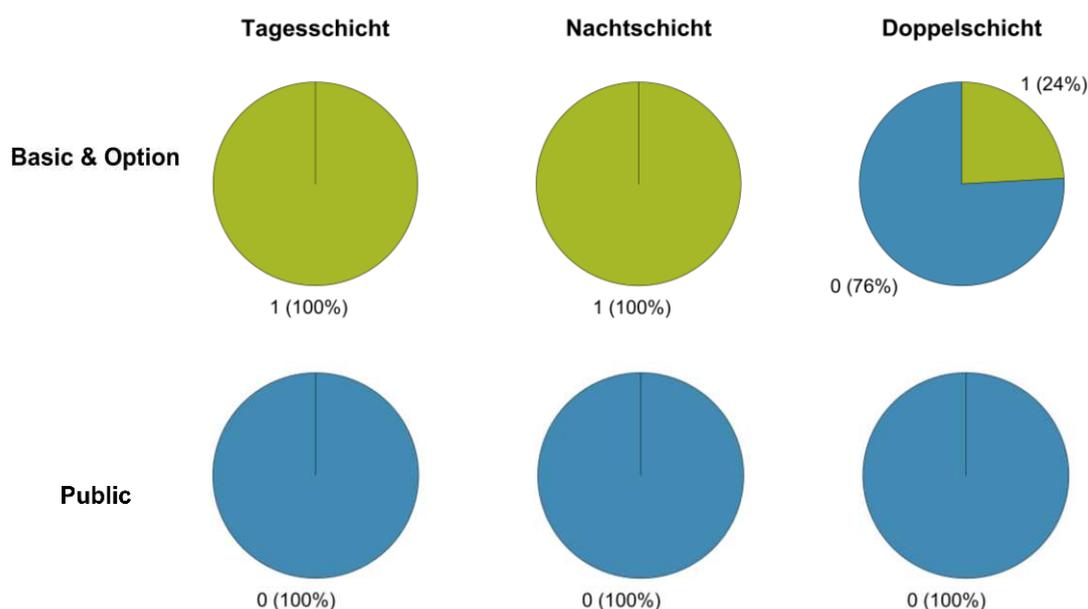


Abbildung 6-15: Häufigkeit von Ladevorgängen je Taxischicht an betrieblicher Ladeinfrastruktur (angeführt ist die Anzahl der Ladevorgänge und in Klammern der prozentuale Anteil)

Hingegen spielen betriebliche Ladevorgänge für E-Taxis im 2-Schichtsystem allgemein eine untergeordnete Rolle, da diese – wenn überhaupt – lediglich in den späten Nachtstunden/frühen Morgenstunden kurzzeitig am betrieblichen Abstellplatz geparkt werden und ansonsten nahezu durchgängig in Betrieb sind. Dies spiegeln die Ergebnisse aus Abbildung 6-15 wider. Im Rahmen der Doppelschicht werden unabhängig von der Batteriekapazität sowie der Durchdringungsrate durchschnittlich nach ca. einem Viertel der Taxischichten betriebliche Ladevorgänge vorgenommen. Der restliche Energiebedarf muss an öffentlichen Ladestationen gedeckt werden. Im Durchschnitt über alle Betriebsarten ergibt somit für die Szenarien „Basic“ und „Option“ eine mittlere Anzahl von 0,6 betrieblicher Ladevorgänge je Taxischicht.

Die Häufigkeit von Ladevorgängen an öffentlichen Ladestationen weist im Gegensatz zum betrieblichen Laden eine signifikante Abhängigkeit von der Batteriekapazität auf. Bei Variation der maximalen Ladeleistung bzw. der Anzahl der Ladepunkte je Ladestandort ist wiederum keine Änderung der Ergebnisse (größer einem Prozentpunkt) erkennbar.

Jedenfalls gilt, je größer die Batteriekapazität desto geringer wird die Anzahl der öffentlich durchgeführten Ladevorgänge. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da die zur Verfügung stehende Reichweite einen immer größeren Teil der täglichen Kilometerleistung abdeckt.

Wie in Abbildung 6-16 ersichtlich, führt dies bei den Szenarien „Basic“ und „Option“ so weit, dass E-Taxis im 1-Schichtbetrieb bei einer Batteriekapazität von 80 kWh fast ausschließlich an betrieblichen Ladestationen geladen werden, da die vorhandene Batteriekapazität für die Gesamtheit aller Taxifahrten je Taxischicht ausreicht (vergleiche dazu auch Abbildung 6-14). Unter diesen Voraussetzungen wird bei der Betriebsart „Nacht-schicht“ in nicht mehr als 3 % der Fälle ein Ladevorgang an öffentlichen Ladestationen durchgeführt. Im Rahmen der Betriebsart „Tagesschicht“ treten überhaupt keine öffentlichen Ladevorgänge auf.

Wie bereits erläutert, besitzen E-Taxis, die der Doppelschicht zugeordnet sind, wesentlich seltener die Möglichkeit betriebliche Ladevorgänge durchzuführen. Dies spiegelt sich in der deutlich größeren Anzahl an öffentlichen Ladevorgängen wider (siehe Abbildung 6-16). Im Rahmen von Doppelschichten werden bei „Basic 40 & Option 40“ im Mittel je Taxischicht 1,4 Ladevorgänge an öffentlichen Ladestationen vorgenommen. Da im Rahmen der Doppelschicht zwei Taxischichten je Tag durchgeführt werden, entspricht dies durchschnittlich fast drei Ladevorgängen pro Kalendertag. Bei größerer Batteriekapazität reduziert sich wiederum die Anzahl der Ladevorgänge. Für „Basic 80 & Option 80“ (Doppelschicht) sind es somit durchschnittlich 0,6 Ladevorgänge je Taxischicht an öffentlichen Ladestationen.

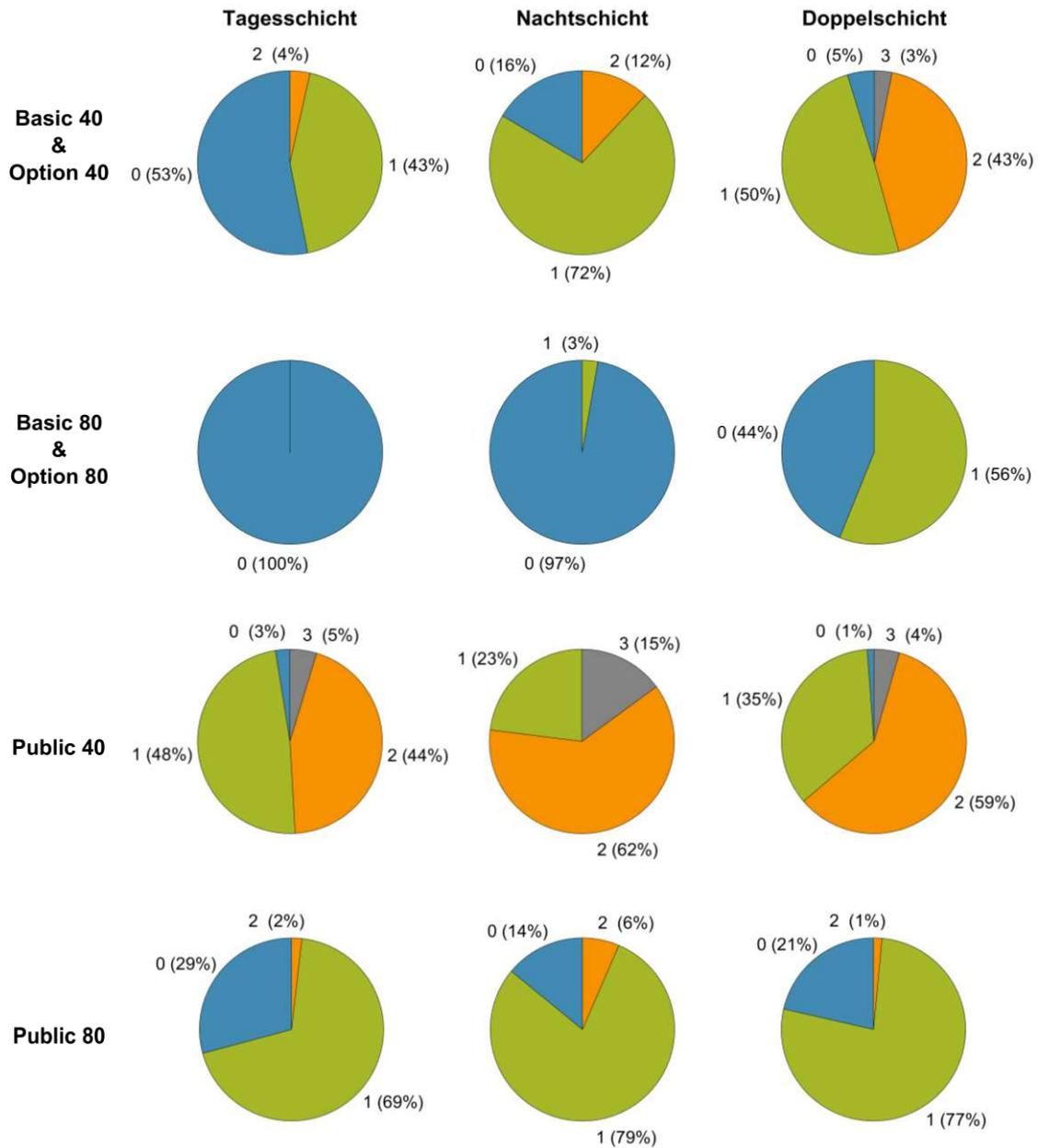


Abbildung 6-16: Häufigkeit von Ladevorgängen je Taxischicht an öffentlicher Ladeinfrastruktur (angeführt ist die Anzahl der Ladevorgänge und in Klammern der prozentuale Anteil)

Die Alternativszenarien „Public“ nehmen auch diesbezüglich eine Sonderstellung ein. Da der gesamte Energiebedarf hierbei ausschließlich an öffentlichen Ladestationen gedeckt wird, resultiert daraus einerseits ein entsprechender Anstieg der Häufigkeiten von öffentlichen Ladevorgängen und andererseits eine Abnahme der Unterschiede zwischen

1-Schicht- und 2-Schichtsystem. Für die Variante „Public 40“ liegt die Anzahl der Ladevorgänge an öffentlichen Ladestationen über alle Betriebsarten im Mittel bei 1,7 Ladevorgängen je Taxischicht sowie für „Public 80“ bei 0,8. Die Ergebnisse unterliegen jedoch einer großen Streuung. Daher führen manche E-Taxis weitaus häufiger öffentliche Ladevorgänge durch. Im Szenario „Public 40“ laden z. B. rund 15 % der E-Taxis sogar 3-mal je Nachtschicht (1-Schichtsystem). Analoges gilt natürlich auch in anderer Richtung.

Tabelle 6-10: Mittlere Anzahl von Ladevorgängen je Taxischicht an öffentlicher Ladeinfrastruktur

Szenarien	Mittlere Anzahl von öffentlichen Ladevorgängen			
	Gesamt	Tagesschicht	Nachtschicht	Doppelschicht
<b>Basic 40 &amp; Option 40</b>	1,1	0,5	1,0	1,4
<b>Basic 80 &amp; Option 80</b>	0,3	0,0	0,0	0,6
<b>Public 40</b>	1,7	1,5	1,9	1,7
<b>Public 80</b>	0,8	0,7	0,9	0,8

Als Zusammenfassung der Ergebnisse aus Abbildung 6-16 dient die Tabelle 6-10. In dieser sind nochmals für alle Betriebsarten die zugehörigen Mittelwerte der Anzahl von öffentlichen Ladevorgängen aufgelistet.

Als nächster Kennwert wird nun die Energiemenge der Ladevorgänge herangezogen und für öffentliche und betriebliche Ladestationen separat analysiert.

### Geladene Energiemenge je Ladevorgang

Betriebliche Ladevorgänge finden stets nach Ende der Taxischicht – also in der betriebsfreien Zeit – am vorgeschriebenen Abstellplatz statt. Da im Rahmen der Szenarien „Public“ nur öffentliche Ladeinfrastruktur verfügbar ist, werden dementsprechend keine betrieblichen Ladevorgänge durchgeführt. Anders verhält sich dies bei den Szenarien „Basic“ und „Option“.

In der vorliegenden Arbeit wird vereinfacht angenommen, dass am betrieblichen Abstellplatz eine Vollladung<sup>169</sup> durchgeführt wird, sofern die Standdauer  $\geq$  vier Stunden beträgt. Ist dies der Fall, dann besitzt die geladene Energiemenge eine klare Abhängigkeit von der Batteriekapazität und von der Betriebsart – jedoch nicht von der Durchdringungsrate. In Abbildung 6-17 sind die zugehörigen Verteilungen der geladenen Energiemenge je Ladevorgang an betrieblichen Ladestationen dargestellt.

Der Mittelwert je betrieblichem Ladevorgang beträgt bei Varianten mit einer Antriebsbatterie von 40 kWh – über alle Betriebsarten – rund 23,5 kWh. Die mittleren 50 % der Ladevorgänge besitzen dabei eine Energiemenge zwischen 21,2 und 31,3 kWh (0,25-Quantil und 0,75-Quantil). Das Maximum erreicht fast 36 kWh. Dies entspricht der Höhe der gesamten nutzbaren Batteriekapazität.

Hingegen umfasst der durchschnittliche betriebliche Ladevorgang unter Verwendung einer verbauten Batteriekapazität von 80 kWh eine Energiemenge von ca. 41,6 kWh. Hierbei liegt das 0,25-Quantil bei 33,1 kWh und das 0,75-Quantil bei 50,9 kWh. Das Maximum erzielt wiederum annähernd die maximal nutzbare Batteriekapazität von 72 kWh.

Da mit einer Kapazität von 80 kWh bereits der gesamte Energiebedarf je Taxischicht für nahezu alle E-Taxis im 1-Schichtbetrieb (Tages- und Nachtschicht) abdeckt werden kann, spiegeln die Verläufe der Szenarien „Basic 80 & Option 80“ aus Abbildung 6-17 (rechts) die Verteilung des Energiebedarfs je Taxischicht wider (vergleiche dazu ebenfalls Abbildung 6-14). Bei der Nutzung einer noch größeren Batteriekapazität im 1-Schichtbetrieb würde somit der Energiebedarf am betrieblichen Ladestandort nicht mehr erheblich ansteigen.

Analoges gilt ebenfalls für den privaten Personenverkehr. Die größeren Batteriekapazitäten neuerer E-Fahrzeugmodelle führen nicht zwangsläufig zu einem höheren Gesamtenergiebedarf<sup>170</sup>, da dieser primär mit den täglich zurückgelegten Wegen gekoppelt ist. Ändert sich die Kilometerleistung nicht, dann bleibt auch der Energiebedarf annähernd konstant. Was hingegen mit hoher Wahrscheinlichkeit angepasst wird, ist das Ladeverhalten.

---

<sup>169</sup> In der vorliegenden Arbeit wird als Vollladung ein Ladevorgang bis zum maximalen Batterie-ladezustand verstanden. Dies sind hier 95 % der verbauten Batteriekapazität.

<sup>170</sup> Unter der Annahme, dass der spezifische Energiebedarf unverändert bleibt.

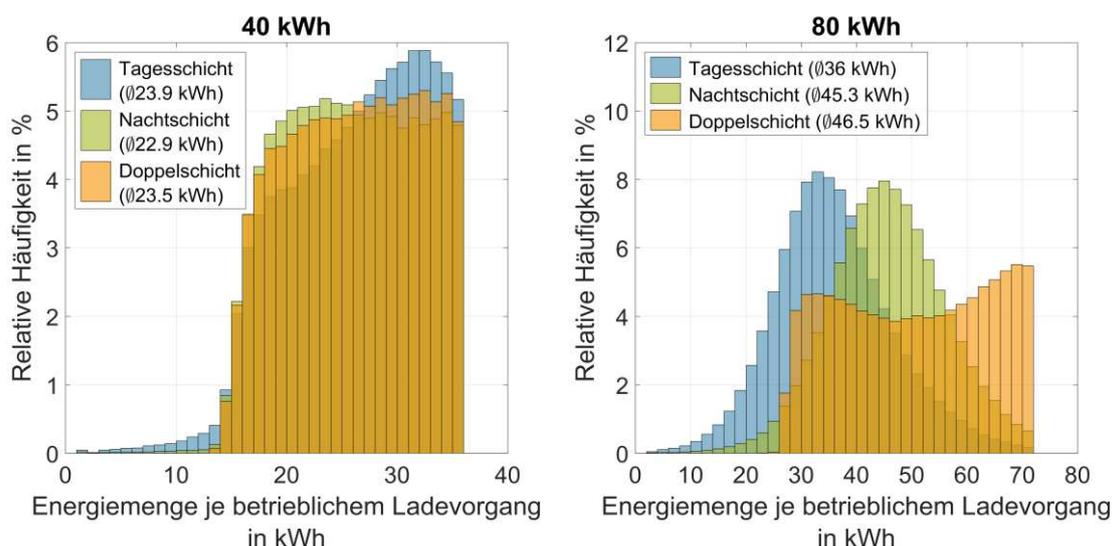


Abbildung 6-17: Verteilung der geladenen Energiemenge je Ladevorgang an betrieblichen Ladestationen („Basic & Option“)

Im Gegensatz zu den betrieblichen Ladevorgängen spiegelt die geladene Energiemenge an öffentlichen Ladestationen nicht die Verteilung des Energiebedarfs der gesamten Taxischicht wider, sondern hängt vor allem vom Energiebedarf der einzelnen Taxifahrten<sup>171</sup> sowie dem Batterieladezustand am Ende des Ladevorgangs<sup>172</sup> ab. Eine untergeordnete Rolle spielen diesbezüglich die Wege zur Ladestationen bzw. retour zum Taxistandplatz. Für eine korrekte Berechnung sollten diese dennoch berücksichtigt werden und sind daher in den Kalkulationen der vorliegenden Arbeit enthalten.

Bis auf die Abhängigkeit von der zugrunde gelegten Batteriekapazität ergeben sich hierfür keine nennenswerten Relationen zu anderen Szenarienparametern (kleiner  $\pm 1$  %). Aus diesem Grund stellt Abbildung 6-18 die Häufigkeitsverteilung der geladenen Energiemenge je Ladevorgang an öffentlichen Ladestationen ausschließlich für die beiden Varianten 40 und 80 kWh ohne Unterscheidung der verschiedenen Szenarien dar. Die

<sup>171</sup> Reicht der aktuelle Batterieladezustand für die kommende Fahrt nicht mehr aus, dann wird ein Ladevorgang an der nächstgelegenen, verfügbaren Ladestation getätigt (vergleiche dazu u. a. Abbildung 6-2)

<sup>172</sup> In der vorliegenden Arbeit wird angenommen, dass alle öffentlichen Ladevorgänge ab einem Batterieladezustand von 65 % vorzeitig beenden werden, um das Verhältnis aus geladener Energiemenge und Ladedauer zu optimieren. Dies erhöht die zeitliche Ladeeffizienz und damit die Verfügbarkeit der E-Taxis (vergleiche dazu u. a. Abbildung 6-3).

Ergebnisse sind somit für alle Szenarien „Basic“, „Option“ und „Public“ gleichermaßen gültig.

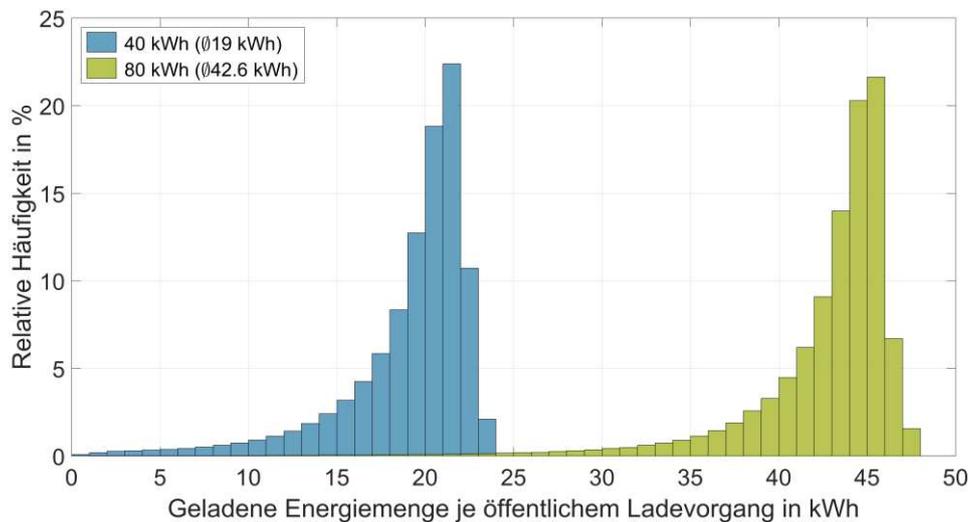


Abbildung 6-18: Verteilung der geladenen Energiemenge je Ladevorgang an öffentlichen Ladestationen (gültig für alle Szenarien)

Der Mittelwert je öffentlichem Ladevorgang beträgt bei Varianten mit einer Antriebsbatterie von 40 kWh rund 19 kWh (für alle Betriebsarten zusammen). Die mittleren 50 % der Ladevorgänge besitzen dabei eine Energiemenge zwischen 18 und 21,4 kWh (0,25-Quantil und 0,75-Quantil). Das Maximum erreicht nahezu 24 kWh. Dies entspricht jener Energiemenge, die maximal bis zum Erreichen des gewählten Ladeabbruchkriteriums geladen wird (von 5 % bis 65 % SOC).

In Bezug auf eine verbaute Batteriekapazität von 80 kWh umfasst der durchschnittliche öffentliche Ladevorgang eine Energiemenge von 42,6 kWh. Hierbei liegt das 0,25-Quantil bei 41,8 kWh und das 0,75-Quantil bei 45,2 kWh. Das Maximum beträgt fast 48 kWh (dies sind wiederum 60 % der verbaute Batteriekapazität).

### **Beginn und Dauer der Ladevorgänge**

Neben den bereits beantworteten Fragen bezüglich „wo wird wie oft und wie viel geladen“ soll nun auch den Aspekten „wann“ und „wie lange“ nachgegangen werden. Dabei sind vorrangig die Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien und Betriebsarten zu analysieren.

Der Beginn der betrieblichen Ladevorgänge ist in der vorliegenden Arbeit starr mit dem Ende der Taxischicht gekoppelt. Es wird pauschal angenommen, dass nach Betriebsende alle E-Taxis umgehend den vorgeschriebenen Abstellplatz aufsuchen und dort, an

der betrieblichen Ladestation einen Ladevorgang beginnen. Wie im Abschnitt zuvor beschrieben, werden betriebliche Ladevorgänge ausschließlich während der betriebsfreien Zeit vorgenommen. Zusätzlich muss in der vorliegenden Arbeit für die Durchführung von betrieblichen Ladevorgängen die Voraussetzung einer minimalen Zeitspanne – vom Erreichen des Abstellplatzes bis zum Beginn der nächsten Taxischicht – von zumindest vier Stunden erfüllt sein.

Wie Abbildung 6-15 zeigt, trifft dies für E-Taxis der „Tages- und Nachtschicht“ (1-Schichtsystem) in den Szenarien „Basic & Option“ stets zu. Für E-Taxis, die im 2-Schichtsystem betrieben werden, gilt dies jedoch lediglich in rund einem Viertel der Fälle.

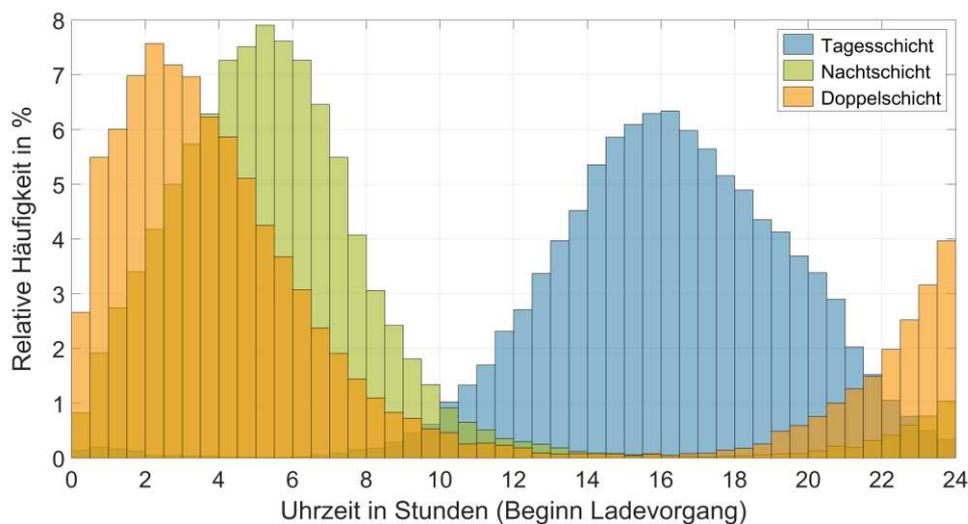


Abbildung 6-19: Verteilung der Startzeitpunkte für Ladevorgänge an betrieblichen Ladestationen (Die Ergebnisse gelten für die Szenarien „Basic & Option“)

Zur Veranschaulichung der Startzeitpunkte von betrieblichen Ladevorgängen sind in Abbildung 6-19 die zugehörigen Verteilungen je Betriebsart dargestellt. Es zeigt sich deutlich der erwähnte Zusammenhang zwischen Taxischichtende und Ladebeginn (vergleiche ebenfalls Tabelle 4-2).

Wie zuvor angemerkt, werden im Rahmen der Doppelschicht nur sehr selten betriebliche Ladevorgänge vorgenommen (vergleiche dazu Abbildung 6-15). In den meisten Fällen kommt es lediglich zu einem LenkerInnen-Wechsel. Wenn doch ein betrieblicher Ladevorgang erfolgt, dann hauptsächlich nach dem Schichtende in den späten Nachtstunden.

In Bezug auf die Startzeitpunkte der betrieblichen Ladevorgänge, die nach Ende einer Doppelschicht auftreten, ergibt sich im Vergleich zu den Werten aus Tabelle 4-2 eine

leichte Verschiebung zu früheren Uhrzeiten. Der Grund dafür beruht auf der hier definierten Voraussetzung, dass betriebliche Ladevorgänge erst ab einer Standdauer von mindestens vier Stunden durchgeführt werden. Daher treten im Rahmen von Doppelschichten vor allem dann betriebliche Ladevorgänge auf, wenn die Taxischichten – meist aufgrund von geringer Nachfrage – früher beendet werden. Falls also nach Ende einer Doppelschicht doch ein betrieblicher Ladevorgang durchgeführt wird, dann startet dieser mit der höchsten Wahrscheinlichkeit kurz nach 02:00 Uhr nachts.

Für die Szenarien „Basic & Option“ ergeben sich ebenfalls deutlich erkennbare Maximalwerte bei den Startzeitpunkten der betrieblichen Ladevorgänge. Bei E-Taxis, die der Tagesschicht zugeordnet sind, tritt die größte Häufigkeit bei ca. 16:00 Uhr auf und für die Nachtschicht liegt das Maximum bei etwa 05:00 Uhr.

Dabei ergibt sich die dafür erforderliche Ladedauer allgemein aus dem Verhältnis von benötigter Energiemenge zu verfügbarer Ladeleistung, wobei sich die maximal nutzbare Ladeleistung aus dem kleinsten gemeinsamen Nenner der vorhandenen Ladetechnologien beim E-Taxi und an der Ladestation ergibt (siehe Kapitel 2.3 „Ladeinfrastruktur“).

Bei der Verwendung einer Ladestation und eines E-Fahrzeuges mit maximaler Ladeleistung von 11 kW (z. B. für AC 3 x 230 V x 16 A) können innerhalb von vier Stunden in etwa 25 kWh und bei einer maximalen Ladeleistung von 22 kW (3 x 230 V x 32 A) rund 50 kWh geladen werden. Dies gilt für eine Vollladung bis  $SOC_{max}$  (vergleiche dazu Abbildung 6-3). Die Ladeleistung von 11 bzw. 22 kW würde daher reichen, um die laut Abbildung 6-17 am betrieblichen Abstellplatz benötigte Energiemenge zu laden.

Dabei ist dies natürlich nicht generell von der zugrundeliegenden Ladesteckvorrichtung bzw. Ladetechnologie zugänglich, sofern eine Kompatibilität zwischen E-Fahrzeug und Ladestation gegeben ist. Jedoch zeigt sich, dass heutige E-Fahrzeuge in Bezug auf die maximale Ladeleistung beim AC-Laden großteils nicht über 11 kW hinausgehen. Viele der aktuellen E-Fahrzeug-Modelle werden lediglich mit einem einphasigen Onboard-Charger ausgestattet. Dabei sind Ladeleistungen von max. 3,7 kW bei 16 A und 7,4 kW bei 32 A<sup>173</sup> möglich.

Aber auch DC-Wallboxen mit CCS- oder CHAdeMO-Ladesteckvorrichtungen stellen sinnvolle Alternativen für den betrieblichen Einsatz dar. Zwar sind diese im Vergleich zu AC-Wallboxen kostenintensiver, können aber durch die Verwendung eigener Umrichter

---

<sup>173</sup> Generell sind einphasige Ladevorgänge mit 32 A, auch wenn E-Fahrzeug diese Variante ermöglichen, in Bezug auf die resultierende Schiefast im elektrischen Verteilernetz kritisch zu betrachten.

das E-Fahrzeug direkt mit Gleichstrom versorgen. Dadurch wird die limitierende Leistungsgrenze des Onboard-Chargers umgangen, und DC-Ladevorgänge von über 20 kW werden nahezu unabhängig vom E-Fahrzeugtyp möglich.

Ungeachtet der Diskussion hinsichtlich Ladeleistung und Ladetechnologie stellt sich die Frage, wie lange E-Taxis am vorgeschriebenen Abstellplatz verweilen. Abbildung 6-20 stellt diesbezüglich die Verteilung der maximalen Standdauer am Abstellplatz für 1- und 2-Schichtsystem dar, wobei als maximale Standdauer am Abstellplatz die betriebsfreie Zeit zwischen zwei Taxischichten angenommen wird. Die in Abbildung 6-20 ersichtlichen, zyklischen Komponenten ergeben sich durch jene Tage, an denen die E-Taxis nicht in Betrieb genommen werden (wie z. B. Wochenende, Urlaub oder Krankenstand).

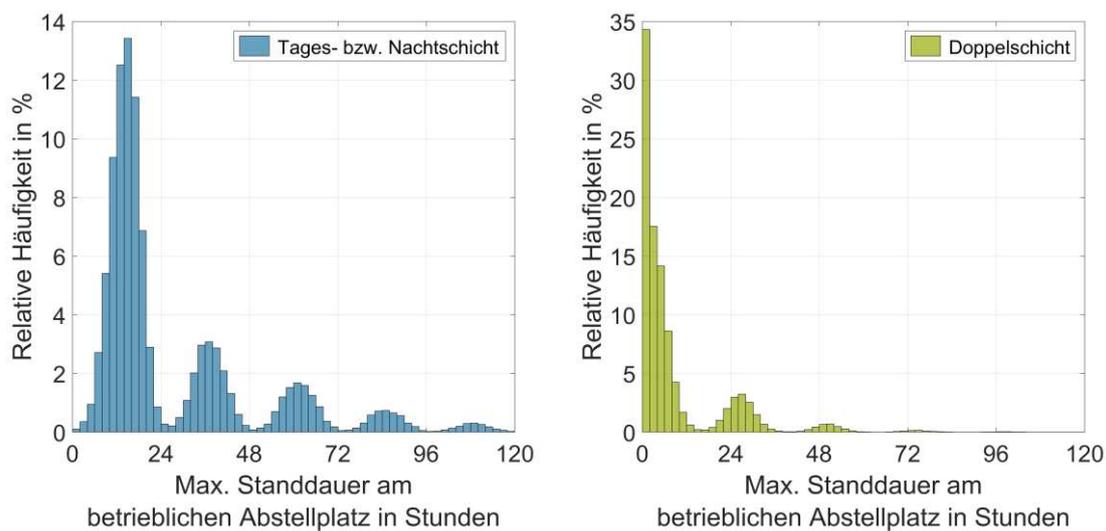


Abbildung 6-20: Verteilung der max. Standdauer am betrieblichen Abstellplatz in der betriebsfreien Zeit (zwischen zwei Taxischichten)

Die maximale Standdauer beträgt für E-Taxis im 1-Schichtsystem in 95 % der Fälle über 8 Stunden und in weniger als einem halben Prozent der Fälle unter 4 Stunden (siehe Abbildung 6-15). Bei E-Taxis im 2-Schichtsystem kommt es zweimal pro Tag zu einem Schichtende, jedoch reicht die Zeitspanne beim FahrerInnen-Wechsel zwischen Tages- und Nachtschicht definitionsbedingt nicht zur Durchführung eines betrieblichen Ladevorganges aus (stets  $\leq 3,2$  Stunden). Betriebliche Ladevorgänge können daher nur nach Ende der gesamten Doppelschicht stattfinden. Deshalb sind in Abbildung 6-20 (rechts) lediglich die Verteilung der maximalen Standdauer nach Ende der zweiten Taxischicht (Nachtschicht) eingetragen. Hierbei kommt es in 48 % der Fälle zu einer maximalen

Standdauer von  $\geq 4$  Stunden. Dies bedeutet, dass es in etwa nach jeder zweiten Doppelschicht zu einem betrieblichen Ladevorgang kommt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei Durchführung eines betrieblichen Ladevorgangs die maximale Standdauer am betrieblichen Abstellplatz ausreicht, um bei einer Batteriekapazität von 40 kWh mit 11 kW Ladeleistung das Auslangen zu finden. Für 80 kWh würden dementsprechend 22 kW genügen.

Nimmt man diese beiden Batteriekapazitäten und Leistungswerte sowie die Formeln (6.1) bis (6.5) als Grundlage zur Ermittlung der Ladedauer, dann ergeben sich für die betrieblichen Ladevorgänge die in Abbildung 6-21 dargestellten Verteilungen. Bedingt durch die zugrundeliegenden Annahmen dauert kein betrieblicher Ladevorgang über 5 Stunden. Die arithmetischen Mittelwerte betragen 3,9 und 3,5 Stunden für die Varianten 40 kWh und 80 kWh.

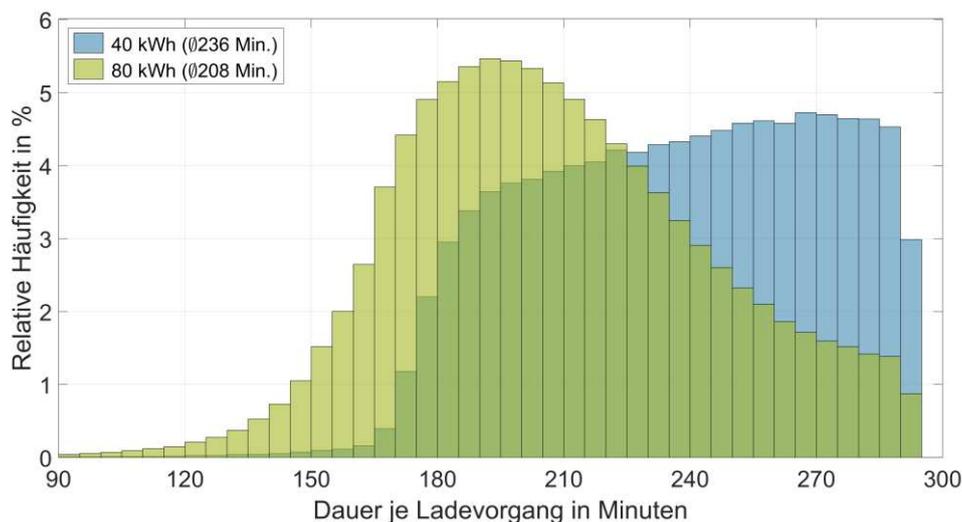


Abbildung 6-21: Verteilung der Dauer je Ladevorgang an betrieblichen Ladestationen  
(Annahme bezüglich Ladeleistung: 11 kW bei 40 kWh und 22 kW bei 80 kWh)

Im Folgenden soll nun erneut den beiden Fragen nachgegangen werden, wann Ladevorgänge beginnen und wie lange diese dauern, jedoch diesmal für die noch nicht betrachtete Durchführung von Ladevorgängen an öffentlichen Ladestationen.

Da im Rahmen der Szenarien „Basic & Option“ nach jeder Tages- und Nachtschicht (1-Schichtbetrieb) das E-Taxi an einer betrieblichen Ladestation wieder vollgeladen wird, steht zu Beginn jeder Taxischicht ( $> 99,5\%$ ) die gesamte nutzbare Batteriekapazität zur Verfügung. Dies führt dazu, dass der Startzeitpunkt von öffentlichen Ladevorgängen eine starke Abhängigkeit von der Größe der Antriebsbatterie erlangt. Je höher die

Batteriekapazität desto später muss geladen werden. Dies lässt sich einfach anhand der Verteilungen für die Tagesschicht (Varianten 40 kWh vs. 80 kWh der Szenarien „Basic & Option“) nachvollziehen. In Abbildung 6-22 sind diese im linken Bereich der Darstellung ersichtlich. Das Maximum der Startzeitpunkte an öffentlichen Ladestationen<sup>174</sup> wandert von kurz vor 16:00 Uhr für 40 kWh in Richtung kurz nach 18:00 Uhr bei 80 kWh. Wie bei der Tagesschicht kommt es bei der Nachtschicht zu Verschiebungen aufgrund der Batteriegröße.

Allgemein sind jedoch die Verteilungen der Betriebsarten „Tages- und Nachtschicht“ für die Szenarien „Basic 80 & Option 80“ mit Vorsicht zu genießen, da die Grundgesamtheit an öffentlichen Ladevorgängen im Vergleich zur Doppelschicht und generell zu den Szenarien mit 40 kWh sehr gering ist. Wie in Abbildung 6-16 ersichtlich, führen E-Taxis, die im 1-Schichtbetrieb eingesetzt sind und eine Batteriekapazität von 80 kWh besitzen, nur noch vereinzelt öffentliche Ladevorgänge durch. Der Energiebedarf wird fast ausschließlich an betrieblichen Ladestationen gedeckt.

Darüber hinaus zeigt sich im Rahmen der Szenarien „Basic 80 & Option 80“ für die Startzeitpunkte der öffentlichen Ladevorgänge eine Abhängigkeit vom jeweiligen Wochentag. Dies lässt sich in Abbildung 6-22 (links unten) durch das Auftreten von mehreren lokalen Extremwerten bei der Betriebsart „Nachtschicht“ erkennen.

In Bezug auf die Betriebsart „Doppelschicht“ besitzt die Verteilung der Startzeitpunkte von öffentlichen Ladevorgängen eine Abhängigkeit von der Batteriekapazität und stellt in gewisser Weise eine Kombination aus den Verteilungen für Tages- und Nachtschicht dar. Da es hierbei jedoch nicht nach jeder Taxischicht zu einem betrieblichen Ladevorgang kommt, ist die Verschiebung nicht so eindeutig zu erkennen, wie es u. a. für die Tagesschicht der Fall ist.

Abbildung 6-22 (rechts oben) stellt zusätzlich die Häufigkeitsverteilungen der Ladestartzeitpunkte für die Szenarien „Public“ dar. Alle zugehörigen Varianten der Szenarien „Public“ haben hier gemein, dass Ladevorgänge ausschließlich an öffentlichen Ladestationen durchgeführt werden. Dadurch verteilen sich die Startzeitpunkte stärker über die gesamte zugrundeliegende Betriebszeit. Eine weitere Eigenschaft, die sich durch den

---

<sup>174</sup> Der Startzeitpunkt wird ebenfalls durch die Fahrt zur Ladestation beeinflusst. Je nach Szenario liegt die mittlere Fahrdauer von TSP zu öffentlicher LIS zwischen 5 und 10 Minuten.

Wegfall der betrieblichen Ladevorgänge ergibt, ist die Unabhängigkeit der Startzeitpunkte von der Batteriekapazität. Für verschiedene Batteriekapazitäten lassen sich somit keine nennenswerten Unterschiede erkennen.

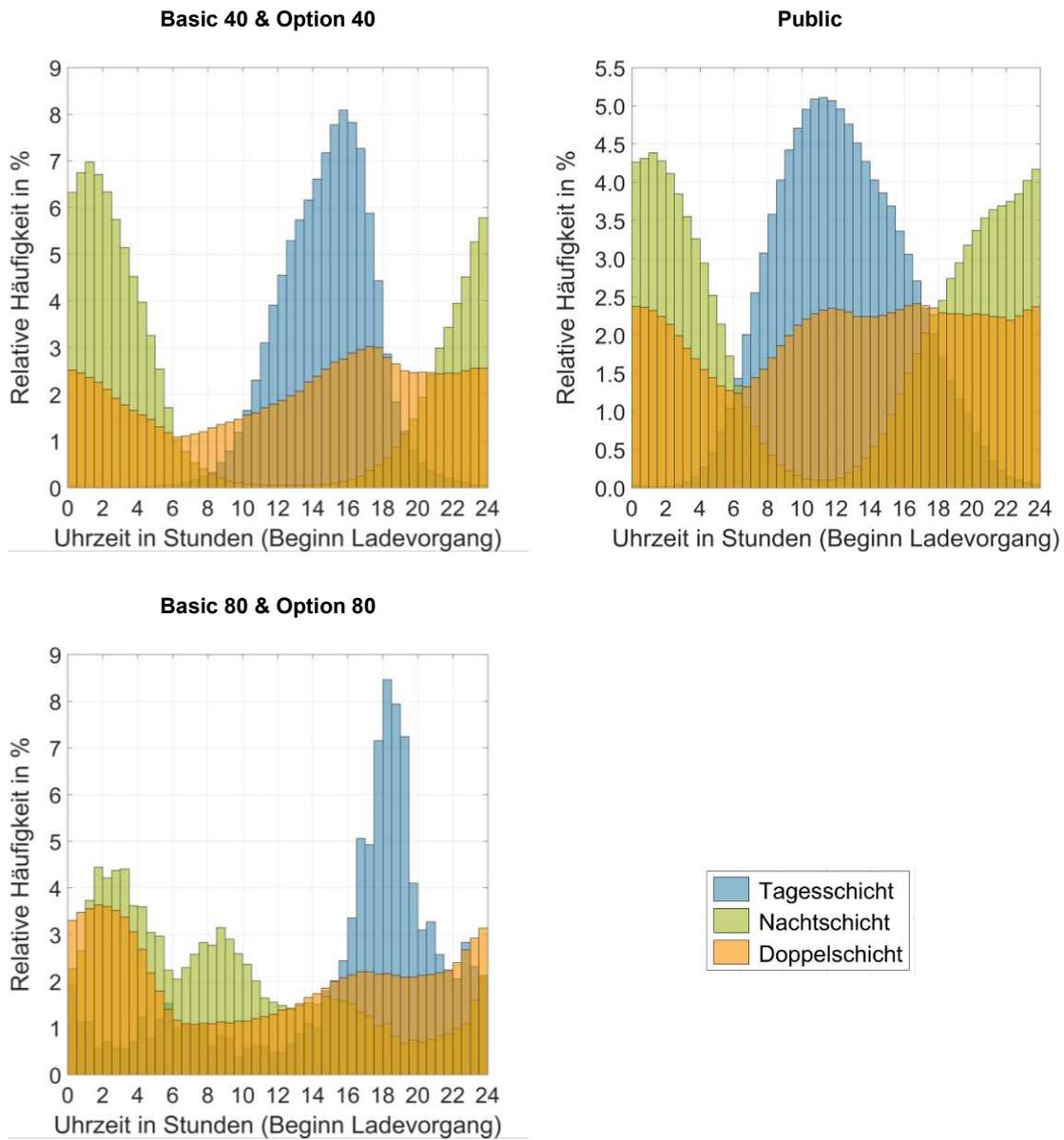


Abbildung 6-22: Verteilung der Startzeitpunkte für Ladevorgänge an öffentlichen Ladestationen

Wie im Rahmen der Szenarienauswahl festgelegt, werden in der vorliegenden Arbeit an öffentlichen DC-Schnellladestationen zwei Ladeleistungsklassen berücksichtigt (50 und

100 kW). Da die Ladedauer neben der Ladeleistung auch von der geladenen Energiemenge abhängt und dies wiederum durch die Batteriekapazität begrenzt wird, ergeben sich vier Varianten für die Dauer der öffentlichen Ladevorgänge. Die zugehörigen Verteilungen sind in Abbildung 6-23 dargestellt (gültig für die Szenaren „Basic“, „Option“ und „Public“).

Mit größerer Batteriekapazität steigt die geladene Energiemenge je öffentlichem Ladevorgang (vergleiche Abbildung 6-18). Im Gegensatz dazu sinkt die Ladedauer mit Steigerung der Ladeleistung, wobei die mittlere Ladedauer an einer öffentlichen Ladestation, abhängig von den berücksichtigten Rahmenbedingungen, zwischen 14 und 56 Minuten dauert<sup>175</sup>.

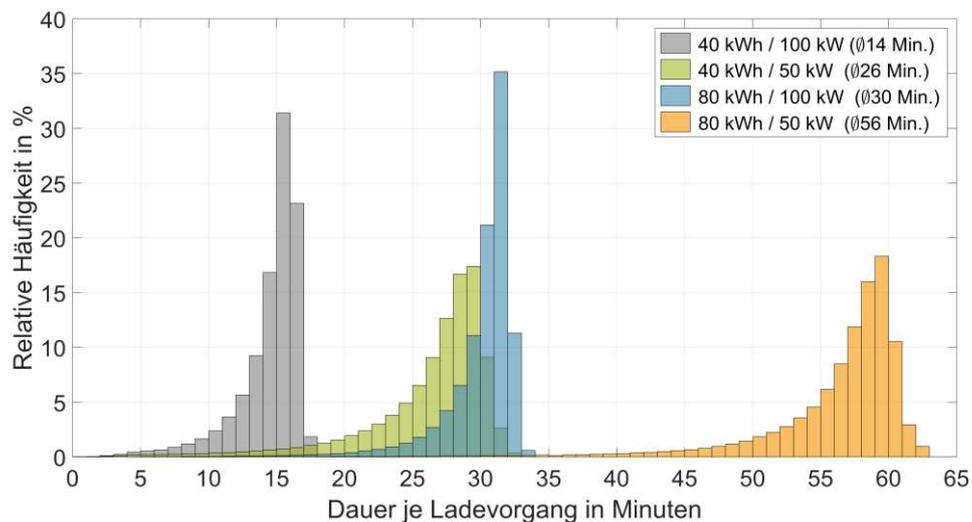


Abbildung 6-23: Verteilung der Dauer je Ladevorgang an öffentlichen Ladestationen

Dabei spielt es jedoch keine Rolle, ob ein betriebliches Laden ermöglicht wird oder nicht. In der vorliegenden Arbeit werden öffentliche Ladevorgänge generell dann gestartet, wenn die Batteriekapazität für die nächste Taxifahrt nicht mehr ausreicht.

Darüber hinaus werden Ladevorgänge stets bei einem fest vorgeschriebenen Batterieladezustand  $SOC_{max\_charge}$  wieder beendet (siehe Kapitel 6.1.3). Dieser beträgt 65 % für öffentliches Laden (Teilladung) und 95 % an betrieblichen Ladestationen (Vollladung).

<sup>175</sup> Nachtrag: Abhängig vom betrachteten Szenario reicht die Standdauer am TSP lediglich in 10 bis 20 % der Fälle aus, um in dieser Zeit den notwendigen Ladevorgang an einer öffentlichen Ladestation zu absolvieren (vergleiche dazu Abbildung 6-2, Fall A).

Damit lässt sich der zugehörige Batterieladezustand  $SOC_{start}$  zu Beginn des Ladevorgangs aus der Differenz von  $SOC_{max\_charge}$  und der geladenen Energiemenge (bezogen auf die zugrundeliegende Batteriekapazität) ermitteln.

Der durchschnittliche  $SOC_{start}$  an betrieblichen Ladestationen beträgt hiermit rund 30 % (bei 40 kWh) und 42 % (bei 80 kWh). Für öffentliches Laden fällt der durchschnittliche  $SOC_{start}$  wesentlich geringer aus und liegt für eine zugrunde gelegte Batteriekapazität von 40 kWh bei 17 % und für 80 kWh bei 12 %. Die zugehörigen Verteilungen sind in den Abbildung A-8 und Abbildung A-9 im Anhang ersichtlich.

### **Vergleich betriebliches und öffentliches Laden**

Es wurden bereits Anzahl und Energiemenge sowie Beginn und Dauer für betriebliches und öffentliches Laden getrennt voneinander analysiert. Um darüber hinaus die beiden Ladestandortarten direkt miteinander vergleichen zu können, sind in Abbildung 6-24 nochmals Energiemenge, Anzahl und Dauer aller Ladevorgänge an öffentlicher sowie betrieblicher Ladeinfrastruktur nach ihren Anteilen dargestellt<sup>176</sup>.

Wie sich anhand der Tortendiagramme anschaulich visualisieren lässt, kommt es bei einer Steigerung der Batteriekapazität in Bezug auf die Ladebedarfsdeckung zu einer Verschiebung von öffentlichen in Richtung betrieblichen Ladestandorten. Dies führt soweit, dass sich bei einer Änderung der zugrundeliegenden Batteriekapazität von 40 auf 80 kWh die Verhältnisse für betriebliches und öffentliches Laden nahezu umkehren. Werden bei 40 kWh noch 61 % der gesamten Energiemenge an öffentlichen und 39 % an betrieblichen Ladestationen geladen, sind es bei 80 kWh nur mehr 38 % (öffentliches Laden) zu 62 % (betriebliches Laden).

Im Hinblick auf die Aufteilung der Anzahl an durchgeführten Ladevorgängen ergeben sich ähnliche Verhältnisse. Bei einer Batteriekapazität von 40 kWh werden rund zwei Drittel der Ladevorgänge an öffentlichen Ladestationen vorgenommen und bei 80 kWh sind es 38 % (vergleiche Abbildung 6-24).

Wie bereits beschrieben, kommen in der vorliegenden Arbeit an betrieblichen Ladestandorten und einer zugrundeliegenden Batteriekapazität von 40 kWh maximal 11 kW zum Einsatz. Bei 80 kWh beträgt die maximale Ladeleistung 22 kW. In beiden Fällen ist die Ladeleistung jedoch deutlich geringer als beim öffentlichen Laden (50 bzw. 100 kW). Um dieselbe Energiemenge an einer betrieblichen Ladestation aufzunehmen, wird unter

---

<sup>176</sup> Da in den Szenarien „Public“ ausschließlich öffentliche Ladevorgänge vorgenommen werden, gibt es auch keine Vergleichswerte zwischen betrieblichem und öffentlichem Laden.

den gegebenen Rahmenbedingungen zumindest die doppelte Ladedauer benötigt. Im Extremfall liegen die Ladedauern sogar um fast das Zehnfache auseinander.

Daher wird in allen betrachteten Szenarien mehr Zeit für betriebliches Laden verwendet, als für das Laden an den öffentlichen Ladestationen notwendig ist. Dies gilt ebenfalls dann, wenn in Summe mehr Energie an öffentlichen Ladestandorten aufgenommen wird als an betrieblichen (siehe Varianten „Basic 40 & Option 40“ in Abbildung 6-24).

Bei einer Batteriekapazität von 40 kWh und einer maximalen Ladeleistung an öffentlichen DC-Schnellladestationen von 50 kW fallen rund 21 % der gesamten Ladedauer auf öffentliches Laden. Bedingt durch die große Differenz in der Ladegeschwindigkeit werden in dieser Zeit jedoch ca. 61 % der gesamten Energiemenge geladen.

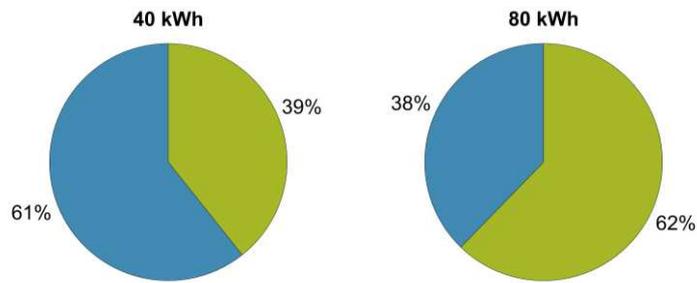
Wird hingegen die Batteriekapazität auf 80 kWh vergrößert, dann zeigt sich aufgrund der beschriebenen Verschiebung ein höherer Ladebedarf an betrieblichen Ladestationen (+ 23 Prozentpunkte). Dadurch sinkt im gleichen Ausmaß die geladene Energiemenge an öffentlichen Ladestandorten und damit die in Summe dafür benötigte Ladedauer.

Durch eine Verdopplung der Ladeleistung von 50 auf 100 kW wird ebenfalls eine Reduktion der Ladedauer an öffentlichen Ladestationen herbeigeführt. Die Aufteilung der geladenen Energiemenge zwischen öffentlichem und betrieblichem Laden wird dabei jedoch nicht beeinflusst – lediglich die „Ladegeschwindigkeit“ an öffentlichen Ladestationen steigt an. Für eine Ladeleistung von 100 kW und einer Batteriekapazität von 40 kWh besitzt die Gesamtladedauer an öffentlichen Ladestationen einen verminderten Anteil von 13 %. Bei einer Batteriekapazität von 80 kWh fallen sogar bereits 92 % der Gesamtladedauer auf betriebliches Laden.

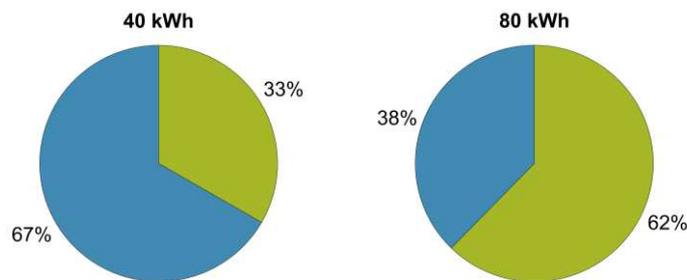
Zusätzlich zu den Vergleichen aus Abbildung 6-24 fasst Tabelle 6-11 nochmals alle Mittelwerte für Anzahl, Dauer und Energiemenge je Ladevorgang getrennt für öffentliches und betriebliches Laden zusammen. Darüber hinaus sind die Ergebnisse für die Szenarien „Basic & Option“ und „Public“ separat ausgewiesen.

Wie in Tabelle 6-11 ersichtlich, ergeben sich für die Dauer sowie für die Energiemenge der öffentlichen Ladevorgänge gleiche Mittelwerte – unabhängig davon, ob nur öffentlich („Public“) oder auch betrieblich („Basic & Option“) geladen werden kann. Dies beruht auf der Annahme, dass stets dann geladen wird, wenn der aktuelle Batterieladezustand nicht mehr für die darauffolgende Taxifahrt ausreicht.

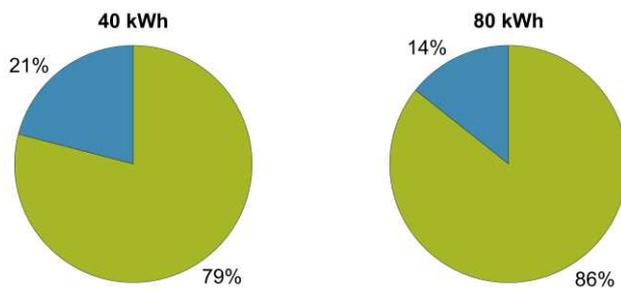
**Anteil an der geladenen Gesamtenergiemenge (Basic & Option)**



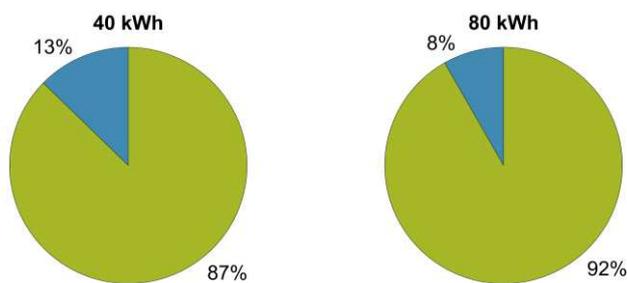
**Anteil an der Gesamtzahl aller Ladevorgänge (Basic & Option)**



**Anteil an der Gesamtladedauer (Basic & Option 50 kW)**



**Anteil an der Gesamtladedauer (Option 100 kW)**



■ Öffentliches Laden ■ Betriebliches Laden

Abbildung 6-24: Vergleich der Anteile von geladener Energie, Anzahl der Ladevorgänge und Gesamtladedauer

Darüber hinaus endet jeder öffentliche Ladevorgang definitionsbedingt beim Erreichen des vorgegebenen Batterieladezustands von 65 %. In Folge dessen variiert die mittlere geladene Energiemenge je öffentlichem Ladevorgang nahezu proportional zur gewählten Batteriekapazität.

Tabelle 6-11: Mittelwerte für Anzahl und Dauer der Ladevorgänge sowie für die geladenen Energiemengen an öffentlicher bzw. betrieblicher LIS (Basis- und Alternativszenarien)

	Basic 40 & Option 40	Basic 80 & Option 80	Public 40	Public 80
<b>Mittlere Dauer je Ladevorgang</b>				
Öffentliches Laden <sup>1)</sup>	26 Min.	56 Min.	26 Min.	56 Min.
Betriebliches Laden <sup>2)</sup>	236 Min.	208 Min.	---	---
<b>Mittlere Energiemenge je Ladevorgang</b>				
Öffentliches Laden	19,0 kWh	42,6 kWh	19,0 kWh	42,6 kWh
Betriebliches Laden	23,5 kWh	41,6 kWh	---	---
<b>Mittlere Anzahl der Ladevorgänge je Taxischicht</b>				
Öffentliches Laden	1,1	0,3	1,7	0,8
Betriebliches Laden	0,6	0,6	---	---
<b>Mittlere Energiemenge je Taxischicht</b>				
Öffentliches Laden	21,4 kWh	14,3 kWh	32,8 kWh	34,9 kWh
Betriebliches Laden	13,1 kWh	23,3 kWh	---	---

<sup>1)</sup> Bei einer Erhöhung der Ladeleistung von 50 auf 100 kW halbiert sich die angegebenen Ladedauer nahezu (vergleiche Abbildung 6-23). Alle anderen Mittelwerte bleiben davon unbeeinträchtigt.

<sup>2)</sup> Am betrieblichen Ladestandort wird bei einer zugrundeliegenden Batteriekapazität von 40 kWh eine maximale Ladeleistung von 11 kW angenommen. Bei 80 kWh beträgt die maximale Ladeleistung 22 kW. Dadurch sinkt die mittlere Ladedauer trotz Erhöhung des Ladebedarfs.

Für die Szenarien „Basic 80 & Option 80“ ergeben sich durch die Verdopplung der Batteriekapazität einerseits größerer Energiemengen je öffentlichem Ladevorgang und andererseits Erhöhungen des Energiebedarfs an betrieblichen Ladestationen. Da der Gesamtenergiebedarf laut Tabelle 6-11 und Abbildung 6-24 mit größerer Batteriekapazität in Richtung betrieblicher LIS verschoben wird und dennoch die Häufigkeit der betrieblichen Ladevorgänge unverändert bleibt (im Mittel 0,6), muss die Anzahl der

öffentlichen Ladevorgänge entsprechend stark sinken. Daraus resultiert eine Reduktion von 1,1 auf 0,6 öffentliche Ladevorgänge je Taxischicht.

Aufgrund der fehlenden betrieblichen Ladeinfrastruktur muss im Rahmen der Szenarien „Public“ über 50 % häufiger an öffentlichen Ladestationen geladen werden als bei den Szenarien „Basic & Option“. Die höhere Anzahl der Ladevorgänge wirkt sich darauf folgend proportional auf die mittlere Energiemenge je Taxischicht aus und erhöht somit den Energiebedarf für das öffentliche Laden.

Gesamtheitlich betrachtet ist die Anzahl aller Ladevorgänge je Taxischicht (als Summe aus betrieblichen und öffentlichen Ladevorgängen) für die Szenarien „Basic & Option“ und „Public“ nahezu ident. Für den mittleren Gesamtenergiebedarf je Taxischicht ergeben sich jedoch geringfügige Abweichungen, da der Anteil der rein elektrisch durchführbaren Taxifahrten bei den Szenarien „Public“ niedriger ausfällt (vergleiche dazu Abbildung 6-12).

## 7 Auswirkungen auf das elektrische Verteilernetz

Ganz allgemein verursacht jedes Elektrofahrzeug beim Laden ein batterie-ladezustands- wie auch zeitabhängiges Leistungsprofil (siehe Abbildung 2-9). Werden z. B. an einem Ladestandort zwei Ladepunkten mit einer Maximalleistung von je 50 kW installiert, so kommt es zu einer zusätzlichen Belastung des lokalen, elektrischen Verteilernetzes von bis zu 100 kW. Da jedoch einerseits nicht immer alle Ladepunkte belegt sind und andererseits die Ladeleistung ab einem gewissen Ladezustand zum Schutz der Antriebsbatterie vor Überladung reduziert wird, tritt der maximale Leistungswert nicht dauerhaft auf.

Daher stellt sich die Frage nach Häufigkeit, Intensität und Dauer der resultierenden Lastspitzen. Ausgehend von der Betrachtung der szenarienabhängigen Nutzungsgrade je Ladepunkt werden im vorliegenden Kapitel der Verlauf und die zugehörigen Extremwerte der resultierenden Lastprofile analysiert sowie die Folgen für das elektrische Verteilernetz diskutiert.

Wie aus den Ergebnissen des Forschungsprojekts „ZENEM“ [53] bereits hervorgeht, stellen Unterspannungen und Überlastungen der Transformatoren in städtischen Netzgebieten nicht die primären Herausforderungen bei räumlich konzentrierten Ladevorgängen im Bereich von 50 bis 100 kW je Ladestandort dar. Kernproblem ist jeweils die relevante Strangleitung, die ohne entsprechendes Lastmanagement rasch zu überlasten droht [54]. Daher wird im Folgenden auch eine Möglichkeit zur Reduktion der Anschlussleistung am Ladestandort untersucht.

### 7.1 Nutzungshäufigkeit der Ladepunkte

Der Nutzungsgrad der Ladestationen stellt eine wesentliche Leistungskennzahl (KPI, englisch Key-Performance-Indicator) beim Betrieb von Ladeinfrastruktur dar. Darüber hinaus ist der Nutzungsgrad ein erster Indikator für die resultierende Höhe von Energie- und Leistungsbezug am Ladestandort.

Der Nutzungsgrad eines Ladepunktes (LP) wird hier als Verhältnis aus Gesamtladedauer  $Nutzung_{LP}$  und Betrachtungszeitraum  $Einsatzzeit_{LP}$  angesehen, wobei sich die Gesamtladedauer wiederum aus der Summe aller Ladedauern  $t_L$  der im Betrachtungszeitraum von 365 Tagen (ein Kalenderjahr) durchgeführten Ladevorgänge ergibt. Formel (7.1) erläutert nochmals den Zusammenhang:

$$Nutzungsgrad_{LP} = \frac{Nutzung_{LP}}{Einsatzzeit_{LP}} = \frac{\sum t_L}{365 \text{ Tage}} \quad (7.1)$$

Wie bereits gezeigt, wird der notwendige LIS-Ausbau stark von den Rahmenbedingungen des betrachteten Szenarios beeinflusst (siehe Abbildung 6-11). Diese Abhängigkeit ergibt sich ebenfalls für den Nutzungsgrad.

In der vorliegenden Arbeit wurde für den bedarfsgerechten LIS-Ausbau eine Minimierung der gewichteten Anfahrtswege zur Ladeinfrastruktur als Zielfunktion der Optimierung gewählt. Dadurch werden öffentliche Ladestationen vor allem dort errichtet, wo eine hohe Nachfrage an Taxis vorherrscht. Dies führt zu einer Anordnung der „bedarfsgerechten“ LIS-Standorte entlang der Hauptverkehrsadern mit einer Verdichtung in Richtung Stadtkern (vergleiche dazu Abbildung 6-5).

Dennoch ergeben sich auch vereinzelt LIS-Standorte in den Randbezirken. Diese Ladestandorte tragen zwar zur ganzheitlichen Minimierung der gewichteten Anfahrtswege bei, jedoch weisen sie in Bezug auf den Nutzungsgrad niedrigere Werte auf als Ladestandorte in „zentraler“ Lage. Unter Verwendung des hier eingesetzten „Leit- und Reservierungssystems“ (LURS) wird stets der räumlich am nächsten gelegene Ladepunkt mit der geringsten Anfahrts- und Wartezeit ausgewählt.

Abbildung 7-1 stellt die Nutzungsgrade der öffentlichen Ladepunkte für alle betrachteten Szenarien und eine Durchdringungsrate von 500 E-Taxis als Box-Plot dar. Angezeigt werden im Boxen-Bereich die mittleren 50 % der berechneten Daten (0,25-Quantil, Median, 0,75-Quantil) und die Antennen (engl. whiskers) erstrecken sich hierbei nach unten bis zum Minimum und nach oben bis zum Maximum. Die Ergebnisse zu den Durchdringungen von 2.500 und 4.500 E-Taxis sind im Anhang unter „Ergänzende Abbildungen“ sowie „Ergänzende Tabellen“ nachzuschlagen.

Prinzipiell ergibt sich folgendes Bild: Je höher der Anteil des öffentlichen Ladens an der geladenen Gesamtenergiemenge desto größer ist der mittlere Nutzungsgrad der öffentlichen Ladepunkte.

Bei den Szenarien „Basic 80 & Option 80“ werden bereits 62 % der Gesamtenergiemenge an betrieblichen Ladestationen gedeckt. Infolgedessen ist der Bedarf an öffentlicher LIS geringer als bei den Szenarien „Basic 40 & Option 40“ (39 % betriebliches Laden, vergleiche dazu Abbildung 6-24).

Dennoch reduziert sich die Anzahl der öffentlichen Ladestationen nicht im gleichen Umfang wie der Energiebedarf. Als Grund dafür kann die zeitlich inhomogene Verteilung des Ladebedarf (siehe Abbildung 6-22) bzw. das notwendige Mindestmaß an räumlicher LIS-Verteilung genannt werden. Dies führt dazu, dass mit Vergrößerung der Batteriekapazität die Relation von Ladepunkten zu Ladevorgängen trotz allem ansteigt und im Umkehrschluss der Nutzungsgrad von öffentlichen Ladepunkten zwangsläufig sinkt.

Der Median des Nutzungsgrades aller öffentlichen Ladepunkte beträgt bei einer Durchdringung von 500 E-Taxis für die Szenarien „Option 80“ rund 37 %, für das Szenarien „Basic 80“ ca. 43 % und für die „Basic 40 & Option 40“ im Mittel 53 %.

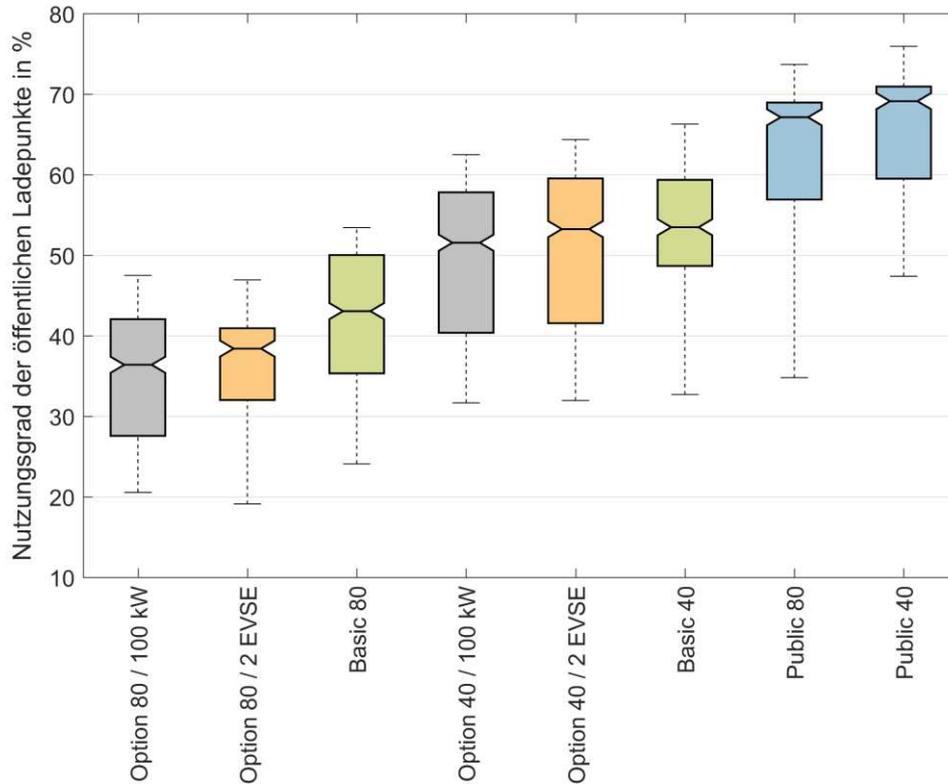


Abbildung 7-1: Verteilung der Nutzungsgrade von öffentlichen Ladepunkten (500 E-Taxis)  
(dargestellte Kennwerte: Maximum, 0,75-Quartil, Median, 0,25-Quantil, Minimum)

Im Rahmen der Szenarien „Public“ werden ausschließlich öffentliche Ladevorgänge durchgeführt, wodurch die Nutzungshäufigkeit von öffentlichen Ladepunkten weiter ansteigt. Bei einer Durchdringung von 500 E-Taxis ergibt sich der zugehörige Median in Abhängigkeit der zugrunde gelegten Batteriekapazität zu 67 % (80 kWh) bzw. 69 % (40 kWh). Der maximale Nutzungsgrad eines öffentlichen Ladepunktes liegt bei rund 76 % und tritt im Szenario „Public 40“ auf.

Wie im Anhang ersichtlich, ergeben sich für die beiden weiteren Durchdringungen von 2.500 und 4.500 E-Taxis im Mittel ähnliche Ergebnisse. Jedoch steigt der Nutzungsgrad tendenziell mit der Anzahl der E-Taxis leicht an und die Streuung der Nutzungsgrade nimmt zu. Aufgrund dessen erlangen manche Ladepunkte sogar noch höhere Auslastungen. Es gibt aber auch vereinzelte Ladestationen, die dadurch kaum mehr genutzt

werden und lediglich zu Stoßzeiten in Verwendung sind (siehe „Ergänzende Abbildungen“ bzw. „Ergänzende Tabellen“ im Anhang).

In Tabelle 7-1 sind nochmals die unterschiedlichen Quantil-Werte der Nutzungsgrade für öffentliche Ladepunkte in Abhängigkeit der betrachteten Szenarien zusammengefasst (500 E-Taxis). Bedingt durch das berücksichtigte „Leit- & Reservierungssystem“ (LURS) zeigt sich generell für alle Szenarien ein hoher Nutzungsgrad. Dabei liegen die Minima meist über 20 %. Dies bedeutet eine minimale Belegung von zumindest 4 bis 5 Stunden je Tag und Ladepunkt.

Tabelle 7-1: Nutzungsgrad der öffentlichen Ladestationen je Szenario (500 E-Taxis)

Szenarien	Nutzungsgrad der öffentlichen Ladepunkte in %				
	Maximum	0,75-Quantil	Median	0,25-Quantil	Minimum
<b>Option 80 / 100 kW</b>	47	42	36	28	21
<b>Option 80 / 2 EVSE</b>	47	41	38	32	19
<b>Basic 80</b>	53	50	43	35	24
<b>Option 40 / 100 kW</b>	62	58	52	40	32
<b>Option 40 / 2 EVSE</b>	64	60	53	42	32
<b>Basic 40</b>	66	59	53	49	33
<b>Public 80</b>	74	69	67	57	35
<b>Public 40</b>	76	71	69	59	47

Aus den Werten für die Nutzungsgrade und die Ladedauer je Ladevorgang (vergleiche Abbildung 6-23) lassen sich auf einfache Weise die Anzahl der Ladevorgänge je Tag und Ladepunkt ermitteln. Wie in Tabelle 7-2 ersichtlich, führen die hohen Nutzungsgrade

mitunter zu einer enormen Anzahl an Ladevorgängen. Der Median liegt je nach Szenario zwischen 10 und 53 Ladevorgänge pro öffentlichem Ladepunkt<sup>177</sup>.

Wie bereits dargestellt, beruhen diese hohen Werte auf der Berücksichtigung des „Leit- & Reservierungssystem“ (LURS) sowie der Annahme eines geschlossenen DC-Schnell-ladenetzwerks mit einem optimierten LIS-Ausbau ohne marktgetriebene Konkurrenzangebote an öffentlichen Lademöglichkeiten.

Tabelle 7-2: Anzahl der täglichen Ladevorgänge an öffentlichen Ladepunkten (LP) für eine Durchdringung von 500 E-Taxis

Szenarien	Anzahl der öffentlichen Ladevorgänge je LP und Tag				
	Maximum	0,75-Quantil	Median	0,25-Quantil	Minimum
<b>Option 80 / 100 kW</b>	23	20	18	13	10
<b>Option 80 / 2 EVSE</b>	12	11	10	8	5
<b>Basic 80</b>	14	13	11	9	6
<b>Option 40 / 100 kW</b>	64	60	53	39	32
<b>Option 40 / 2 EVSE</b>	36	33	30	23	18
<b>Basic 40</b>	38	34	30	26	18
<b>Public 80</b>	19	18	17	14	9
<b>Public 40</b>	43	40	38	34	26

Beim Alternativszenario „Option 40 / 100 kW“ kommen jedoch noch anderer Gründe für die außerordentlich hohe Anzahl an Ladevorgängen hinzu. Der geringe Energiebedarf je Ladevorgang und die größere „Ladegeschwindigkeit“ führen zu deutlich kürzeren Ladedauern. Folglich wird eine höhere Anzahl von Ladevorgängen ermöglicht.

<sup>177</sup> Die relativ große Streuung der Ergebniswert resultieren aus der starken Diversität der gewählten Szenarienparameter.

Angesichts der aktuell noch sehr überschaubaren Durchdringung an E-Fahrzeugen von etwa 0,6 Prozent<sup>178</sup> [86] des österreichischen PKW-Bestandes orientieren sich heutige öffentlich zugängliche Schnellladestationen in Bezug auf die Anzahl der Ladevorgänge eher an der unteren Grenze des angeführten Bereiches. Dabei ergeben sich natürlich je nach LIS-Standort deutliche Unterschiede.

Die Analyse der Nutzungsgrade und der Anzahl der täglichen Ladevorgänge gibt erste Aufschlüsse bezüglich Auslastung der Ladeinfrastruktur und Häufigkeit des maximalen Leistungsbezugs. Im nächsten Schritt wird das resultierende Summenladeprofil für alle Ladepunkte berechnet und je Szenario untersucht. Damit können weitere Ergebnisse im Hinblick auf tageszeitliche Ganglinien und die Gesamthöhe des Energie- und Leistungsbedarfs gewonnen werden.

## 7.2 Resultierende Summenlastprofile

Wie die Nutzungsgrade in Abbildung 7-1 veranschaulichen, werden die zugrunde gelegten, öffentlichen Ladepunkte recht häufig zur Deckung des Ladebedarfs eingesetzt. Jedoch sagt der Nutzungsgrad selbst noch nichts über die zeitliche Verwendung bzw. die resultierenden tageszeitlichen Schwankungen aus.

Um diesem Sachverhalt vor allem im Hinblick auf die Ganglinie des Gesamtleistungsbezugs nachzugehen, werden im vorliegenden Kapitel die Summenladeprofile aller öffentlichen Ladestationen der berücksichtigten LIS-Standorte kalkuliert und diskutiert. Dabei sind die Summenladeprofile von diversen Parametern wie Ladecharakteristik, maximale Ladeleistung des Ladepunkts und des E-Fahrzeuges, Verteilung der Ladestandorte, Anzahl der Ladevorgänge, Ladestartzeitpunkt, Batterieladezustand beim Ladestart sowie Energiebedarf und resultierende Ladedauer abhängig.

Nach den Ausführungen der vorhergegangenen Kapitel sind diesbezüglich alle relevanten zeitlichen, räumlichen, energetischen und technischen Informationen für jedes E-Fahrzeug sowie die notwendigen Ladevorgänge der gesamten E-Taxiflotte bekannt. Die Grundlage dafür bildet das in der vorliegenden Arbeit entwickelte und zur Mobilitätsdatengenerierung herangezogene stochastische Modell (Details siehe Kapitel 4 „Modellbildung und Datenaufbereitung“ sowie Kapitel 5 „Generierung einer gesamten E-Taxiflotte“).

---

<sup>178</sup> Anteil am PKW-Bestand der Klasse M1 vom 30.09.2019.

Die Berechnung der Summenlastprofile wird – wie der Begriff bereits andeutet – durch Summenbildung der Leistungsprofile aller öffentlichen Ladepunkte vorgenommen. Die zugehörige Gesamtzahl  $n$  der erforderlichen Ladepunkte je Szenario ist in Tabelle 6-4 nachzulesen. Um die Wochentagscharakteristiken deutlich herausarbeiten zu können, werden die Summenlastprofile als gemittelte Wochenganglinien kalkuliert. Die verwendete Formel lautet hierfür wie folgt:

$$\text{Summenlastprofil } (t) = \frac{\sum_{\text{Woche}=1}^{52} \sum_{LP=1}^n P_{LP, \text{Woche}}(t)}{52 \text{ Wochen}} \quad (7.2)$$

Abbildung 7-2 illustriert die zugehörigen Ergebnisse für eine Durchdringung von 500 E-Taxis<sup>179</sup>. Für jedes betrachtete Szenario ist das resultierende Summenladeprofil eingetragen. Überdies ist die Abbildung zur besseren Strukturierung zweigeteilt. Im oberen Teil werden die Varianten mit einer zugrunde gelegten Batteriekapazität von 40 kWh visualisiert und darunter sind die „80 kWh“-Szenarien ersichtlic.

Was in Abbildung 7-2 unmittelbar auffällt, sind die deutlich größeren Flächen unter den Summenladeprofilen der Szenarien „Public“. Da die Fläche unter den Kurven den Energiebedarf für das öffentliche Laden repräsentiert<sup>180</sup> und im Rahmen der Szenarien „Public“ ausschließlich an öffentlichen Ladestationen geladen wird, ist dies natürlich nicht weiter verwunderlich.

Ferner orientieren sich die Summenladeprofile der Szenarien „Public“ an den tageszeitlichen Schwankungen des gemittelten Fahrprofils aus Abbildung 5-11. Der Zusammenhang ist ebenfalls rasch erläutert – denn generell gilt: Wenn viel gefahren wird, entsteht ein hoher Ladebedarf. Der resultierende Ladebedarf wird somit, falls der Batterieladezustand für die nächste Taxifahrt nicht mehr ausreicht, unmittelbar am nächsten freien Ladepunkt gedeckt. Dies gilt zwar gleichermaßen für alle Szenarien, jedoch kommt es definitionsbedingt nur bei den Szenarien „Public“ zu keiner Verschiebung in Richtung betriebliches Laden und der gesamte Ladebedarf ist an öffentlichen Ladestationen zu decken.

<sup>179</sup> Die zugehörigen Summenladeprofile der beiden anderen Durchdringungen sind im Kapitel „Ergänzende Abbildungen“ zu finden (siehe Abbildung A-12 und Abbildung A-13 im Anhang).

<sup>180</sup> Die zugehörigen durchschnittlichen Energiemengen, die in Anhängigkeit der Wochentage an den öffentlichen Ladepunkten abgegeben werden, sind für alle drei Durchdringungen im Kapitel „Ergänzende Abbildungen“ zu finden (siehe Abbildung A-14 und Abbildung A-16 im Anhang).

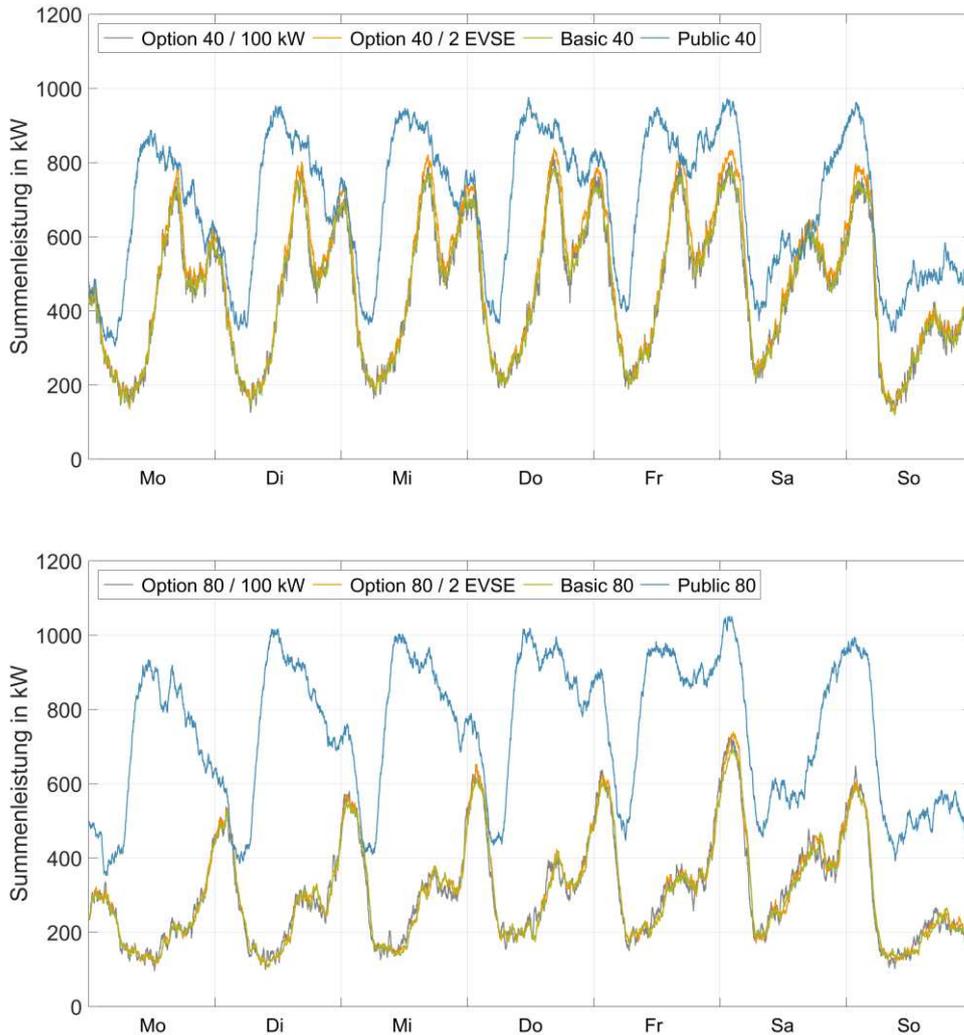


Abbildung 7-2: Summenladeprofil aller öffentlichen Ladepunkte  
(mittlere Wochenganglinie, 500 E-Taxis)

Bei den Szenarien „Basic 40 & Option 40“ beträgt indes der Anteil des betrieblichen Ladens an der geladenen Gesamtenergiemenge rund 39 %. Bei den Szenarien „Basic 80 & Option 80“ sind es bereits 62 % (vergleiche Abbildung 6-24). Entsprechend dieser Verhältnisse kommt es zu einer Reduktion des öffentlichen Ladens und die Flächen unter den Summenladeprofilen schrumpfen.

Darüber hinaus ergibt sich für die Szenarien „Basic & Option“ in Abhängigkeit der Batteriekapazität eine Verzerrung der Kurvenform. Aufgrund der relativ hohen Standdauer am betrieblichen Abstellplatz (siehe dazu Abbildung 6-20) besitzen vor allem die

E-Taxis der Betriebsarten „Tages- und Nachtschicht“ (1-Schichtsystem) zu Schichtbeginn<sup>181</sup> eine zumeist volle Antriebsbatterie und der Bedarf an öffentlichen Ladevorgängen verzögert sich entsprechend.

Dies führt bei den Summenladeprofilen der Szenarien „Basic 40 & Option 40“ zu zwei Maximalwerten je Kalendertag. Die Basis des Summenlastprofils bildet grundsätzlich die E-Taxis der Betriebsart „Doppelschicht“. Sie verursacht den Großteil des Energiebedarfs (vergleiche dazu Tabelle 6-8), der hierbei relativ gleichmäßig über den Tag verteilt ist. Der erste Maximalwert wird zusätzlich durch das öffentliche Laden im Rahmen der „Tagesschicht“ verstärkt und erfolgt zwischen 15 und 16 Uhr. Demgegenüber intensivieren die E-Taxis der Betriebsart „Nachtschicht“ die zweite Lastspitze. Diese tritt abhängig vom Wochentag zwischen Mitternacht und zwei Uhr auf. Beide Extremwerte schwanken dabei mit den Wochentagen, erreichen aber freitags bzw. in der Nacht auf Samstag ein Maximum zwischen 800 und 840 kW.

Im Rahmen der Szenarien „Basic 80 & Option 80“ werden aufgrund der größeren Batteriekapazität und der damit einhergehenden, erhöhten Reichweite im 1-Schichtbetrieb fast ausschließlich betriebliche Ladevorgänge durchgeführt. Der entsprechende Anteil des öffentlichen Ladens entfällt im Summenladeprofil. Lediglich die E-TaxilenkerInnen im 2-Schichtenbetrieb müssen – bedingt durch die verminderte Möglichkeit des betrieblichen Ladens – noch häufig auf öffentliche Ladestationen ausweichen. Deshalb werden die zugehörigen Summenladeprofile vorrangig durch die E-Taxis der Doppelschicht geprägt und es entsteht ein Leistungsmaximum im Zeitraum kurz nach Mitternacht. Das Wochenmaximum tritt wiederum in der Nacht auf Samstag auf und erreicht einen Spitzenwert von ca. 740 kW. Um den Anteil der Betriebsarten am Summenladeprofil zu visualisieren, ist in Abbildung 7-3 der Zusammenhang beispielhaft für die Basisszenarien dargestellt.

---

<sup>181</sup> Die zugehörigen Ladestartzeitpunkte der öffentlichen Ladevorgänge sind in Abbildung 6-22 nach Betriebsarten getrennt dargestellt.

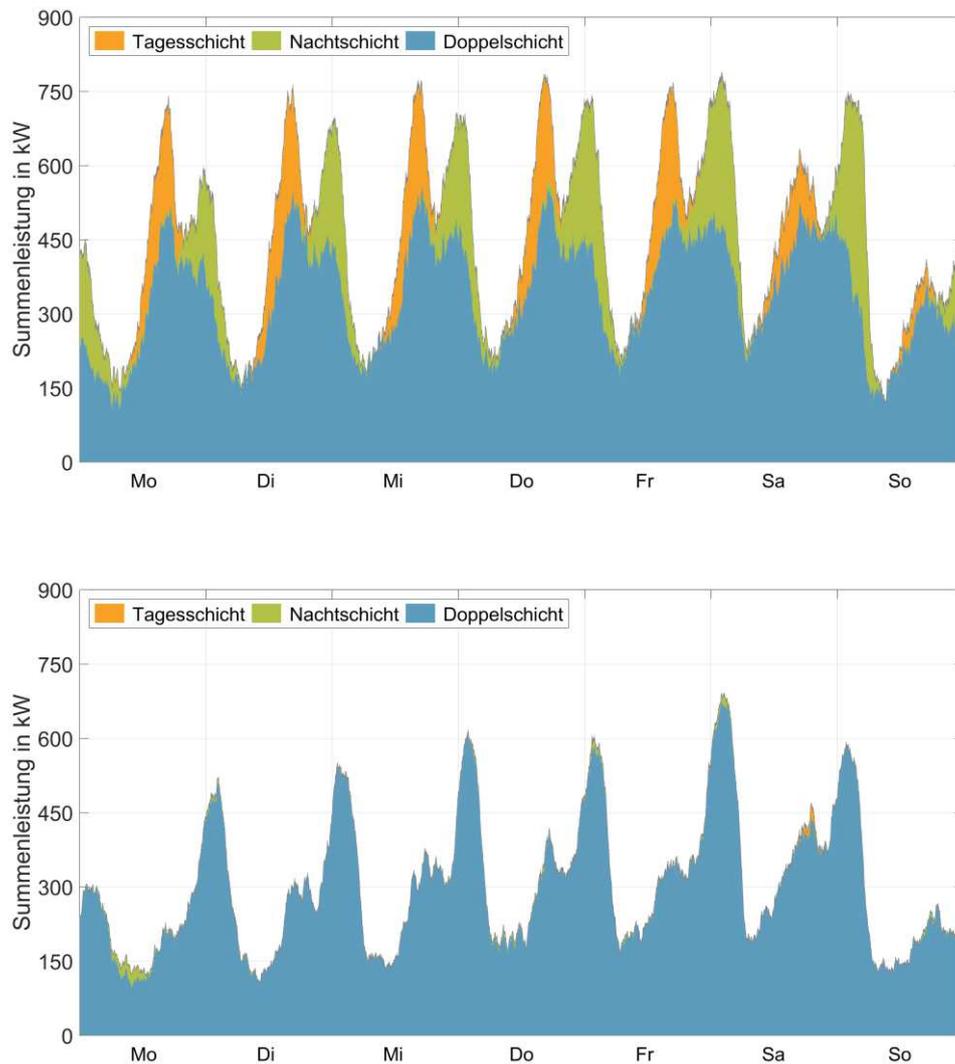


Abbildung 7-3: Anteil der Betriebsarten am Summenladeprofil  
(oben: Basic 40, unten: Basic 80, 500 E-Taxis)

Ungeachtet der Veränderung aufgrund der Batteriekapazität ergibt sich für die Ergebnisse der Szenarien „Basic & Option“ in Bezug auf die Anzahl der Ladepunkte je Ladestandort sowie der Ladeleistung je Ladepunkt eine gewisse Unabhängigkeit. Daher sind die Summenladeprofile der Szenarien „Basic 40 & Option 40“ in Abbildung 7-2 auch annähernd deckungsgleich. Analoges gilt für „Basic 80 & Option 80“.

Wird die Anzahl der Ladepunkte je Ladestandort verdoppelt, dann reduziert sich lediglich die Anzahl der Ladestandorte. Die Summe der Ladepunkte bleibt dadurch nahezu unverändert (siehe Kapitel 6.2.3 „Szenarienbasierter LIS-Ausbau“). Damit ergibt sich auch kein wesentlicher Einfluss auf das Summenladeprofil.

Darüber hinaus ist die starre Kopplung zwischen Ladeleistung und Ladedauer Auslöser für die Unabhängigkeit des Summenladeprofils von der Ladeleistung je Ladepunkt. Dies gilt zumindest für die Konstantspannungsphase (siehe Kapitel 2.3.3 „Ladecharakteristik“), wodurch sich bei Verdopplung der Ladeleistung die Ladedauer auf fast die Hälfte verkürzt. Somit können in gleicher Zeit beinahe doppelt so viele Ladevorgänge an einem Ladepunkt durchgeführt werden (vergleiche dazu Tabelle 7-2).

Abgesehen von den bereits dargestellten Extremwerten weisen die Summenladeprofile unabhängig vom betrachteten Szenario Leistungsminima in den späten Nachtstunden/frühen Morgenstunden auf. Ein wesentlicher Grund dafür ist die geringere Nachfrage an Taxisfahrten zu dieser Uhrzeit, die wiederum mit einem deutlich reduzierten Ladebedarf einhergeht. Analog dazu ergeben sich geringere Leistungswerte am Wochenende. Im Vergleich zum Wochenmaximum beträgt der maximale Leistungswert am Sonntag lediglich ein Drittel.

Die maximale Lastspitze aller Summenladeprofile erreicht im Vergleich dazu einen Leistungswert von knapp über 1.000 kW und tritt beim Szenario „Public 80“ auf. Die Gesamtanschlussleistung aller 25 öffentlichen Ladestationen, die dem Szenario zugehören (vergleiche Tabelle 6-4), weist einen etwas höheren Wert von 1.250 kW auf (25 x 50 kW). Dennoch ist dieses Leistungslevel überschaubar, vor allem wenn es in Relation mit der Anzahl der E-Taxis gebracht wird. Aufgrund der verschiedenen Betriebsarten, die wiederum großteils der Nachfrage folgen, ergibt sich eine gute Verteilung des Ladebedarfs über den Tag und damit eine relativ geringe Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge. Dies hat wiederum eine Maximalleistung von lediglich 2,5 kW je E-Taxi zur Folge. Falls ein größerer Anteil durch betriebliches Laden gedeckt werden kann, sinkt dieser Wert sogar noch weiter. Für die Szenarien „Basic 80 & Option 80“ liegt er bei 1,5 kW je E-Taxi.

Wie mit Hilfe der Summenladeprofile aus Abbildung A-12 und Abbildung A-13 im Anhang „Ergänzende Abbildungen“ einfach nachvollziehbar ist, ändert die Durchdringung an E-Taxis nichts an diesem Ergebnis. Im Prinzip sind fast alle in diesem Kapitel präsentierten Erkenntnisse unabhängig von der E-Taxidurchdringung. Dies gilt gleichermaßen für die Flächenverhältnisse wie auch für die Lage der Extremwerte. Lediglich der Verlauf der Summenladeprofile glättet sich aufgrund der höheren E-Taxianzahl stärker. Was sich hingegen mit Anstieg der Durchdringung auf jeden Fall ändert, sind die absoluten Leistungswerte der Summenladeprofile. Jedoch ist dabei die Leistungssteigerung proportional zur Erhöhung der Anzahl an E-Taxis und somit die Maximalleistung je E-Taxi annähernd konstant.

### 7.3 Lastprofile am Ladestandort

Im Gegensatz zu den Summenlastprofilen, die den gesamten Leistungsbedarf über alle zugrunde gelegten Ladestationen darstellen, repräsentieren die Lastprofile der Ladestandorte die lokalen Gegebenheiten. Sie sind für den Anschluss an das öffentliche Versorgungsnetz relevant und liefern Informationen über den tageszeitlichen Leistungsverlauf je Ladestandort und zeigen somit Bereiche hoher Netzbelastung auf.

Die Anschlussleistung für die jeder Ladestandort – zumindest ohne zusätzlichem Lastmanagement – ausgelegt werden muss, ergibt sich als Produkt aus Anzahl der Ladepunkte des Ladestandorts und der maximalen Eingangsleistung je Ladepunkt. Für die Szenarien „Basic“ und „Public“ beträgt die Anschlussleistung somit 50 kW je Ladestandort. Bei den Szenarien „Option“ sind es hingegen 100 kW aufgrund der höheren Ladeleistung (1x 100 kW) bzw. Anzahl der Ladepunkte (2x 50 kW).

In der Regel wird die Anschlussleistung als Scheinleistung bestimmt. Da der Leistungsfaktor von DC-Schnellladestationen üblicherweise im Maximalleistungsbereich bei 96 bis 98 % [87, 88] liegt, ist die zugehörige Scheinleistung zur Auslegung der lokalen elektrischen Installation um bis zu 4 % höher. In der vorliegenden Arbeit wird jedoch einheitlich die Wirkkomponente der elektrischen Leistung angegeben. Dementsprechend sind die nachfolgenden Ergebnisse als Wirkleistungswerte in kW angeführt.

Die Ermittlung der resultierenden Lastprofile erfolgt demzufolge durch Division der Summenlastprofile aus Formel (7.2) mit der Anzahl der Ladestandorte. Je betrachtetes Szenario ist die zugehörige Anzahl der Ladestandorte in Tabelle 6-4 aufgelistet. Nachstehende Formel erläutert den trivialen Zusammenhang:

$$\text{Lastprofil}(t) = \frac{\text{Summenladeprofil}(t)}{\text{Anzahl Ladestandorte}} \quad (7.3)$$

Die entsprechenden Lastprofile werden je Szenario und Durchdringungsrate berechnet. Abbildung 7-4 zeigt die zugehörigen Ergebnisse für eine Durchdringung von 500 E-Taxis<sup>182</sup>. Analog zu den Summenladeprofilen sind die Lastprofile der Ladestandorte für jedes betrachtete Szenario als gemittelte Wochenganglinien dargestellt. Darüber hinaus ist die Abbildung wieder für die beiden Batteriekapazitäten 40 und 80 kWh zweigeteilt aufgebaut, um eine klare Übersicht zu gewährleisten.

---

<sup>182</sup> Die resultierenden Lastprofile für die Durchdringungen von 2.500 und 4.500 E-Taxis sind im Anhang „Ergänzende Abbildungen“ zu finden (siehe Abbildung A-17 und Abbildung A-18).

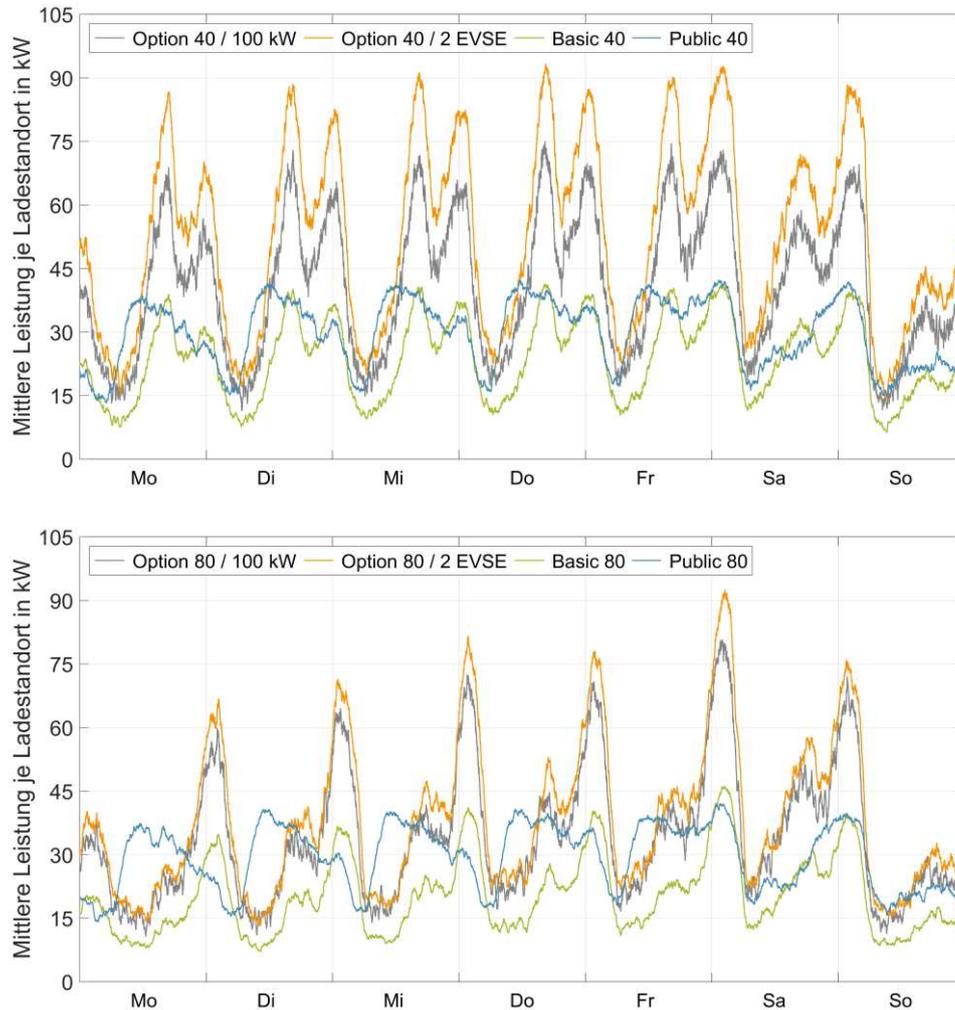


Abbildung 7-4: Mittleres Lastprofil am öffentlichen Ladestandort  
(mittlere Wochenganglinie, 500 E-Taxis)

Wie in den Summenladeprofilen von Abbildung 7-2 ersichtlich, weisen die Szenarien „Basic & Option“ je zugrunde gelegter Batteriekapazität eine annähernd deckungsgleiche Ganglinie auf und besitzen generell einen sehr ähnlichen Jahresenergiebedarf (vergleiche Tabelle 6-9). Daher sind die zugehörigen Lastprofile aus Abbildung 7-4 entsprechend dem Verhältnis der Anzahl an Ladestandorten proportional zueinander.

Damit ergeben sich folgende Relationen: Durch die Verdopplung der Ladepunkte je Ladestandort beim Szenario „Option / 2 EVSE“ reduziert sich die notwendige Anzahl an Ladestandorten nahezu um die Hälfte. Im Vergleich zu den Szenarien „Basic“ ergibt sich damit annähernd eine Erhöhung des gesamten Lastprofils um den Faktor 2.

Ferner beträgt das Verhältnis der Anzahl der notwendigen Ladestandorte zwischen den Varianten „Option 40 / 2 EVSE“ und „Option 40 / 100 kW“ 9 zu 11 (siehe Tabelle 6-4 bei 500 E-Taxis). Dementsprechend weisen die beiden Lastprofile einen Flächenunterschied von etwa 20 % auf.

Analoges gilt natürlich auch für die Szenarien „Public“. Repräsentieren die Summenlastprofile vor allem die Situation des kompletten LIS-Ausbaus und damit die zeitliche Verteilung des Gesamtenergiebedarfs, so zeigen die resultierenden Lastprofile die Gegebenheiten am Ladestandort. Da im Rahmen der Szenarien „Public“ die Möglichkeit des betrieblichen Ladens fehlt, ist der Bedarf an öffentlicher Ladeinfrastruktur am größten. Daraus folgt ein hoher LIS-Ausbaugrad. Laut Tabelle 6-4 werden bei einer Durchdringung von 500 E-Taxis zumindest 23 Ladepunkte benötigt. Der Ladebedarf verteilt sich somit auf viele Ladestandorte mit einer maximalen Ladeleistung von 50 kW je Ladepunkt, wodurch die Leistungsmaxima in einem ähnlichen Bereich liegen wie jene der Basisszenarien. Lediglich die Fläche unter den Lastprofilen fällt für die Szenarien „Public“ entsprechend des im Mittel höheren Nutzungsgrades (vergleiche u. a. Abbildung 7-1) größer aus.

Infolge der proportionalen Verhältnisse zwischen den Summenlastprofilen und den resultierenden Lastprofilen besitzen die Extremwerte in beiden Fällen dieselbe Lage. Dies gilt unabhängig vom betrachteten Szenario. Für nähere Details zur Extremwertdiskussion siehe Kapitel 7.2 „Resultierende Summenlastprofile“.

Entsprechend der geringeren Anschlussleistungen fallen die Tagesmaxima der resultierenden Lastprofile für die Szenarien „Basic“ und „Public“ kleiner aus und liegen je nach Wochentag zwischen 35 und 45 kW. Den größten Maximalwert mit rund 93 kW erreicht das Szenario „Option 2 EVSE“, gefolgt von den Szenarien „Option 100 kW“ mit 81 kW (80 kWh) bzw. 75 kW (40 kWh).

Wie bereits aufgrund der Summenlastprofile bekannt, treten die Maxima vor allem am Nachmittag bzw. in den Stunden nach Mitternacht auf und repräsentieren die Zeitbereiche, in denen die maximale Ladeleistung am häufigsten benötigt wird. Trotz der Mittelung zur Bildung der Wochenganglinien und der Tatsache, dass einige Ladepunkte deutlich weniger häufig genutzt werden (vergleiche Abbildung 7-1), weisen die Maxima tendenziell hohe Werte in der Nähe der gesamten Anschlussleistung je Ladestandort auf.

Daraus lässt sich jedenfalls eine starke Gleichzeitigkeit zumindest zu gewissen Uhrzeiten ableiten. Wie oft konkret die gesamte Anschlussleistung je Ladestandort jedoch benötigt wird, darüber gibt Abbildung 7-4 keine Auskunft.

Deshalb sind in Abbildung 7-5 die Häufigkeitsverteilungen für das Auftreten der gesamten Anschlussleistung bei einer Durchdringung von 500 E-Taxis je Szenario dargestellt. Demnach zeigen die Bereiche, wie häufig der Leistungsbezug aller Ladepunkte eines Ladestandorts gleich der Anschlussleistung von 50 bzw. 100 kW ist, und wie sich die Eintrittshäufigkeit auf die einzelnen Ladestandorte eines Szenarios verteilt.

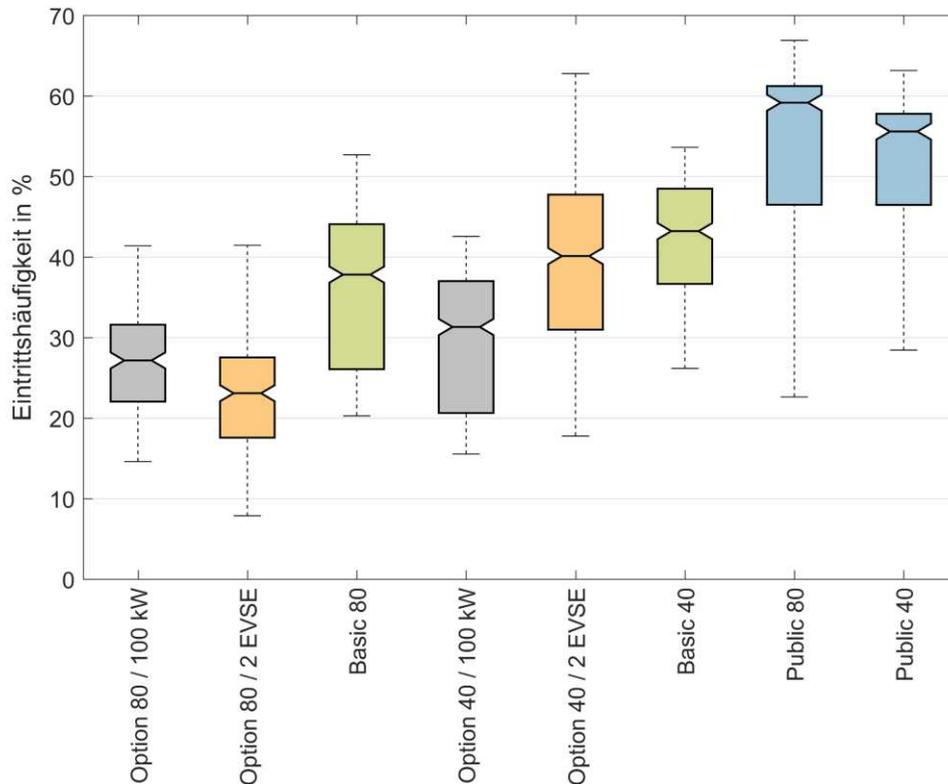


Abbildung 7-5: Häufigkeitsverteilung für das Auftreten der gesamten Anschlussleistung am Ladestandort bei einer Durchdringung von 500 E-Taxis (dargestellte Kennwerte: Maximum, 0,75-Quartil, Median, 0,25-Quantil, Minimum)

Entsprechend der Extremwerteausprägungen der resultierenden Lastprofile fallen auch die Verteilungen der Eintrittshäufigkeit aus. Für die Hälfte der Ladestandorte wird die gesamte Anschlussleistung je nach betrachtetem Szenario in 20 bis 60 % des Jahres benötigt. Das globale Minimum liegt bei 8 % und das Maximum bei 67 %. Gemäß der zugehörigen Nutzungsgrade sind auch die Eintrittshäufigkeiten bei den Szenarien „Public“ am höchsten. Der Zusammenhang zwischen Nutzungsgrad und Eintrittshäufigkeit gilt annähernd für alle Szenarien. Leichte Unterschiede ergeben sich jedoch bei den Szenarien „Option“ durch die Variation der Ladeleistung bzw. Anzahl der Ladepunkte je Ladestandort.

Abgesehen davon zeigt Abbildung 7-5 eines ganz deutlich, ohne ein entsprechendes Lastmanagement muss die Höhe der Anschlussleistung am Ladestandorte entsprechend der Summe der Maximalleistungen aller Ladepunkte am Ladestandort ausgelegt werden.

In Bezug auf die technische Anschlussbeurteilung und die notwendige Bewilligung durch den zuständigen Verteilernetzbetreiber aber auch zur Reduktion der Kosten für die Systemnutzungsentgelte stellt sich die Frage, ob es nicht dennoch möglich ist die Anschlussleistung herabzusetzen.

Eine starre Reduktion der Anschlussleistung durch Begrenzung der maximalen Ladeleistung ist technische einfach realisierbar, bedeutet jedoch im gleichen Maß eine Verlängerung der Ladedauer. Davon ist wiederum die Akzeptanz der E-TaxilenkerInnen betroffen. Deshalb wird nachstehend eine Alternative diskutiert, die den Ladevorgang selbst nicht beeinflusst, sondern lediglich die feste Kopplung zwischen dem Leistungsbezug am Ladestandort von der Leistungsabgabe an den Ladepunkten auftrennt.

Um dies zu bewerkstelligen wird im Rahmen eines vereinfachten Beispiels für jeden Ladepunkt ein stationärer Speicher installiert. Die gewählte Batteriekapazität entspricht dabei jener der E-Fahrzeuge des zugehörigen Szenarios (40 bzw. 80 kWh je Ladepunkt). Bei der Varianten „Option 80 / 2 EVSE“ sind es somit aufgrund der beiden Ladepunkte 160 kWh je Ladestandort. Hingegen ergibt sich z. B. bei „Basic 40“ für den stationären Speicher am Ladestandort eine Kapazität von 40 kWh. Die zugehörigen Parameterwerte der Batterie-Ladecharakteristik wie minimaler und maximaler Batterieladezustand oder der Ladewirkungsgrad sind analog zu Tabelle 6-1 festgelegt. Darüber hinaus wird angenommen, dass der stationäre Speicher die maximale Leistung aus Summe der maximalen Ladeleistungen aller Ladepunkte am Ladestandort dauerhaft aufnehmen und abgeben kann. Die betrachtete Durchdringung beträgt 500 E-Taxis.

Basierend auf diesen Rahmenbedingungen wird nach jenem Betriebspunkt gesucht, bei dem der Leistungsbezug aus dem öffentlichen Verteilernetz – sowohl für das Laden der E-Taxis als auch für das Laden des stationären Speichers – am Ladestandort ein Minimum ergibt.

Abbildung 7-6 stellt die Ergebnisse dieser iterativen Berechnung dar. Das linke Diagramm zeigt in Form von Box-Plots die Verteilung der resultierenden Reduktionspotenziale je Ladestandort. Für jedes der betrachteten Szenarien sind darin die Kennwerte für Maximum, 0,75-Quartil, Median, 0,25-Quantil und Minimum eingetragen. Das rechte Diagramm visualisiert hingegen die zeitliche Verschiebung des Leistungsbezuges für das Basisszenario mit 80 kWh.

Abhängig vom zugrunde gelegten Szenario und dem jeweiligen Ladestandort lässt sich durch die Installation eines stationären Speichers mit 40 bzw. 80 kWh je Ladepunkt eine Reduktion der Anschlussleistung von bis zu 40 % realisieren. Der Bereich der Mediane liegt hierbei zwischen 16 und 31 %. Das Minimum beträgt 14 %.

Bei der Realisierung eines konkreten Ladestandorts müssen ohnehin die individuellen Gegebenheiten vor Ort sowie die Investitions- und Betriebskosten im Detail untersucht und eine technische Anschlussbeurteilung durchgeführt werden. Sollte es bei der Beurteilung zu einer kritischen Bewertung kommen, so kann das Potenzial aus Abbildung 7-6 entsprechend genutzt werden, um die Anschlussleistung und damit die Auslastung der betroffenen Netzkomponente auf ein notwendiges Leistungsniveau zu senken.

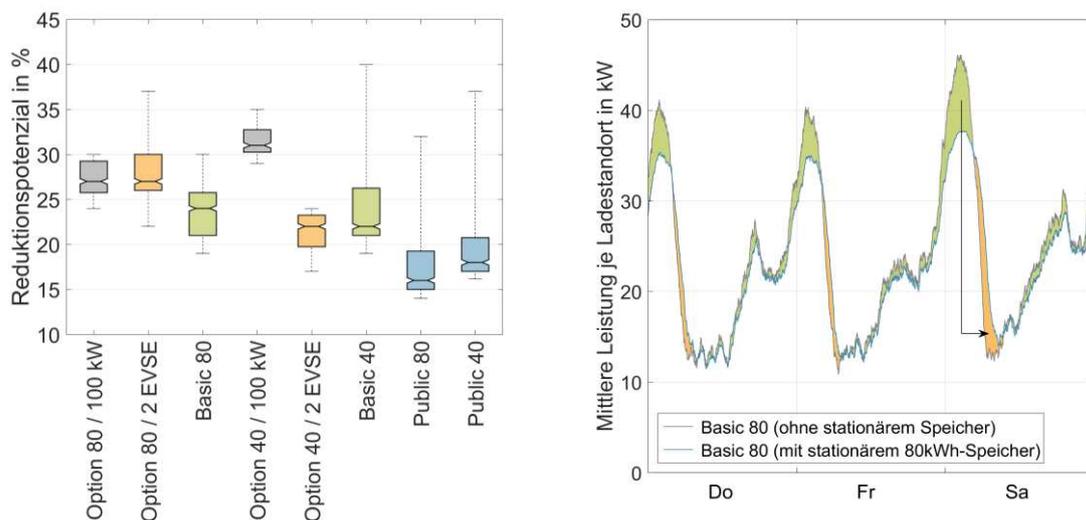


Abbildung 7-6: Reduktionspotenzial der Anschlussleistung mit stationärem Speicher (links), Lastprofilvergleich mit und ohne stationärem Speicher (rechts)

Abgesehen von der höheren Auslastung der Netzkomponenten, die durch das Benutzen von Ladestationen verursacht wird, beeinflusst das Laden von E-Fahrzeugen die Spannungsqualität. Hierbei ist vor allem der Einfluss auf Spannungshöhe, Frequenz und Kurvenform sowie das Hervorrufen von Störungen von Relevanz.

Im Hinblick auf die Einhaltung der Betriebsbedingungen laut Norm EN 50160 beinhalten u. a. die Ergebnisse des Umsetzungsprojekts „eTaxi für Wien“<sup>183</sup> hilfreiche Aussagen.

<sup>183</sup> Das Projekt „eTaxi für Wien“ wurde aus Mitteln des bmvit gefördert und im Rahmen des Programms „E-Mobilität für alle: Urbane Elektromobilität“ im Zeitraum von April 2015 bis Juni 2018 durchgeführt.

Dabei fundieren die Untersuchungen auf umfangreichen Messungen von drei verschiedenen Ladestationen mit einer maximalen Ladeleistung von je 50 kW. Die Messperiode umfasst laut [89] jeweils ein Monat und besitzt eine Auslösung von 2,5 Minuten. Als Messstellen werden der Netzübergabepunkt der Ladestation sowie die Sekundärseite des zugehörigen Transformators angegeben. Auf Basis der in [89, 90] beschriebenen Analysen lässt sich Folgendes zusammenfassen: Trotz der Erhöhung der Maximallast von bis zu 50 kW je Ladestandort zeigen sich keinerlei Grenzwertverletzungen bezüglich Spannungshöhe, Frequenz, Unsymmetrie, THD (englisch Total Harmonic Distortion) oder Langzeitflicker.

Selbstverständlich werden diese Kennwerte nicht nur von den Ladestationen, sondern von allen angeschlossenen elektrischen Geräten gemeinsam beeinflusst, wodurch wiederum eine individuelle Beurteilung jedes Ladestandortes notwendig wird.

Darüber hinaus sind Rahmenbedingungen wie die Beschaffenheit der Netztopologie ebenfalls von Bedeutung. Aufgrund der längenmäßig geringen Ausdehnung der „Stadtnetze“ sind Probleme bezüglich Spannungshöhe trotz zusätzlicher Ladestationen voraussichtlich nicht zu erwarten. Bei Verteilernetzen mit großflächiger Ausdehnung könnte diese Problematik jedoch auftreten. [54]

Generell ist zumindest festzuhalten, dass ein dezentrales, netzschonendes sowie bedarfsgerechtes Lastmanagement bevorzugt einzusetzen ist, um einen dauerhaft geordneten Netzbetrieb garantieren zu können und ohne nennenswerte Mobilitätseinbußen das Auslangen zu finden.

Bis zu diesem Absatz sind die Erläuterungen überwiegend technischer Natur. Zur Abrundung der inhaltlichen Aspekte wird nachfolgend das Potenzial zur CO<sub>2</sub>-Reduktion bei der Umstellung einer Taxiflotte auf rein elektrisch betriebene Fahrzeuge erhoben und der dafür notwendige Ausbau an erneuerbaren Energiequellen dargelegt.

## 8 Umwelteffekte und Energiebereitstellung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den umweltrelevanten Gesichtspunkten bei einer Umsetzung von rein elektrisch angetriebenen Taxis im urbanen Raum. Dabei wird auf den notwendigen Ausbau von erneuerbaren Energiequellen zur Deckung des Ladebedarfs sowie auf das daraus resultierende Potenzial der Reduktion an Treibhausgasen (THG) eingegangen.

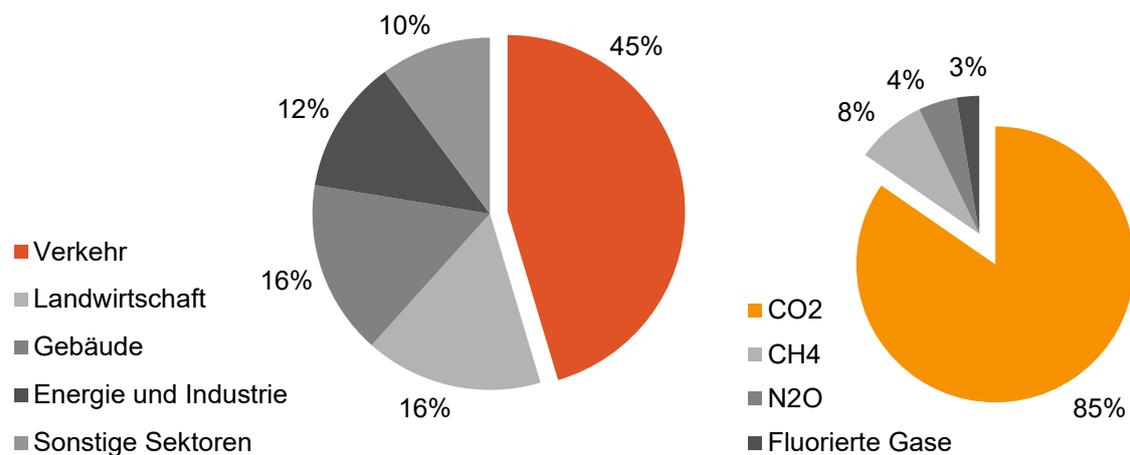


Abbildung 8-1: Treibhausgas-Emissionen in Österreich 2017 (ohne Emissionshandel):  
Nach Sektoren (links) und nach Arten der Treibhausgase (rechts)

Wie aus dem Klimaschutzbericht 2019 [7] zu entnehmen ist, stellt der Sektor „Verkehr“ mit 23,6 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. ungeschlagen den Hauptverursacher der heimischen THG-Emissionen außerhalb des Emissionshandels dar (vergleiche dazu Abbildung 8-1, links). Darüber hinaus verzeichnet der Sektor „Verkehr“ mit einer Emissionszunahme von 71,8 % den höchsten Anstieg aller Sektoren im Zeitraum von 1990 bis 2017, wobei dieser im Wesentlichen durch die Zunahme der Fahrleistung im Straßenverkehr getrieben wird [7]. Der Straßenverkehr selbst verursachte 2017 etwa 23,4 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq. und umfasst damit rund 99 % der THG-Emissionen am Sektor „Verkehr“. Davon verursacht der Güterverkehr ca. 36 % und der Personenverkehr, zu dem auch die Taxis zählen, besitzt einen Anteil von etwa 64 % (siehe Tabelle 8-1).

Für das Bundesland Wien als urbanes Vergleichsgebiet ergaben sich laut [91] zudem für den Sektor „Verkehr“ rund 3,3 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äq<sup>184</sup> an THG-Emissionen. Dies sind etwa 51 % der gesamten THG-Emissionen von Wien (ohne Emissionshandel).

In Bezug auf die Zusammensetzung der THG-Emissionen ergeben sich hingegen laut [7] die Verhältnisse wie in Abbildung 8-1 (rechts) visualisiert. Dabei bestehen die THG-Emissionen in erster Linie aus Kohlendioxid, weshalb es auch als Referenzwert dient. Der CO<sub>2</sub>-Anteil betrug in Österreich für das Jahr 2017 rund 85 %. Die anderen klimawirksamen Gase wie Methan CH<sub>4</sub>, Lachgas N<sub>2</sub>O und die Gruppe der Fluorierten Gase teilen sich die restlichen 15 % an den heimischen THG-Emissionen. Generell werden die Treibhausgase (THG) über einen Gewichtungsfaktor (das sog. Global Warming Potential) in CO<sub>2</sub>-Äq.-Emissionen umgerechnet. Damit lassen sich alle Treibhausgase (THG) einfach zusammenfassen und gemeinsam berücksichtigen. Aus diesem Grund werden alle nachfolgenden Berechnungen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten angegeben.

Tabelle 8-1: THG-Emissionen des Sektors „Verkehr“ 2017 in Österreich und Veränderung seit dem Jahr 1990

Hauptverursacher	2017	Veränderung 1990 - 2017
Gesamter Verkehrssektor	23,7 Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq.	+ 71,8 %
Straßenverkehr	23,4 Mio. t CO <sub>2</sub> -Äq.	+ 73,2 %
davon Güterverkehr	36 %	+ 109,2 %
davon Personenverkehr	64 %	+ 57,8 %

Batterieelektrische Fahrzeuge haben im Betrieb gegenüber PKW mit Verbrennungskraftmotoren den Vorteil, dass sie lokal keine CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen. Neben den direkten Emissionen des Fahrbetriebs treten jedoch auch zufolge der Fahrzeugherstellung und der Energiebereitstellung sowie beim E-Fahrzeug zur Herstellung der Antriebsbatterie sogenannte indirekte THG-Emissionen auf.

Für die Berechnung des CO<sub>2</sub>-Einsparungspotenzials beim Umstieg auf rein elektrisch angetriebene Taxis werden die auf Fahrzeugkilometer (Fkm) bezogenen Werte aus [92]

<sup>184</sup> Der angeführte THG-Emissionswert für Wien beruht auf einer Regionalisierung der nationalen Emissionsdaten. Es kann daher nicht unmittelbar auf das Verkehrsaufkommen vor Ort und die im Stadtgebiet verursachten Emissionen geschlossen werden. [91]

für direkte und indirekte Emissionen verwendet<sup>185</sup>. Um jedoch den spezifischen Gegebenheiten des Taxibetriebes zu genügen, werden zusätzlich Anpassungen beim Besetzungsgrad (1,5), dem Zusatzgebäck (8 kg), der Batteriekapazität (80 kWh), der Batteriemasse (457 kg) sowie der Fahrsituation (innerorts)<sup>186</sup> durchgeführt. Darüber hinaus wird die Jahreskilometerleistung der Taxis mit dem 47.811 km/a als Mittelwert der „80 kWh“-Szenarien aus Tabelle 6-6 und eine verkürzte Lebensdauer von 5 Jahren für Fahrzeug und Batterie angenommen.

Unter diesen Rahmenbedingungen ergeben sich die in Abbildung 8-2 dargestellten THG-Emissionen für Taxis mit Diesel- bzw. Elektroantrieb. In Bezug auf die Stromerzeugung sind die THG-Emissionen natürlich unmittelbar von der jeweils eingesetzten Primärenergieträger abhängig. Daher werden die Ergebnisse zum Vergleich einerseits für den österreichischen Strommix sowie für eine regenerative Stromerzeugung ausgewiesen<sup>187</sup>.

Wie in Abbildung 8-2 eindeutig ersichtlich, verursachen konventionelle fossil betriebene Taxis mit rund 224 g CO<sub>2</sub>-Äq./Fkm die meisten THG-Emissionen, wobei die direkten Emissionen aus der Kraftstoffverbrennung den größten Beitrag liefern (~77 %).

Bei den E-Taxis entfallen aufgrund des Elektromotors und der Antriebsbatterie sämtliche direkten Emissionen. Jedoch kommt bei den indirekten THG-Emissionen zusätzlich zur Fahrzeugherstellung und der Energiebereitstellung noch ein Anteil für die Batterieherstellung hinzu.

Damit ergeben sich für E-Taxis mit österreichischem Strommix Gesamtemissionen von etwa 114 g CO<sub>2</sub>-Äq./Fkm. Werden zum Laden der Batterie ausschließlich regenerative Energieträger eingesetzt, dann reduzieren sich die indirekten THG-Emissionen der E-Taxis nochmals deutlich und betragen insgesamt rund 39 g CO<sub>2</sub>-Äq./Fkm.

Bei der Fahrzeugherstellung unterscheiden sich die THG-Emissionen nur marginal. Gegenüber dem fossil betriebenen Taxi kommen jedoch beim Elektrofahrzeug die indirekten Emissionen der Batterieherstellung noch zusätzlich hinzu. Die Herstellung der

---

<sup>185</sup> Die Emissionsdaten berücksichtigen den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeugs unabhängig von der Art des Antriebs und beinhalten damit Bereiche wie Rohstoffbereitstellung, Verarbeitung zu Inputmaterialien, Fahrzeugherstellung, Einsatz („Autofahren“) und EoL-Prozess (Recycling und Entsorgung). [104]

<sup>186</sup> Plus 30 % bei Diesel-Taxi und minus 10 % bei E-Taxi [104].

<sup>187</sup> Die unterschiedlichen Emissionswerte für die beiden Stromerzeugungsarten sind aus [92] entnommen. „Ö-Strommix“: Strom aus dem klassischen österreichischen Strommix (inkl. Importe) und „regenerativ“: Strom aus erneuerbaren Energieträgern unter Erfüllung der Kriterien laut Richtlinie „UZ 46 – Grüner Strom“. [92]

Antriebsbatterie verursacht bei der hier betrachteten Kapazität von 80 kWh etwa 44 % höhere Emissionen als jene der Fahrzeugherstellung alleine.

Erst bei einer Verwendung von erneuerbarem Strom im Rahmen der erforderlichen Herstellungsprozesse können diese negativen Einflüsse komplett ausgeglichen werden. Die indirekten Emissionen des E-Taxis (regenerativ) sind damit um ca. 12 g CO<sub>2</sub>-Äq./Fkm niedriger als jene des Diesel-Taxis.

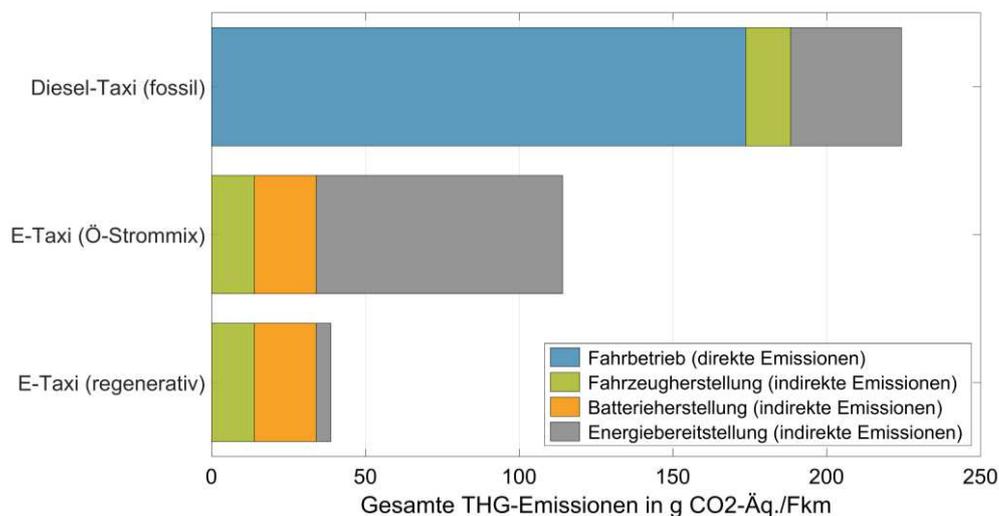


Abbildung 8-2: Gesamte Treibhausgas-Emissionen (direkt und indirekt) verschiedener Antriebsarten und Stromerzeugungen

Bei der Betrachtung der Gesamtemissionen sieht es natürlich etwas anders aus. Für E-Taxis mit österreichischem Strommix kann bereits eine Reduktion um 49 % erreicht werden. Ein klarer Klimavorteil bei den E-Taxis kann aber vor allem dann erzielt werden, wenn für die Energiebereitstellung Strom aus erneuerbaren Quellen herangezogen wird. Im Vergleich zum Diesel-Taxi ergibt dann eine Reduktion von rund 83 %.

Abgesehen von den THG-Emissionen, die in Tabelle 8-2 zusammengefasst sind, entstehen u. a. beim Betrieb und der Herstellung sowie im Rahmen der Energiebereitstellung ebenfalls Stickoxide und Partikel-Emissionen. Diese zusätzlichen Emissionen sind im Speziellen aufgrund des damit verbundenen hohen gesundheitlichen Risikos von Interesse [92]. Diesel-Fahrzeuge stoßen generell mit Abstand die meisten direkten NO<sub>x</sub>-Emissionen aus. Die gesamten NO<sub>x</sub>-Emissionen liegen verglichen zum E-Taxi mit regenerativem Strom um rund 65 % höher. Hingegen weisen E-Taxis hinsichtlich Partikel-Emissionen keine bessere Ökobilanz auf. Grund dafür ist einerseits die beim E-Taxi zusätzlich notwendige Batterieherstellung, andererseits der beim konventionellen Taxi

berücksichtigte Partikelfilter<sup>188</sup>. Damit liegen die Partikel-Emissionen trotz Nutzung von erneuerbaren Energiequellen immer noch etwa 33 % über jenen der Diesel-Taxis.

Tabelle 8-2: Gesamte Treibhausgas-Emissionen in g CO<sub>2</sub>-Äq. pro Fahrzeugkilometer verschiedener Antriebsarten und Stromerzeugungen

Direkte und indirekte Emissionen	CO <sub>2</sub> -Emissionen in g CO <sub>2</sub> -Äq./Fkm		
	Diesel-Taxi	E-Taxi (Ö-Strommix)	E-Taxi (regenerativ)
<b>Fahrbetrieb</b> (direkte Emissionen)	173,7	-	-
<b>Fahrzeugherstellung</b> (indirekte Emissionen)	14,6	13,9	13,9
<b>Batterieherstellung</b> (indirekte Emissionen)	-	20,1	20,1
<b>Energiebereitstellung</b> (indirekte Emissionen)	36	80,1	4,8
<b>Gesamt</b>	<b>224,3</b>	<b>114,1</b>	<b>38,8</b>

Im Anhang B (Tabelle B-10 bis Tabelle B-12) können alle direkten und indirekten Emissionen bezüglich Stickoxide und Partikel sowie der kumulierte Energieaufwand für Diesel- und E-Taxis nachgelesen werden.

Basierend auf den Fahrzeugkilometer bezogenen THG-Emissionen wird nun das Potenzial der CO<sub>2</sub>-Reduktion für die gesamte E-Flotte mit Durchdringungen von 500, 2.500 und 5.000 E-Taxis ermitteln und der Bedarf an erneuerbaren Energiequellen zur Deckung des Ladebedarfs abgeschätzt.

Tabelle 8-3 stellt die Ergebnisse der Hochrechnung bezüglich der gesamten THG-Emissionen dar. Berücksichtigt sind sowohl direkte als auch indirekte Emissionen. Unter der Verwendung von erneuerbaren Energiequellen zum Laden der E-Taxis können bei einer Durchdringung von 500 E-Taxis rund 4.434 t CO<sub>2</sub>-Äq./a eingespart werden. Dies

<sup>188</sup> Ein Partikelfilter ist in allen PKW der Euroklasse „6d-Temp“ standardmäßig vorhanden.

entspricht bei der Umstellung einer Taxiflotte mit 4.500 E-Taxis in etwa 39.907 t CO<sub>2</sub>-Äq./a an THG-Emissionen.

Tabelle 8-3: Potenzial der CO<sub>2</sub>-Reduktion für die gesamte E-Taxiflotte

	Anzahl der E-Taxi-Fahrzeuge	Reduzierte (fossile) Fahrzeug-km in Mio. Fkm/a	Gesamt-Emissionen (Reduktion in t CO <sub>2</sub> -Äq./a)	Gesamt-Emissionen (Reduktion in Prozent)
<b>E-Taxi (Ö-Strommix)</b>	500	23,91	2.633,34	<b>49,1 %</b>
	2.500	119,53	13.166,72	
	4.500	215,15	23.700,09	
<b>E-Taxi (regenerativ)</b>	500	23,91	4.434,12	<b>82,7 %</b>
	2.500	119,53	22.170,59	
	4.500	215,15	39.907,06	

Unter der Annahme, dass ca. 80 Bäume pro Jahr eine Tonne CO<sub>2</sub>-Äq./a [93] umwandeln können und etwa 1.000 Bäume auf einem Hektar Wald stehen, müssen für dasselbe Reduktionspotenzial rund 3.000 Hektar Wald gepflanzt werden. Die entspricht in etwa 3 % der Fläche, die von der Region „Wienerwald“<sup>189</sup> umfasst wird.

Wie in Tabelle 6-8 angeführt, beträgt der Jahresenergiebedarf für das Laden der Antriebsbatterie je nach zugrunde gelegtem Szenario zwischen 11,4 und 13,3 MWh/a. Um eine entsprechende Deckung mittels erneuerbarer Energieträger zu gewährleisten, müssen somit genügend „Grünstrom“-Anlagen zur Verfügung stehen. Für eine vereinfachte Dimensionierung dieser Anlagen werden hier die Volllaststunden nach [94] für Photovoltaik- und Windenergieanlagen sowie für Wasserkraft die Eckdaten des Donaukraftwerks Wien-Freudenau als Vergleichswerte herangezogen.

Unter diesen Bedingungen lassen sich für Photovoltaik, Windenergie und Wasserkraft die in Tabelle 8-4 dargestellten installierten Leistungen abschätzen. Somit werden zum Beispiel 100 bis 120 m<sup>2</sup> an Photovoltaik-Modulen zur energetischen Jahresbilanzierung eines E-Taxis benötigt. Werden hingegen 2 MW-Windenergieanlagen zur bilanziellen Deckung herangezogen, dann bedarf es etwa 12 bis 14 Anlagen, um die erneuerbare

<sup>189</sup> Die Region „Wienerwald“ umfasst eine Fläche von 105.645 Hektar [106].

Energie für eine Taxiflotte mit 4.500 E-Taxis zu liefern. Demgegenüber könnte das Donaukraftwerk Wien-Freudenau mit einer installierten Leistung von rund 170 MW sogar 85.000 E-Taxis mit „grünem“ Ladestrom versorgen.

Tabelle 8-4: Ausbau erneuerbarer Energiequellen zur Deckung des Ladebedarfs von E-Taxis

Erneuerbare Energiequelle	Volllaststunden pro Jahr	Installierte Leistung			Anmerkung
		500 E-Taxis	2.500 E-Taxis	4.500 E-Taxis	
<b>Photovoltaik</b>	950	6-7 MW	30-35 MW	54-63 MW	ca. 100 bis 120 m <sup>2</sup> pro E-Taxi
<b>Windenergie</b>	2150	~3 MW	13-15 MW	24-28 MW	2 MW für rund 350 E-Taxis
<b>Wasserkraft</b>	6000	~1 MW	5-6 MW	9-10 MW	170 MW für ca. 85.000 E-Taxis

## 9 Zusammenfassung

Nach weit mehr als einem Jahrhundert, in dem der Straßenverkehr durch den Verbrennungsmotor geprägt war, vollzieht sich nun mit der Elektromobilität ein kontinuierlicher Technologiewandel. Die zugrundeliegende Elektrifizierung der Antriebsstränge stellt dabei einen essentiellen Lösungsbaustein für ein modernes, effizientes und bedarfsgerechtes Gesamtverkehrssystem dar.

Im Sinne einer „Dekarbonisierung“ des Verkehrssystems ist Elektromobilität vorwiegend dort umzusetzen, wo erforderliche Wege weder auf Gehen, Radfahren oder den öffentlichen Verkehr verlagert werden können. Demzufolge leisten Taxis bei einer ganzheitlichen Umstellung auf rein elektrisch betriebene Fahrzeuge sowie unter Einsatz von erneuerbaren Energiequellen ihren Beitrag zur Erhöhung der Lebensqualität im urbanen Raum.

In Anbetracht dessen werden in der vorliegenden Arbeit die beiden nachstehend formulierten Kernfragen anhand des Anschauungsbeispiels „E-Taxis in der Stadt Wien“ beantwortet:

***Unter welchen Bedingungen und Einschränkungen ist rein elektrisch betriebener Taxiverkehr im urbanen Raum möglich und welche Erkenntnisse können für die involvierten AkteurlInnen abgeleitet werden?***

Wien besitzt ca. 280 Taxistandplätze, die von rund 2.000 konzessionierten Unternehmen mit einer Gesamtflotte von etwa 4.500 Taxifahrzeugen bedient werden.

Um eine schrittweise sowie ganzheitliche Umstellung aller Taxifahrzeuge auf rein elektrisch betriebene E-Taxis tiefgehend untersuchen zu können, kommen hierfür zwei komplementäre Datensätze zur Anwendung. Diese umfassen in anonymisierter Form das Mobilitätsverhalten von mehr als 800 konventionellen Fahrzeugen einer Wiener Funktaxiflotte und beziehen sich auf einen Betrachtungszeitraum von je 12 Monaten.

Trotz des hohen Informationsgehaltes der vorliegenden Datengrundlage fehlen notwendige Angaben bezüglich Betriebsarten und -zeiten. Eine durchgängige Betrachtung über den Zeithorizont einzelner Taxifahrten hinweg ist daher nicht ohne weiteres möglich.

Dies ist jedoch essentiell, da sich je nach Betriebsart (Tages- oder Nachtschicht bzw. Doppelschicht) deutliche Unterschiede ergeben. Vor allem die Kilometerleistung ist davon betroffen sowie bei einer Umstellung auf rein elektrisch betriebene Taxis ebenfalls der resultierende Ladebedarf.

Für das Erreichen der gesteckten Zielsetzungen ist es somit zwingend erforderlich, eine umfangreiche Datenaufbereitung und -verarbeitung vorzunehmen. Diese bilden die methodischen Kernstücke der wissenschaftlichen Arbeit.

Auf Basis von Markov-Ketten erster Ordnung und der gezielten Anwendung der Warteschlangentheorie wird der gesamte Taxibetrieb als ein kombiniertes Netzwerk aus Taxi-standplätzen, Taxifahrten und Ladestationen konsistent modelliert.

Die hierfür notwendigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen und deren Parameterwerte, wie Ankunfts- und Bedienraten sowie Übergangswahrscheinlichkeiten werden direkt aus der vorhandenen Datengrundlage approximiert. Basis bilden diesbezüglich die relativen Häufigkeitsverteilungen der individuellen Merkmale wie Fahrdauer, Distanz oder Standdauer am Taxistandplatz. Zu deren Schätzung kommen u. a. die Maximum-Likelihood-Methode sowie als Qualitätskriterium der mittlere quadratische Fehler zum Einsatz.

In weiterer Folge wird auf Grundlage der aufgebauten Modellierung eine stochastische Simulation entwickelt, die das Mobilitätsverhalten der gesamten Wiener Taxiflotte bei einer Umstellung auf rein elektrisch betriebene Taxis in adäquater Weise abbildet. Damit ist die gewünschte lückenlose und durchgängige Darstellung des E-Taxibetriebs einschließlich des sich ergebenden Ladebedarfs möglich.

Darauf aufbauend werden die Simulationsergebnisse für unterschiedliche Basis- und Alternativszenarien ausgewertet. Im Rahmen der umfangreichen Untersuchungen finden neben den verschiedenen Betriebsarten auch mehrere E-Taxi-Durchdringungsraten sowie Variationen in Bezug auf Kapazität der Antriebsbatterie und Beschaffenheit der Ladeinfrastruktur Berücksichtigung.

Zwei primäre Kennzahlen, die sich direkt aus der stochastischen Simulation ergeben sind die Kilometerleistung und der Energiebedarf für die resultierende E-Taxiflotte.

E-Taxis im 1-Schichtsystem (Tages- oder Nachtschicht) legen im Mittel zwischen 125 und 164 km je Taxischicht zurück. Im Rahmen der Doppelschicht werden definitionsbedingt zwei Taxischichten pro Tag durchgeführt. Daraus resultiert eine ungefähre Verdopplung der durchschnittlichen Kilometerleistung und beträgt damit ca. 285 km pro Tag. Dies entspricht im Vergleich etwa der Strecke von Wien nach Salzburg.

Weiters ergibt sich auf Grundlage einer mittleren Nutzung von ca. 250 Tagen eine durchschnittliche Jahreskilometerleistung von etwa 50.000 km je Taxi, wobei die Mittelwerte je Betriebsart zwischen 30.000 und 84.000 km pro Jahr schwanken.

Betriebsbedingt repräsentieren Taxis der Doppelschicht den oberen km-Bereich und besitzen damit eine Jahreskilometerleistung, die in etwa das 6- bis 7-fache der privaten PKW in Österreich beträgt.

Demzufolge ergibt sich ein entsprechend großer Ladebedarf. In der vorliegenden Arbeit wird neben dem grundsätzlichen Energiebedarf für den Antrieb auch jener für die eingesetzten Nebenverbraucher berücksichtigt (inkl. Klimatisierung). Aufgrund der geringen Durchschnittsgeschwindigkeit im urbanen Raum und der zusätzlichen Nutzung der Klimaanlage während der Standdauer am Taxistandplatz zeigt sich ein deutlich erhöhter Einfluss der Nebenverbraucher auf den Gesamtenergiebedarf. Der spezifische Energiebedarf beträgt hierfür durchschnittlich 0,27 kWh/km und der Anteil der Nebenverbraucher liegt im Bereich von 36 %.

Unter diesen Voraussetzungen resultiert ein mittlerer Energiebedarf je Taxischicht, der je nach Szenario und Betriebsart zwischen 33 und 46 kWh (inkl. Nebenverbraucher) beträgt. Der zugehörige Jahresenergiebedarf je E-Taxi reicht hierbei von durchschnittlich 8 MWh (Tagesschicht) bis 21 MWh (Doppelschicht). Damit liegt der Jahresenergiebedarf eines E-Taxis je nach Betriebsart zwischen jenem von zwei bis fünf mittleren Haushalten.

Abgesehen von der hohen Schwankungsbreite des Energiebedarfs verursachen die betrachteten Betriebsarten und Szenarien auch wesentliche Unterschiede beim Ladeverhalten an öffentlichen bzw. betrieblichen Ladestationen.

Es wird angenommen, dass Ladevorgänge an öffentlichen Ladestationen vorrangig während der Betriebszeit zur Reichweitenverlängerung durchgeführt werden und maximale Ladeleistungen von 50 bzw. 100 kW je Ladepunkt zum Einsatz kommen. Aufgrund der entsprechend längeren Standdauer an betrieblichen Ladestationen (z. B. während der Nacht im Anschluss an eine Tagesschicht) reichen Ladeleistungen von 11 bis max. 22 kW aus, um die Antriebsbatterie wieder vollzuladen.

Dabei führen E-Taxis, die dem 1-Schichtsystem angehören, nach jeder Tages- und Nachtschicht einen betrieblichen Ladevorgang durch. Hingegen kommt es aufgrund der verstärkten Fahrzeugnutzung bei E-Taxis der Doppelschicht lediglich nach etwa einem Viertel aller Taxischichten zu einem betrieblichen Ladevorgang.

Reicht die vorhandene Batteriekapazität nicht für alle Taxifahrten einer Taxischicht aus, dann sind Ladevorgänge an öffentlichen Ladestationen durchzuführen.

Werden bei einer zugrunde gelegten Batteriekapazität von 40 kWh rund 61 % der gesamten Energiemenge an öffentlichen und nur 39 % an betrieblichen Ladenstationen geladen, kehren sich bei einer Erhöhung der Batteriekapazität auf 80 kWh die Verhältnisse um.

In analoger Weise reduziert sich aufgrund der größeren Reichweite ebenfalls die Anzahl der öffentlichen Ladevorgänge. Bei einer Batteriekapazität von 40 kWh werden je nach Betriebsart im Mittel noch etwa 0,5 bis 1,4 Ladevorgänge je Taxischicht durchgeführt.

Findet eine Batteriekapazität von 80 kWh Berücksichtigung, dann sind im Rahmen der Tages- und Nachtschichten nahezu keine öffentlichen Ladevorgänge mehr nötig. Für E-Taxis, die dem 2-Schichten-System zugeordnet sind, ergibt sich hingegen etwa ein öffentlicher Ladevorgang pro Doppelschicht.

Mit Vergrößerung der Batteriekapazität steigt jedenfalls die Relevanz des betrieblichen Ladens. Im starken Kontrast dazu stehen die Szenarien „Public“, da hierbei der gesamte Energiebedarf an öffentlichen Ladestationen zu decken ist (es wird keine betriebliche Ladeinfrastruktur berücksichtigt). Damit ergeben sich bei einer zugrunde gelegten Batteriekapazität von 40 kWh durchschnittlich 1,8 öffentliche Ladevorgänge je Taxischicht und 0,8 Ladevorgänge bei 80 kWh.

Allgemein werden je öffentlichem Ladevorgang etwa 50 bis 60 % der nutzbaren Batteriekapazität aufgeladen. Die mittlere Ladedauer variiert dabei je nach Batteriekapazität und Ladeleistung zwischen 15 Minuten (100 kW und 40 kWh) und einer Stunde (50 kW und 80 kWh). Allerdings können während des Ladevorgangs keine Taxifahrten übernommen werden. Dies führt zwangsläufig zu einem Verlust einzelner Taxifahrten.

Demzufolge müssen vorrangig dann Taxifahrten abgelehnt werden, wenn ein häufiger Gebrauch von öffentlichen Ladestationen vorliegt. Dies trifft primär in den Szenarien „Public“ sowie allgemein bei E-Taxis der Doppelschicht zu.

Dennoch können im Rahmen dessen immerhin noch rund 83 bis 86 % aller Taxifahrten ungehindert vorgenommen. Der restliche Anteil der Taxifahrten muss überwiegend aufgrund anhaltender Ladevorgänge entfallen. Dabei entspricht eine Reduktion der Machbarkeitsrate um 10 % im Mittel einem Verlust von etwa einer Taxifahrt je Taxischicht.

In den Betriebsarten „Tages- bzw. Nachtschicht“ wird definitionsgemäß nur eine Taxischicht pro Tag durchgeführt und die tägliche Kilometerleistung sowie der resultierende Energiebedarf sinken entsprechend. Wird zusätzlich die Batteriekapazität auf 80 kWh erhöht, so verringert sich ebenfalls der Anteil des öffentlichen Ladens. Damit können nahezu alle Taxifahrten ( $\geq 99,7\%$ ) elektrisch durchgeführt werden und es sind weniger als 10 Taxifahrten im gesamten Kalenderjahr abzulehnen.

Unter diesen Rahmenbedingungen können TaxilenkerInnen mit rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen genauso viele Taxifahrten absolvieren wie mit konventionellen Taxis. Es wird somit in Bezug auf die technische Machbarkeit dasselbe Niveau erreicht.

Dennoch ist auch in diesem Fall ein adäquater Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur notwendig. Es stellt sich demzufolge die Frage, wie eine sinnvolle Größenordnung und Verteilung der erforderlichen Ladepunkte im Stadtgebiet auszusehen haben. Um die gewichteten Anfahrtswege entsprechend zu minimieren, kommt in der vorliegenden Arbeit ein evolutionärer Optimierungsalgorithmus zum Einsatz. Als Ergebnis wird ein „bedarfsgerechter“ LIS-Ausbau ermittelt, wobei die Anordnung der Ladestandorte überwiegend an den Hauptverkehrsadern von Wien verläuft und sich in Richtung Stadtkern verdichtet.

Für die berücksichtigten Basisszenarien mit einer Ladeleistung von max. 50 kW ergibt sich ein Bedarf von rund 15 bis 20 Ladepunkten je 500 E-Taxis. Wird hingegen von der Ladeinfrastruktur und den E-Fahrzeugen eine erhöhte Ladeleistung von zumindest 100 kW unterstützt, dann ergibt sich aufgrund der höheren „Ladegeschwindigkeit“ ein verminderter LIS-Bedarf von etwa 50 %. Im Gegensatz dazu verdoppelt sich in den Szenarien „Public“ die Anzahl der notwendigen öffentlichen Ladepunkte, da hierbei keine betrieblichen Ladestationen zum Einsatz kommen.

Neben der Optimierung des „bedarfsgerechten“ LIS-Ausbaus wird im Rahmen der Simulationen ein intelligentes Leit- und Reservierungssystem (kurz LURS) eingesetzt. Dieses wählt stets jenen Ladepunkt aus, bei dem sich die geringste Zeitspanne aus Ladedauer, An- und Rückfahrt sowie dem Warten bis zum Freiwerden des Ladepunkts ergibt. Gesamtheitlich lässt sich damit nicht nur die Anzahl der erforderlichen Ladepunkte minimieren, sondern auch die Nutzungsgrade der einzelnen Ladestandorte optimieren.

Hierdurch ergibt sich ein mittlerer LIS-Nutzungsgrad von 36 bis 53 %. Demzufolge werden je Ladepunkt durchschnittlich zumindest 10 Ladevorgänge pro Tag absolviert, wobei die individuellen LIS-Standorte je nach betrachtetem Szenario deutlichen Schwankungsbereiten unterliegen.

Generell zeigt sich, je höher der Anteil des öffentlichen Ladens am Gesamtenergiebedarf desto größer ist der mittlere Nutzungsgrad der öffentlichen Ladepunkte. Die Maximalwerte ergeben sich somit bei den Szenarien „Public“.

Ferner führen die relativ hohen Nutzungsgrade zu einem ebenso großen bzw. häufigen Leistungsbedarf je Ladestandort. Dabei beträgt der mittlere Anteil am Betrachtungszeitraum, in dem die maximale Ladeleistung je Ladestandort benötigt wird, ca. 25 bis 45 %. Für eine positive technische Anschlussbeurteilung der Ladestationen durch den zuständigen Verteilernetzbetreiber sowie im Hinblick auf eine Verringerung der Systemnutzungsentgelte stellt sich darüber hinaus die Frage, ob es möglich ist, die Anschlussleistung sinnvoll zu begrenzen.

Einfach zu realisieren wäre sicherlich eine starre Begrenzung der maximalen Ladeleistung am Ladestandort. Dies bedeutet jedoch eine entsprechende Verlängerung der Ladedauer. Davon ist wiederum die Akzeptanz der E-TaxilenkerInnen betroffen.

Um die Ladevorgänge selbst nicht negativ zu beeinflussen, sondern lediglich die Koppung zwischen Leistungsbezug und Leistungsabgabe am Ladestandort zeitlich zu trennen, können z. B. stationäre Speicher eingesetzt werden. Wird lokal je Ladepunkt ein Zusatzspeicher von der Größe der Antriebsbatterie installiert, dann fällt die Anschlussleistung bei einer zugrunde gelegten Batteriekapazität von 80 kWh durchschnittlich um etwa 25 % geringer aus. Bei zwei Ladepunkten je Ladestandort entspricht dies immerhin einer Reduktion von 100 auf 75 kW. Im Einzelfall ist jedoch zu entscheiden, ob die Vorteile oder die Mehrkosten überwiegen und ob nicht doch eine Ertüchtigung des lokalen Netzanschlusses technisch und wirtschaftlich erfolversprechender ist.

Wird abgesehen vom lokalen auch der globale Leistungsbedarf als Summe der Lastprofile aller Ladestandorte betrachtet, so zeigt sich aufgrund der besseren Aufteilung und der geringeren Gleichzeitigkeit generell ein entschärftes Bild. Bei der Betrachtung einer Durchdringung von 500 E-Taxis ergibt sich in Summe über alle Ladepunkte ein mittlerer Wochenmaximalwert von 700 bis 840 kW. Wird hingegen im Rahmen der Szenarien „Public“ ausschließlich an öffentlichen Ladestandorten geladen, beträgt das mittlere Wochenmaximum etwa ein Gigawatt. Für größere Durchdringungsraten steigt der Maximalwert entsprechend proportional an. Dennoch führt dies zu einem durchschnittlichen Leistungsbedarf von nicht mehr als 1 bis 2 kW je E-Taxi und ist damit nur unwesentlich größer als jener für private PKW.

Analog zum Leistungsbedarf skaliert auch der Energiebedarf entsprechend der Durchdringungsrate. Bei einer Flottengröße von 500 E-Taxis ergibt sich ein Jahresenergiebedarf zwischen 6 und 7 GWh. Hingegen werden bei 4.500 E-Taxis etwa 52 bis 60 GWh pro Jahr benötigt. Um beim Einsatz von rein elektrisch betriebenen Taxis das volle Potenzial zur Vermeidung von Treibhausgas-Emissionen auszuschöpfen, sind ausschließlich erneuerbare Energieträger zur Deckung des Ladebedarfs einzusetzen.

Dabei würden etwa 100 bis 120 m<sup>2</sup> an Photovoltaik-Modulen zur energetischen Jahresbilanzierung eines einzelnen E-Taxis ausreichen. Werden stattdessen 2 MW-Windenergieanlagen zur bilanziellen Deckung herangezogen, dann bedarf es etwa 12 bis 14 Anlagen, um die erforderliche Energiemenge für 4.500 E-Taxis zu liefern. Demgegenüber könnte das Donaukraftwerk Wien-Freudenau mit einer installierten Leistung von rund 170 MW sogar 85.000 E-Taxis mit „grünem“ Ladestrom versorgen.

In Bezug auf Treibhausgase verursachen konventionelle, fossil betriebene Taxis mit rund 224 g CO<sub>2</sub>-Äq./Fkm unumstritten die meisten Emissionen. Dabei liefern die direkten

THG-Emissionen aus der Kraftstoffverbrennung mit einem Anteil von ca. drei Viertel den größten Beitrag.

Bei den rein elektrisch betriebenen E-Taxis entfallen zwar aufgrund des Elektromotors und der Antriebsbatterie sämtliche direkten Emissionen, stattdessen kommt bei den indirekten THG-Emissionen noch ein Anteil für die Batterieherstellung hinzu.

Dennoch kann ein klarer Klimavorteil bei den E-Taxis erzielt werden, wenn für die Bereitstellung der Ladeenergie sowie im Rahmen der Fahrzeugherstellung ausschließlich erneuerbare Energiequellen herangezogen werden. In diesem Fall betragen die THG-Emissionen für E-Taxis rund 39 g CO<sub>2</sub>-Äq./Fkm. Im Vergleich zum Diesel-Taxi ergibt sich ein beträchtliches Reduktionspotenzial von 83 %.

Dies sind bei einer Durchdringung von 500 E-Taxis rund 4.434 t CO<sub>2</sub>-Äq./a. Hingegen können 39.907 t CO<sub>2</sub>-Äq./a an THG-Emissionen bei der Umstellung einer Taxiflotte mit 4.500 E-Taxis eingespart werden.

Um dasselbe Reduktionspotenzial zu erzielen, muss im Vergleich ein Wald mit rund 3.000 Hektar aufgeforstet werden. Dies entspricht etwa 3 % der Fläche des Wienerwaldes.

## 10 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

- Rein elektrisch betriebene Fahrzeuge sind im täglichen Taxibetrieb sinnvoll einsetzbar. Daher ist eine ehestmögliche Umstellung auf E-Taxiflotten zu forcieren. Hierbei ist das aktive Handeln aller involvierten AkteurInnen gefragt.
- Entsprechend große Batteriekapazitäten sind erforderlich, um alle Taxifahrten rein elektrisch absolvieren zu können. Demzufolge werden für Taxiunternehmer E-Fahrzeuge mit Batteriekapazitäten von 60 bis 80 kWh empfohlen und eine finanzielle Förderung durch die Politik als zweckmäßig erachtet.
- Die erforderliche öffentliche Ladeinfrastruktur ist bedarfsgerecht entlang der Hauptverkehrsadern zu errichten. Für Ladeleistungen von 50 kW sind 15 bis 20 Ladepunkte je 500 E-Taxis angemessen. Ladestellenbetreiber sollten jedoch für einen zukunftssicheren LIS-Ausbau bereits Ladeleistungen von mindestens 100 kW je Ladepunkt einplanen. Kommunen sind aufgefordert den LIS-Ausbau planerisch zu koordinieren und deren Realisierung wettbewerbsfördernd zu unterstützen.
- Damit die öffentliche Ladeinfrastruktur optimal ausgenutzt werden kann, ist die Verwendung eines Leit- und Reservierungssystems (LURS) notwendig. Das LURS ist hierfür im Vermittlungssystem der Funktaxiflotten sowie im Backend der Ladestellenbetreiber zu implementieren und standardisierte Schnittstellen von den zuständigen Normungsgremien auszuarbeiten.
- Der Ausbau von betrieblichen Ladestationen spielt für eine erfolgreiche Umsetzung von E-Taxis ebenfalls eine wesentliche Rolle. Hierbei genügen jedoch aufgrund der längeren Standzeiten Ladeleistungen von 11 bis 22 kW. Um die Hürden für den Aufbau von betrieblichen Ladestationen zu verringern, sind auf politischer Ebene entsprechende Förderungen und einheitliche Genehmigungsprozess zu definieren.
- Im Sinne des Smart-Grid-Gedankens sind Lastmanagement-Systeme mit lokalen Speichertechnologien und dezentralen erneuerbaren Energiequellen einzusetzen. Auch hierfür sind standardisierte Schnittstellen zwischen den involvierten Komponenten und AkteurInnen wie Verteilernetz- und Ladestellenbetreiber zu entwerfen sowie einheitliche Beantragungsverfahren u. a. für notwendige Mess- und Marktlokationen von den verantwortlichen Behörden festzulegen.
- Die Energiebereitstellung für das Laden der E-Taxis ist ausschließlich mittels erneuerbarer Energieträger vorzunehmen. Damit ist eine Reduktion der THG-Emission von bis zu 83 % erzielbar. Ferner unterstützen rein elektrisch betriebene Taxiflotten umweltbewusste Unternehmen bei der Durchführung von CO<sub>2</sub>-neutralen Dienstreisen ihrer MitarbeiterInnen.

## Literaturverzeichnis

- [1] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- [2] IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.).
- [3] Europäische Kommission, "Factsheet zum Vorschlag der Kommission zur Festlegung verbindlicher nationaler Ziele für die Reduzierung von Treibhausgasemissionen (2021-2030, MEMO/16/2499)," Press Releases Database of the European Commission, Brüssel, 20. Juli 2016.
- [4] Europäisches Parlament und der Rat der Europäischen Union, "Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz," <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/1999/oj> (letzter Zugriff: 08.11.2019).
- [5] Europäische Kommission, "Factsheet: Eine europäische Strategie für emissionsarme Mobilität (MEMO/16/2497)," Press Releases Database of the European Commission, Brüssel, 20. Juli 2016.
- [6] Europäische Kommission, "Bericht zur Durchführung des Übereinkommens von Paris - Fortschritte der EU bei der angestrebten Emissionssenkung um mindestens 40 % (COM/2016/0707 final)," © Europäische Union, <http://eur-lex.europa.eu/> , 1998–2017 (letzter Zugriff: 11.04.2017), Brüssel, 08.11.2016.
- [7] M. Anderl et al., „Klimaschutzbericht - Analyse der Treibhausgas-Emissionen bis 2017,“ Umweltbundesamt GmbH, ISBN 978-3-99004-522-0, Wien, 2019.

- [8] VCÖ, Wien, Österreich, „Urbaner Verkehr der Zukunft“, Schriftenreihe „Mobilität mit Zukunft“, 1/2016, VCÖ, Wien, ISBN 3-901204-88-1, 2016.
- [9] H. Taubenböck, M. Wurm, T. Esch und S. Dech, Globale Urbanisierung - Perspektive aus dem All, Berlin: Springer-Verlag, 2015.
- [10] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2015). World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, (ST/ESA/SER.A/366).
- [11] AustriaTech – Gesellschaft des Bundes für technologiepolitische Maßnahmen GmbH, „E-Mobilität für Kommunen - Elektromobilität als Chance für die kommunale Entwicklung,“ Wien, 2013.
- [12] Deutsches Dialog Institut GmbH, <http://schaufenster-elektromobilitaet.org> (letzter Zugriff: 08.07.2017).
- [13] U. Deffke, Elektromobilität - das Auto neu denken., Stand Mai 2013 ed., Bonn: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2013.
- [14] M. Yay, Elektromobilität - Theoretische Grundlagen, Herausforderungen sowie Chancen und Risiken der Elektromobilität, diskutiert an den Umsetzungsmöglichkeiten in der Praxis (2., durchgesehene Auflage), Frankfurt am Main: Peter Lang GmbH, 2012.
- [15] P. Hofmann, Hybridfahrzeuge - Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft (2. Auflage), Wien: Springer-Verlag Wien, 2014.
- [16] K. Reif, K. E. Noreikat und K. Borgeest, Kraftfahrzeug-Hybridantriebe - Grundlagen/Komponenten/Systeme/Anwendungen, Friedrichshafen, Esslingen und Aschaffenburg: Springer Vieweg, 2012.
- [17] EAFO - European Alternative Fuels Observatory, <http://www.eafo.eu/vehicle-statistics/m1> (letzter Zugriff: 09.11.2019).
- [18] R. Haas, M. Kloess, K. Könighofer, L. Canella, G. Jungmeier, P. Prenninger und A. Weichbold, „ELEKTRA - Entwicklung von Szenarien der Verbreitung von PKW mit teil- und voll-elektrifiziertem Antriebsstrang unter verschiedenen

- politischen Rahmenbedingungen,“ Forschungsprojekt, Endbericht, A3plus - Austrian Advanced Automotive, 1. AS, FFG-Nr.: 816074, Wien, 2009.
- [19] Nationale Plattform Elektromobilität, „Die Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität – Version 3.0,“ Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), Berlin, 2014.
- [20] Europäisches Parlament und der Rat der Europäischen Union, *Richtlinie 2014/94/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2014 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe*, E. Kommission, Ed., <http://data.europa.eu/eli/dir/2014/94/oj> (letzter Zugriff: 09.07.2017).
- [21] Nationalen Plattform Elektromobilität, AG4, „Technischer Leitfaden Ladeinfrastruktur,“ Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), Berlin, 2013.
- [22] ÖVE/ÖNORM EN 61851-1: 2012 03 01, *Elektrische Ausrüstung von Elektro-Straßenfahrzeugen - Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, (IEC 61851-1:2010).
- [23] OVE EN 62752: 2017 05 01, *Ladeleitungsintegrierte Steuer- und Schutzeinrichtung für die Ladebetriebsart 2 von Elektro-Straßenfahrzeugen (IC-CPD)*, (IEC 62752:2016).
- [24] TecGadgets.de GmbH, <http://www.plugconnect.de/> (letzter Zugriff: 25.01.2015).
- [25] ÖNORM EN ISO 15118-1: 2019 08 15, *Straßenfahrzeuge - Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation - Teil 1: Allgemeine Informationen und Festlegungen der Anwendungsfälle*, (ISO 15118-1:2019).
- [26] OVE EN 62196-2: 2017 12 01, *Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker - Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen*, Teil 2: Anforderungen und Hauptmaße für die Kompatibilität und Austauschbarkeit von Stift- und Buchsensteckvorrichtungen für Wechselstrom, (IEC 62196-2:2016).

- [27] ÖVE/ÖNORM EN 62196-1: 2015 07 01, *Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker - Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen*, Teil 1: Allgemeine Anforderungen, (IEC 62196-1:2014, modifiziert).
- [28] ÖVE/ÖNORM EN 62196-3: 2015 06 01, *Stecker, Steckdosen und Fahrzeugsteckvorrichtungen - Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen*, Teil 3: Anforderungen an und Hauptmaße für Stifte und Buchsen für die Austauschbarkeit von Fahrzeugsteckvorrichtungen zum dedizierten Laden mit Gleichstrom und als kombinierte Ausführung zum Laden mit Wechselstrom/Gleichstrom, (IEC 62196-3:2014).
- [29] M. Mültin, *Das Elektrofahrzeug als flexibler Verbraucher und Energiespeicher im Smart Home*, Karlsruhe: Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), 2014.
- [30] NOW GmbH, *Öffentliche Ladeinfrastruktur für Städte, Kommunen und Versorger - Kompendium für den interoperablen und bedarfsgerechten Aufbau von Infrastruktur für Elektrofahrzeuge*, Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2014.
- [31] ÖVE/ÖNORM EN 61851-24: 2014 12 01, *Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge - Teil 24: Digitale Kommunikation zwischen einer Gleichstromladestation für Elektrofahrzeuge und dem Elektrofahrzeug zur Steuerung des Gleichstromladevorgangs*, (IEC 61851-24:2014).
- [32] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), *Fortschrittsbericht 2014 – Bilanz der Marktvorbereitung*, Berlin: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), 2014.
- [33] Tesla, Inc., [https://www.tesla.com/de\\_AT/support/supercharging](https://www.tesla.com/de_AT/support/supercharging) (letzter Zugriff: 10.11.2019).
- [34] H. Wakolbinger et. al., „Demonstrationsprojekt E-Taxi für Wien,“ Endbericht, E-Mobilität für alle: Urbane Elektromobilität, Wien, 2018.
- [35] VCÖ - Mobilität mit Zukunft, <https://www.vcoe.at/publikationen/infografiken/e-mobilitaet> (letzter Zugriff: 17.11.2019).

- [36] CharIN e. V., <http://www.charinev.org> (letzter Zugriff: 10.07.2017).
- [37] © OECD/IEA, 2017, *Global EV Outlook 2017 - Two million and counting*, France: IEA Publishing, Juni 2017 .
- [38] R. Korthauer, *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Frankfurt am Main: Springer Vieweg, 2013.
- [39] VDE Verband der Elektrotechnik, *Kompendium: Li-Ionen-Batterien im BMWi Förderprogramm IKT für Elektromobilität II: Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic, Grundlagen, Bewertungskriterien (Stand: Juni 2015)*, Frankfurt am Main, 2015.
- [40] A. Thielmann, C. Neef, C. Fenske und M. Wietschel, *Energiespeicher-Monitoring 2018 - Leitmarkt- und Leitanbieterstudie: Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität*, Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2018.
- [41] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), *Zweiter Bericht der Nationalen Plattform Elektromobilität*, Berlin: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), 2011.
- [42] M. Schuster, I. Steinacher, R. Tomschy, D. Fasthuber, M. Litzlbauer und A. Schuster, „Modellregion „e-pendler in niederösterreich“: Begleitforschung - Tätigkeiten, Ergebnisse, Wirkungen,“ Wien, 2016.
- [43] Element Energy , “Cost and performance of EV batteries,” Final Report, Cambridge, 2012.
- [44] S. Stefanov, “Der Wiener Taximarkt - Kennzahlen im Wiener Taxigewerbe,” Diplomarbeit, Wirtschaftsuniversität Wien, 2008.
- [45] GelverkG - Gelegenheitsverkehrs-Gesetz 1996, *Bundesgesetz über die nichtlinienmäßige gewerbsmäßige Beförderung von Personen mit Kraftfahrzeugen*, StF: BGBl. Nr. 112/1996, idF: BGBl. I Nr. 83/2019.
- [46] BZP-VO - Berufszugangsverordnung Kraftfahrlinien- und Gelegenheitsverkehr, *Verordnung des Bundesministers für öffentliche Wirtschaft und Verkehr über den*

*Zugang zum mit Kraftfahrzeugen betriebenen Personenbeförderungsgewerbe*, StF: BGBl. Nr. 889/1994, idF: BGBl. II Nr. 459/2010.

- [47] BO 1994 - Betriebsordnung für den nichtlinienmäßigen Personenverkehr, *Verordnung des Bundesministers für öffentliche Wirtschaft und Verkehr, mit der gewerbepolizeiliche Regelungen für die nichtlinienmäßige Beförderung von Personen mit Fahrzeugen des Straßenverkehrs getroffen werden*, StF: BGBl. Nr. 951/1993, idF: BGBl. II Nr. 165/2005.
- [48] Wiener Taxi-, Mietwagen- und Gästewagen-Betriebsordnung, *Verordnung des Landeshauptmannes von Wien betreffend die Betriebsordnung für das mit Kraftfahrzeugen betriebene Platzfuhrwerks-Gewerbe, das mit Personenkraftwagen betriebene Mietwagen-Gewerbe sowie das Gästewagen-Gewerbe in Wien*, idF: LGBl. Nr. 36/2011.
- [49] CC Taxicenter GmbH, "Hallo Taxi - Zeitschrift für das Taxi-, Miet- & Leihwagen und Fiakergewerbe Österreichs," Wien, Ausgabe 2/2019.
- [50] Wirtschaftskammer Wien - Fachgruppe für Beförderungsgewerbe mit PKW, *Wiener Taxistandplatzverzeichnis (Stand: Sommer 2016)*, [https://www.wko.at/branchen/w/transport-verkehr/befoerderungsgewerbe-personenkraftwagen/Taxistandplaetze\\_aktuell\\_2.pdf](https://www.wko.at/branchen/w/transport-verkehr/befoerderungsgewerbe-personenkraftwagen/Taxistandplaetze_aktuell_2.pdf) (letzter Zugriff: 24.11.2019).
- [51] Wirtschaftskammer Wien - Fachgruppe für die Beförderungsgewerbe mit PKW, <https://www.wko.at/Wien/Taxi> (letzter Zugriff: 24.11.2019).
- [52] Stadt Wien, <https://www.wien.gv.at/bezirke/margareten/umwelt/e-taxi.html> (letzter Zugriff: 20.04.2017).
- [53] W. Gawlik, M. Litzlbauer, A. Schuster, H. Koller, M. Reinthaler, N. Norman, M. Waldbauer, A. Bolzer und M. Leitner, „ZENEM - Zukünftige Energienetze mit Elektromobilität,“ Forschungsprojekt, Endbericht, Neue Energien 2020, 4. AS, FFG-Nr.: 829953, Wien, 2013.
- [54] M. Litzlbauer, "Technische Machbarkeitsanalyse einer rein elektrisch betriebenen Taxiflotte," *E&I Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 132, no. 5, pp. 172-177, 2015.

- [55] M. Litzlbauer und A. Schuster, „Szenarienbasierte Verteilnetz-, Emissions- und Kostenanalyse einer zukünftigen E-Taxiflotte in Wien,“ in *D-A-CH Energieinformatik Konferenz 2013*, Wien, 2013.
- [56] M. Litzlbauer und A. Schuster, „Erfüllbarkeitsszenarien einer E-Taxiflotte - Zwischenergebnisse des Forschungsprojekts ZENEM,“ in *IEWT 2013 - Erneuerbare Energien: Überforderte Energiemärkte?*, Wien, 2013.
- [57] A. Schuster, M. Litzlbauer und W. Gawlik, „Auswirkungen einer E-Taxiflotte auf das städtische Verteilnetz - Zwischenergebnisse des Forschungsprojekts ZENEM,“ in *IEWT 2013 - Erneuerbare Energien: Überforderte Energiemärkte?*, Wien, 2013.
- [58] C. Leitinger, M. Litzlbauer, A. Schuster, G. Brauner, D. Simic, T. Bäuml, J. Stark, L. Christoph, U. Raich und G. Sammer, „Smart Electric Mobility - Speichereinsatz für regenerative elektrische Mobilität und Netzstabilität,“ Forschungsprojekt, Endbericht, Neue Energien 2020, 2. AS, FFG-Nr.: 821886, Wien, 2011.
- [59] A. Schuster, C. Leitinger und G. Brauner, „Begleitforschung der TU Wien in VLOTTE,“ Endbericht, Wien, 2010.
- [60] A. Schuster und M. Litzlbauer, „Begleitforschung der TU Wien in "ElectroDrive Salzburg",“ Endbericht, Wien, 2013.
- [61] Stadt Wien, <https://www.wien.gv.at/viennagis/> (letzter Zugriff: 17.11.2019).
- [62] Stadt Wien, <https://www.wien.gv.at/verkehr/kfz/taxistandplaetze.html> (letzter Zugriff: 24.11.2019).
- [63] R. Strasser, „Synthetische Modellierung und Ladeprofilbildung einer elektrischen Taxi-Flotte,“ Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2013.
- [64] W. Zucchini, A. Schlegel, O. Nenadic und S. Sperlich, Statistik für Bachelor- und Masterstudenten, Göttingen: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [65] M. Scheutzow, „Stochastische Modelle,“ Vorlesungsskript WS 2006/07, Technische Universität Berlin, 2003.

- [66] C. Dombacher, *Warteschlangen*, Deutss, 1994.
- [67] K.-H. Waldmann und U. M. Stocker, *Stochastische Modelle - Eine anwendungsorientierte Einführung*, Karlsruhe: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004.
- [68] J. Virtamo, *Queueing Theory (Lecture 38.3143)*, Aalto University, Helsinki: <https://www.netlab.tkk.fi/opetus/s383143/kalvot/english.shtml> (letzter Zugriff: 09.07.2017).
- [69] N. W. Smirnow und I. W. Dunin-Barkowski, „Mathematische Statistik in der Technik,“ VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1963.
- [70] O. Beyer, H. Hackel, V. Pieper und J. Tiedge, *Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik*, Leipzig: B.G. Teubner Stuttgart, 1999.
- [71] O. Beucher, *Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik mit MATLAB*, Karlsruhe: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [72] R. Schlittgen, *Das Statistiklabor*, Hamburg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [73] L. Fahrmeir, R. Künstler, I. Pigeot und G. Tutz, *Statistik - Der Weg zur Datenanalyse*, München: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [74] G. Theil und B. Demiri, „Ermittlung der Lebensdauerverteilungsfunktionen von ausgewählten Betriebsmitteln elektrischer Mittelspannungsnetze zwecks Anwendung in der Insandhaltungsplanung,“ *Elektrotechnik & Informationstechnik*, pp. 209-214, Juni 2007 (Ausgabe 124/6).
- [75] S. Kühnel, O. Niedermayer und W. Bettina, *Wähler in Deutschland - Sozialer und politischer Wandel, Gender und Wahlverhalten*, Heidelberg: VS Verlag für Sozialwissenschaften | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009.
- [76] The MathWorks GmbH, <http://de.mathworks.com/help/stats/> (letzter Zugriff: 19.10.2015).

- [77] A. Fujiwara and J. Zhang, *Sustainable Transport Studies in Asia*, Higashi-Hiroshima: Springer Japan, 2013.
- [78] B. Flieger, „Innenraummodellierung einer Fahrzeugkabine in der Programmiersprache Modelica,” Dissertation, RWTH Aachen University, 2013.
- [79] M. Kolonko, *Stochastische Simulation - Grundlagen, Algorithmen und Anwendungen*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2008.
- [80] W. L. Martinez and A. R. Martinez, *Computational Statistics Handbook with MATLAB*, Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2002.
- [81] A. Jossen und W. Weydanz, *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*, Neusäß: Ubooks-Verlag, 2006.
- [82] A. Schuster, „Batterie- bzw. Wasserstoffspeicher bei elektrischen Fahrzeugen,“ Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2008.
- [83] C. Coello Coello, G. B. Lamont and D. A. van Veldhuizen, *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems - Genetic and evolutionary computation*, Springer, 2. Auflage, 2007.
- [84] Kraftfahrzeuggesetz 1967, *Bundesgesetz vom 23. Juni 1967 über das Kraftfahrwesen (Kraftfahrzeuggesetz 1967 – KFG. 1967)*, StF: BGBl. Nr. 267/1967 (NR: GP XI RV 186 AB 576 S. 61. BR: S. 256.).
- [85] STATISTIK AUSTRIA, *Energiestatistik: MZ Energieeinsatz der Haushalte 2017/2018*, Wien, 2019.
- [86] STATISTIK AUSTRIA, *Kfz-Statistik - Vorläufiger Pkw-Bestand am 30.09.2019 nach Kraftstoffarten bzw. Energiequelle*, Wien, 2019.
- [87] *ABB website*, <https://new.abb.com/ev-charging/de/dokumente> (Letzter Zugriff: 04.11.2019).
- [88] *Delta Electronics (Netherlands) B.V. website*, <https://emobility.delta-emea.com/> (Letzter Zugriff: 04.11.2019).

- [89] D. Fasthuber, "Auswirkungen und Potentiale der Integration von Elektromobilität in das elektrische Energiesystem Österreichs," Dissertation, Technische Universität Wien, 2019.
- [90] D. Fasthuber, J. Asamer and M. Reinthaler, *Results from the project "eTaxi for Vienna" concerning the integration of EVs in the distribution grid*, CIRED, 2019.
- [91] M. Anderl et al., „Bundesländer Luftschadstoff-Inventur 1990-2016 - Regionalisierung der nationalen Emissionsdaten auf Grundlage von EU-Berichtspflichten (Datenstand 2018),“ Umweltbundesamt GmbH, ISBN 978-3-99004-484-1, Wien, 2018.
- [92] D. Fritz et al., "Update: Ökobilanz alternativer Antriebe," Umweltbundesamt GmbH, ISBN 978-3-99004-452-0, Wien, 2018.
- [93] Handelsblatt GmbH, <https://www.handelsblatt.com/technik/energie-umwelt/> (Letzer Zugriff: 16.03.2020).
- [94] Ökostromgesetz 2012 § 23 Abs. 5, *Bundesgesetz über die Förderung der Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energieträgern (Ökostromgesetz 2012 – ÖSG 2012)*, StF: BGBl. I Nr. 75/2011, idF: BGBl. I Nr. 97/2019.
- [95] Wiener Taxitarif 1997, *Verordnung des Landeshauptmannes von Wien, mit der verbindliche Tarife für das mit Kraftfahrzeugen betriebene Platzfuhrwerks-Gewerbe festgelegt werden*, ABI 2012/42 vom 18.10.2012 Seite 10 (gültig ab 01.12.2012).
- [96] ÖVE/ÖNORM EN 60038: 2012 05 01, *CENELEC-Normspannungen (IEC 60038:2009, modifiziert)*.
- [97] H. Schwefel, *Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie*, Basel und Stuttgart: Birkhäuser Verlag, 1977.
- [98] K. Cisar-Loder, "Funktaxi, guten Tax!" - 50 Jahre Taxifunk in Wien 1963-2013, CC Taxicenter GmbH.
- [99] P. Widhalm, M. Piff, N. Brandle, H. Koller and M. Reinthaler, "Robust road link speed estimates for spare or missing probe vehicle data," Vortrag, 15th

International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Anchorage, USA, 2012.

[100] M. Reinthaler, B. Nowotny, R. Hildebrandt und F. Weichenmeier, „Evaluation of speed estimation by floating car data within the research project dMOTION,“ Vortrag, 13th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services, Beijing, China, 2007.

[101] Stadt Wien, <https://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/stadtgebiet/index.html> (letzter Zugriff: 02.01.2018).

[102] Bundeskanzleramt, <https://www.help.gv.at/> (Letzter Zugriff: 31.03.2016).

[103] H. Wakolbinger and et. al., „Demonstrationsprojekt E-Taxi für Wien,“ Endbericht, E-Mobilität für alle: Urbane Elektromobilität, Wien, 2018.

[104] Datenschutzgesetz – DSG, *Bundesgesetz zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten*, StF: BGBl. I Nr. 165/1999, idF: BGBl. I Nr. 14/2019 .

[105] D. Fritz et al., „Ökobilanz alternativer Antriebe - Fokus Elektrofahrzeuge,“ Umweltbundesamt GmbH, ISBN 978-3-99004-385-1, Wien, 2016.

[106] Stadt Wien, <https://www.wien.gv.at/umwelt/wald/erholung/wienerwald/> (Letzter Zugriff: 16.03.2020).

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Begriffsabgrenzung „Elektrofahrzeuge“ .....	14
Abbildung 2-2: Varianten elektromobiler Antriebstechnologien (Quelle: [13], eigene Darstellung) .....	16
Abbildung 2-3 Markanteile der fünf am häufigsten im Jahr 2019 gekauften batterieelektrischen Fahrzeuge der Klasse M1 in der EU (Quellen: [17], eigene Darstellung) .....	21
Abbildung 2-4: Ladekabel für Ladebetriebsart 2 mit kabelintegrierter Schutz- und Steuereinrichtung IC-CPD (links) und für Ladebetriebsart 3 (rechts, Quelle: jeweils Fa. Mennekes, [24]) .....	25
Abbildung 2-5: Übersicht der Ladesteckvorrichtungen Typ 1 bis 3 aus der zugehörigen Norm OVE EN 62196-2 [26] (Quelle: [30], eigene Darstellung) .....	28
Abbildung 2-6: Übersicht der internationalen Ladesteckvorrichtungen (Quelle: [32], eigene Darstellung) .....	31
Abbildung 2-7: Größenordnungen bezüglich Energie- und Leistungsdichte diverser Batterietechnologien für E-Fahrzeuge (Quelle: [41], eigene Darstellung) .....	35
Abbildung 2-8: Schematische Darstellung der Lade- und Entladekurven einer Lithium-Ionen-Zelle (Quelle: [13], eigene Darstellung) .....	36
Abbildung 2-9: Gemessene Ladevorgänge eines Nissan Leaf bei 22 und 50 kW; Leistungsverläufe über die Zeit (links) und über den ermittelten SOC (rechts) .....	38
Abbildung 2-10: Zusammenhang von verbauter und nutzbarer Batteriekapazität (Quelle: [43], eigene Darstellung) .....	39
Abbildung 2-11: Der Bedarfsablauf eines Funktaxis (Quelle: [44], eigene Darstellung) .....	48
Abbildung 3-1: Prinzip der GPS-Datenaufzeichnung (links) und skizzierte Darstellung der gespeicherten GPS-Positionen einer Taxifahrt (rechts) (Quelle: [53], eigene Darstellung) .....	52
Abbildung 3-2: Funktionen des Floating-Car-Servers zur Aufbereitung der Mobilitätsdaten (Quelle: [53], eigene Darstellung) .....	53
Abbildung 3-3: Prozentuale Verteilung der Distanz der Taxifahrten zwischen zwei Taxistandplätzen (alle Wochentage) .....	56
Abbildung 3-4: Prozentuale Verteilung der Fahrdauer je Taxifahrt sowie der Standdauer an den Taxistandplätzen (alle Wochentage) .....	56
Abbildung 3-5: Mittlere relative Distanz der Taxifahrten zwischen zwei Taxistandplätzen pro Stunde und Wochentag (bezogen auf den Maximalwert; Quelle: [53], eigene Darstellung) .....	57
Abbildung 3-6: Mittlere relative Dauern der Taxifahrten zwischen zwei Taxistandplätzen pro Stunde und Wochentag (bezogen auf den Maximalwert; Quelle: [53], eigene Darstellung) .....	58
Abbildung 3-7: Mittlere relative Standdauern an den Taxistandplätzen pro Stunde und Wochentag (bezogen auf den Maximalwert; Quelle: [53], eigene Darstellung) .....	58

Abbildung 3-8: Abhängigkeit des Merkmals „Fahrtdauer“ von der Uhrzeit und je Wochentag (Mittelwerte der Daten je Stunde).....	59
Abbildung 3-9: Prozentuale Verteilung des Energiebedarfs der Taxifahrten zwischen zwei Taxistandplätzen (alle Wochentage).....	60
Abbildung 3-10: Wien.at-Stadtplan mit Darstellung der Wiener Taxistandplätze (gelb markiert; Quelle: [61], eigene Darstellung).....	61
Abbildung 3-11: Saisonaler Verlauf der gleichzeitig angemeldeten Funktaxis (gesamte Funktaxiflotte, 03/11-03/12).....	63
Abbildung 3-12: Gemittelte Wochenverläufe der gleichzeitig angemeldeten, fahrenden und stehenden Funktaxis (gesamte Funktaxiflotte, 03/11-03/12).....	64
Abbildung 4-1: Schematische Darstellung eines Warteschlangenprozesses (Quelle: [66], eigene Darstellung).....	74
Abbildung 4-2: Zusammenhang von Ankunftszeiten und Zwischenankunftszeiten (Quelle: [66], eigene Darstellung).....	75
Abbildung 4-3: Graphische Darstellung einer beispielhaften Markov-Kette.....	78
Abbildung 4-4: Schematische Darstellung eines Netzwerks von Warteschlangen (Quelle: [68], eigene Darstellung).....	81
Abbildung 4-5: Serielle Kombination zweier Warteschlangen (Taxistandplatz + Taxifahrt).....	82
Abbildung 4-6: Wochenverläufe der gleichzeitig angemeldeten Funktaxis (gesamte Flotte des Jahres 2011).....	84
Abbildung 4-7: Vergleich der Verläufe von Anmeldeprofil und Normalverteilung.....	85
Abbildung 4-8: Dichtefunktion der Normalverteilung Intervalle um $\mu$ .....	87
Abbildung 4-9: Schrittweise Generierung der Betriebszeiten und resultierenden Anmeldeprofile für den beispielhaften Wochentag „Freitag“.....	90
Abbildung 4-10: Stochastisch generierte Ganglinie des Anmeldeprofils (inkl. der Einzelprofile für Tages-, Nacht- und Doppelschicht).....	92
Abbildung 4-11: Histogramm einer weibullverteilten Stichprobe ( $n = 400$ ) und Dichtefunktionen der mittels MLM geschätzten Normal-, Weibull- und Gammaverteilung.....	99
Abbildung 4-12: Von der Auswahl der Stichprobe über die Approximation der Verteilung zur Generierung einer Zufallszahl.....	100
Abbildung 4-13: Box-Plots der approximierten Weibull-Parameter $a$ und $b$ für das Merkmal „Standdauer“ (alle Stunden und Wochentage).....	107
Abbildung 4-14: Box-Plots der approximierten Log-Logistik-Parameter $\alpha$ und $\beta$ für das Merkmal „Fahrtdauer“ (alle Stunden und Wochentage).....	108
Abbildung 4-15: Streudiagramm für Fahrtdauer der Taxifahrten und Standdauer am TSP.....	110
Abbildung 4-16: Streudiagramm für Fahrtdauer und Distanz der Taxifahrten.....	111

Abbildung 4-17: Relative Häufigkeit der Distanz je Taxifahrt für unterschiedliche Fahrdauer- Intervalle sowie die zugehörigen PDF der „best fit“-Verteilungen („Burr“)	112
Abbildung 4-18: Verlauf der geschätzten Parameterwerte $\alpha$ , $c$ und $k$ der Burr-Verteilung in Abhängigkeit der Fahrdauer (Minutenintervalle; Bereich bis 60 Minuten)	117
Abbildung 4-19: Verlauf der geschätzten Parameterwerte $\alpha$ , $c$ und $k$ der Burr-Verteilung in Abhängigkeit der Fahrdauer (Minutenintervalle; Bereich von 60 bis 120 Minuten)	117
Abbildung 4-20: Streudiagramm für Distanz und Energiebedarf je Taxifahrt	119
Abbildung 4-21: Relative Häufigkeit des spez. Energiebedarfs je Taxifahrt für unterschiedliche Distanz-Intervalle sowie die zugehörigen PDF der „best fit“-Verteilungen	120
Abbildung 4-22: Verlauf der geschätzten Parameterwerte $\mu$ und $\sigma$ der Lognormal-Verteilung in Abhängigkeit der Distanz (100m-Intervalle; Bereich: bis 3 km)	124
Abbildung 4-23: Verlauf der geschätzten Parameterwerte $\mu$ und $\sigma$ der Lognormal-Verteilung in Abhängigkeit der Distanz (100m-Intervalle; Bereich: von 3 bis 30 km)	124
Abbildung 4-24: Verlauf der geschätzten Parameterwerte $\mu$ und $\sigma$ der Lognormal-Verteilung in Abhängigkeit der Distanz (100m-Intervalle; Bereich: von 30 bis 50 km)	125
Abbildung 5-1: Programmablaufplan „Initialisierungsphase“ für die nachfolgende stochastische Generierung der Mobilitätsdaten einer E-Taxiflotte	127
Abbildung 5-2: Programmablaufplan „Realisierungsphase“ zur Veranschaulichung der stochastischen Generierung der Mobilitätsdaten einer E-Taxiflotte (Fahren und Stehen)	128
Abbildung 5-3: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen des Merkmals „Fahrdauer“; Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (GPS-basierte Fahrzeugdaten)	136
Abbildung 5-4: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen des Merkmals „Distanz“; Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (GPS-basierte Fahrzeugdaten)	137
Abbildung 5-5: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen des Merkmals „Energiebedarf Antrieb“ (ohne Nebenverbraucher); Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (GPS-basierte Fahrzeugdaten)	139
Abbildung 5-6: Verteilung der Anfahrtshäufigkeit der TSP im 1. Bezirk, ausgehend vom Taxistandplatz mit der TSP-Kennnummer 101 (exkl. der TSP anderer Bezirke)	141
Abbildung 5-7: Vergleich der relativen Häufigkeiten für TSP <sub>Start</sub> (links) und TSP <sub>Ziel</sub> (recht) je Gemeindebezirk; Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (GPS-basierte Fahrzeugdaten)	145
Abbildung 5-8: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen des Merkmals „Standdauer am TSP“; Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (GPS-basierte Fahrzeugdaten)	146
Abbildung 5-9: Vergleich der gemittelten Anmeldeprofile der gesamten E-Taxiflotte: Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (kumulierte Flottendaten)	149

Abbildung 5-10: Vergleich des saisonalen Verlaufs der Anmeldeprofile der ges. E-Taxiflotte: Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (kumulierte Flottendaten)	150
Abbildung 5-11: Vergleich der gemittelten Fahrprofile der gesamten E-Taxiflotte: Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (kumulierte Flottendaten)	151
Abbildung 5-12: Vergleich der gemittelten Standprofile der gesamten E-Taxiflotte: Simulation (stochastisch generiert) vs. Original (kumulierte Flottendaten)	151
Abbildung 5-13: Verteilung der Zeitpunkte von Beginn und Ende der Taxischichten für die gewählten Betriebsarten Tages-, Nacht-, und Doppelschicht (4.500 generierte E-Taxis, alle Wochentage)	152
Abbildung 5-14: Verteilung der Taxischichtdauern für die gewählten Betriebsarten Tages-, Nacht- und Doppelschicht (4.500 generierte E-Taxis, alle Wochentage)	153
Abbildung 5-15: Verteilung der Anzahl an Taxifahrten je Taxischicht für die gewählten Betriebsarten Tages-, Nacht- und Doppelschicht (4.500 generierte E-Taxis, alle Wochentage)	154
Abbildung 5-16: Verteilung der Kilometerleistungen je Nutzungstag für die gewählten Betriebsarten Tages-, Nacht- und Doppelschicht (4.500 generierte E-Taxis, alle Wochentage)	155
Abbildung 6-1: Überblick zum Programmablaufplan des entwickelten Simulationsprogramms (SOC-basierte Entscheidung über die Durchführung von Ladevorgängen und Taxifahrten)	159
Abbildung 6-2: Schema „Einfügen eines Ladevorgangs“ (links: Fall A – Standdauer reicht zum Laden, rechts: Fall B – Taxifahrt entfällt)	163
Abbildung 6-3: Modellierter Ladevorgänge für DC-Schnellladen (22 und 50 kW); verbaute Batteriekapazität: 24 kWh; (Primärachse: durchgezogen; Sekundärachse: strichliert)	167
Abbildung 6-4: Verteilung der Wiener Taxistandplätze (links) und Überlagerung der Start- und Zielpunkte (TSP) der Taxifahrten (rechts)	172
Abbildung 6-5: Optimierte Verteilung für einen LIS-Ausbau mit 20 Standorten „flächendeckend“ (links) und „bedarfsgerecht“ (rechts)	176
Abbildung 6-6: Maximale Distanz („Luftlinie“) zwischen TSP und dem nächstgelegenen LIS-Standort in Abhängigkeit der Gesamtanzahl an Ladestandorten	177
Abbildung 6-7: Mittlere Distanz („Luftlinie“) zwischen TSP und dem nächstgelegenen LIS-Standort in Abhängigkeit der Gesamtanzahl an Ladestandorten	178
Abbildung 6-8: Mittlerer Anteil der rein elektrisch durchführbaren Taxifahrten (arithmetische Mittelwerte je LIS-Ausbaugrad)	182
Abbildung 6-9: Wartedauer am Ladestandort in Abhängigkeit der Anzahl an Ladestandorten (arithmetische Mittelwerte: gestrichelte Linien; 95%-Quantile: durchgezogene Linien)	183
Abbildung 6-10: Verteilung der Wartedauer am Ladepunkt (Basiszenarien, 1 LP je Ladestandort mit 50 kW)	184
Abbildung 6-11: Optimierter LIS-Ausbau für alle Basis- und Alternativszenarien	185

Abbildung 6-12: Anteil der rein elektrisch durchführbaren Taxifahrten (für alle Basis- und Alternativszenarien sowie für alle Betriebsarten).....	191
Abbildung 6-13: Verteilung des spezifischen Energiebedarfs (mit und ohne Nebenverbraucher; Grundgesamtheit der generierten Mobilitätsdaten) .....	197
Abbildung 6-14: Häufigkeit des Energiebedarfs je Taxischicht und Betriebsart (inkl. Nebenverbraucher; Grundgesamtheit der generierten Mobilitätsdaten) .....	199
Abbildung 6-15: Häufigkeit von Ladevorgängen je Taxischicht an betrieblicher Ladeinfrastruktur (angeführt ist die Anzahl der Ladevorgänge und in Klammern der prozentuale Anteil).....	205
Abbildung 6-16: Häufigkeit von Ladevorgängen je Taxischicht an öffentlicher Ladeinfrastruktur (angeführt ist die Anzahl der Ladevorgänge und in Klammern der prozentuale Anteil).....	207
Abbildung 6-17: Verteilung der geladenen Energiemenge je Ladevorgang an betrieblichen Ladestationen („Basic & Option“) .....	210
Abbildung 6-18: Verteilung der geladenen Energiemenge je Ladevorgang an öffentlichen Ladestationen (gültig für alle Szenarien).....	211
Abbildung 6-19: Verteilung der Startzeitpunkte für Ladevorgänge an betrieblichen Ladestationen (Die Ergebnisse gelten für die Szenarien „Basic & Option“).....	212
Abbildung 6-20: Verteilung der max. Standdauer am betrieblichen Abstellplatz in der betriebsfreien Zeit (zwischen zwei Taxischichten).....	214
Abbildung 6-21: Verteilung der Dauer je Ladevorgang an betrieblichen Ladestationen (Annahme bezüglich Ladeleistung: 11 kW bei 40 kWh und 22 kW bei 80 kWh).....	215
Abbildung 6-22: Verteilung der Startzeitpunkte für Ladevorgänge an öffentlichen Ladestationen .....	217
Abbildung 6-23: Verteilung der Dauer je Ladevorgang an öffentlichen Ladestationen .....	218
Abbildung 6-24: Vergleich der Anteile von geladener Energie, Anzahl der Ladevorgänge und Gesamtladedauer.....	221
Abbildung 7-1: Verteilung der Nutzungsgrade von öffentlichen Ladepunkten (500 E-Taxis) (dargestellte Kennwerte: Maximum, 0,75-Quantil, Median, 0,25-Quantil, Minimum).....	226
Abbildung 7-2: Summenladeprofil aller öffentlichen Ladepunkte (mittlere Wochenganglinie, 500 E-Taxis) .....	231
Abbildung 7-3: Anteil der Betriebsarten am Summenladeprofil (oben: Basic 40, unten: Basic 80, 500 E-Taxis).....	233
Abbildung 7-4: Mittleres Lastprofil am öffentlichen Ladestandort (mittlere Wochenganglinie, 500 E-Taxis) .....	236
Abbildung 7-5: Häufigkeitsverteilung für das Auftreten der gesamten Anschlussleistung am Ladestandort bei einer Durchdringung von 500 E-Taxis (dargestellte Kennwerte: Maximum, 0,75-Quantil, Median, 0,25-Quantil, Minimum) .....	238

Abbildung 7-6: Reduktionspotenzial der Anschlussleistung mit stationärem Speicher (links), Lastprofilvergleich mit und ohne stationärem Speicher (rechts) .....	240
Abbildung 8-1: Treibhausgas-Emissionen in Österreich 2017 (ohne Emissionshandel): Nach Sektoren (links) und nach Arten der Treibhausgase (rechts) .....	242
Abbildung 8-2: Gesamte Treibhausgas-Emissionen (direkt und indirekt) verschiedener Antriebsarten und Stromerzeugungen .....	245
Abbildung A-1: Abhängigkeit des Merkmals „Standdauer am TSP“ von der Uhrzeit und je Wochentag (Mittelwerte der Daten je Stunde) .....	278
Abbildung A-2: Abhängigkeit des Merkmals „Distanz“ von der Uhrzeit und je Wochentag (Mittelwerte der Daten je Stunde) .....	278
Abbildung A-3: Anteil der rein elektrisch durchführbaren Taxifahrten bei 2.500 E-Taxis (Basisszenarien mit 40, 60 und 80 kWh, 1 LP je Ladestandort mit 50 kW) .....	279
Abbildung A-4: Anteil der rein elektrisch durchführbaren Taxifahrten bei 4.500 E-Taxis (Basisszenarien mit 40, 60 und 80 kWh, 1 LP je Ladestandort mit 50 kW) .....	279
Abbildung A-5: Wartedauer am Ladestandort in Abhängigkeit der Anzahl an Ladestandorte (Basisszenarien mit 40, 60 und 80 kWh, 2.500 E-Taxis, 1 LP je Ladestandort mit 50 kW) .....	280
Abbildung A-6: Wartedauer am Ladestandort in Abhängigkeit der Anzahl an Ladestandorte (Basisszenarien mit 40, 60 und 80 kWh, 4.500 E-Taxis, 1 LP je Ladestandort mit 50 kW) .....	280
Abbildung A-7: Anteil NICHT durchführbaren Taxifahrten (für alle Basis- und Alternativszenarien sowie für alle Betriebsarten) .....	281
Abbildung A-8: Verteilung des Batterieladezustandes zu Beginn der Ladevorgänge an betrieblichen Ladestationen .....	281
Abbildung A-9: Verteilung des Batterieladezustandes zu Beginn der Ladevorgänge an öffentlichen Ladestationen .....	282
Abbildung A-10: Verteilung der Nutzungsgrade von öffentlichen Ladepunkten (2.500 E-Taxis) (dargestellte Kennwerte: Maximum, 0,75-Quantil, Median, 0,25-Quantil, Minimum) .....	283
Abbildung A-11: Verteilung der Nutzungsgrade von öffentlichen Ladepunkten (4.500 E-Taxis) (dargestellte Kennwerte: Maximum, 0,75-Quantil, Median, 0,25-Quantil, Minimum) .....	284
Abbildung A-12: Summenladeprofil aller öffentlichen Ladepunkte (mittlere Wochenganglinie, 2.500 E-Taxis) .....	285
Abbildung A-13: Summenladeprofil aller öffentlichen Ladepunkte (mittlere Wochenganglinie, 4.500 E-Taxis) .....	286
Abbildung A-14: Durchschnittlich abgegebenen Energiemenge je Wochentag an den öffentlichen Ladepunkten (500 E-Taxis) .....	287
Abbildung A-15: Durchschnittlich abgegebenen Energiemenge je Wochentag an den öffentlichen Ladepunkten (2.500 E-Taxis) .....	288

Abbildung A-16: Durchschnittlich abgegebenen Energiemenge je Wochentag an den öffentlichen Ladepunkten (4.500 E-Taxis).....	289
Abbildung A-17: Mittleres Lastprofil am öffentlichen Ladestandort (mittlere Wochenganglinie, 2.500 E-Taxis) .....	290
Abbildung A-18: Mittleres Lastprofil am öffentlichen Ladestandort (mittlere Wochenganglinie, 4.500 E-Taxis) .....	291

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Anforderungen an eine Antriebsbatterie (Quelle: [14]).....	34
Tabelle 2-2: Anzahl der Wiener Taxistandplätze und Auffahrmöglichkeiten [50] .....	44
Tabelle 3-1: Berücksichtigung der Einflussfaktoren zur Energiemodellierung [53].....	54
Tabelle 3-2: Anteil der Taxifahrten in %, die im Bezirk $x$ starten (TSP als Ausgangspunkt).....	61
Tabelle 3-3: Zusammenfassung der wesentlichen Unterscheidungsmerkmale zum Forschungsprojekt „ZENEM“.....	69
Tabelle 3-4: Zusammenfassung der wesentlichen Unterscheidungsmerkmale zur Diplomarbeit „Synthetische Modellierung und Ladeprofilbildung einer elektrischen Taxi-Flotte“ .....	71
Tabelle 4-1: TSP-Übergangsmatrix auf Bezirksebene zusammengefasst (gesamter Betrachtungszeitraum, Angaben in ganzzahligen Prozentwerten) .....	79
Tabelle 4-2: Endgültige Parameterwerte der Normalverteilungen für alle Wochentage und Betriebsarten .....	93
Tabelle 4-3: Reihung der durchschnittlichen MSE-Werte aller betrachteten Verteilungstypen für das Merkmal „Standdauer“ .....	103
Tabelle 4-4: Reihung der durchschnittlichen MSE-Werte aller betrachteten Verteilungstypen für das Merkmal „Fahrdauer“ .....	104
Tabelle 4-5: Reihung der durchschnittlichen MSE-Werte aller betrachteten Verteilungstypen für das Merkmal „Distanz“ .....	113
Tabelle 4-6: Reihung der durchschnittlichen MSE-Werte aller betrachteten Verteilungstypen für das Merkmal „Spezifischer Energiebedarf“ .....	121
Tabelle 5-1: Ermittelte Anteile der Betriebsarten und Nutzungstage .....	131
Tabelle 5-2: Vergleich der arithmetischen Mittelwerte diverser Merkmale der drei Betriebsarten .....	156
Tabelle 6-1: Definierte Parameterwerte der verwendeten Batterie-Ladecharakteristik für DC-Schnellladen mit 22 und 50 kW .....	165
Tabelle 6-2: Gewählte Einstellungen für die evolutionsstrategische Optimierung.....	175
Tabelle 6-3: Definition und Parameterwerte der Basis- und Alternativszenarien .....	180
Tabelle 6-4: Anzahl der notwendigen öffentlichen Ladepunkte bzw. Ladestandorte in Abhängigkeit der Szenarien .....	186
Tabelle 6-5: Mittlere Anzahl der Taxifahrten je Taxischicht in Abhängigkeit der Szenarien .....	193
Tabelle 6-6: Mittlere Jahreskilometerleistung je E-Taxi in Abhängigkeit der Szenarien .....	195
Tabelle 6-7: Mittlerer Energiebedarf je Taxischicht in Abhängigkeit der Szenarien ...	200
Tabelle 6-8: Mittlerer Jahresenergiebedarf je E-Taxi in Abhängigkeit der Szenarien.	201

Tabelle 6-9: Jahresenergiebedarf der gesamten E-Taxiflotte in Abhängigkeit der Durchdringungsrate an E-Taxis .....	202
Tabelle 6-10: Mittlere Anzahl von Ladevorgängen je Taxischicht an öffentlicher Ladeinfrastruktur .....	208
Tabelle 6-11: Mittelwerte für Anzahl und Dauer der Ladevorgänge sowie für die geladenen Energiemengen an öffentlicher bzw. betrieblicher LIS (Basis- und Alternativszenarien) .....	222
Tabelle 7-1: Nutzungsgrad der öffentlichen Ladestationen je Szenario (500 E-Taxis) .....	227
Tabelle 7-2: Anzahl der täglichen Ladevorgänge an öffentlichen Ladepunkten (LP) für eine Durchdringung von 500 E-Taxis .....	228
Tabelle 8-1: THG-Emissionen des Sektors „Verkehr“ 2017 in Österreich und Veränderung seit dem Jahr 1990 .....	243
Tabelle 8-2: Gesamte Treibhausgas-Emissionen in g CO <sub>2</sub> -Äq. pro Fahrzeugkilometer verschiedener Antriebsarten und Stromerzeugungen .....	246
Tabelle 8-3: Potenzial der CO <sub>2</sub> -Reduktion für die gesamte E-Taxiflotte .....	247
Tabelle 8-4: Ausbau erneuerbarer Energiequellen zur Deckung des Ladebedarfs von E-Taxis .....	248
Tabelle B-1: Statuswerte der Vermittlungsgesellschaft TAXI 31300 (Quelle: [44], eigene Darstellung) .....	292
Tabelle B-2: Taxischichtdauern je Betriebsarten und je Wochentag.....	293
Tabelle B-3: Anzahl der Taxifahrten je Taxischicht (nach Betriebsarten und Wochentagen) .....	294
Tabelle B-4: Kilometerleistungen je Nutzungstag (nach Betriebsarten und Wochentagen) .....	295
Tabelle B-5: Prozentualer Anteil der durchführbaren Taxifahrten in Abhängigkeit der Szenarien .....	296
Tabelle B-6: Nutzungsgrad der öffentlichen Ladestationen je Szenario (2.500 E-Taxis) .....	297
Tabelle B-7: Nutzungsgrad der öffentlichen Ladestationen je Szenario (4.500 E-Taxis) .....	298
Tabelle B-8: Anzahl der täglichen Ladevorgänge an öffentlichen Ladepunkten (LP) für eine Durchdringung von 2.500 E-Taxis .....	299
Tabelle B-9: Anzahl der täglichen Ladevorgänge an öffentlichen Ladepunkten (LP) für eine Durchdringung von 4.500 E-Taxis .....	300
Tabelle B-10: Gesamte Stickoxidemissionen in g NO <sub>x</sub> pro Fahrzeugkilometer verschiedener Antriebsarten und Stromerzeugungen. ....	301
Tabelle B-11: Gesamte Partikel-Emissionen in g PM pro Fahrzeugkilometer verschiedener Antriebsarten und Stromerzeugungen. ....	302

---

Tabelle B-12: Kumulierter Energieaufwand in kWh pro Fahrzeugkilometer verschiedener Antriebsarten und Stromerzeugungen. ....	303
Tabelle C-1: Wiener Taxitarife (gültig ab 01.12.2012) .....	305

## Anhang A „Ergänzende Abbildungen“

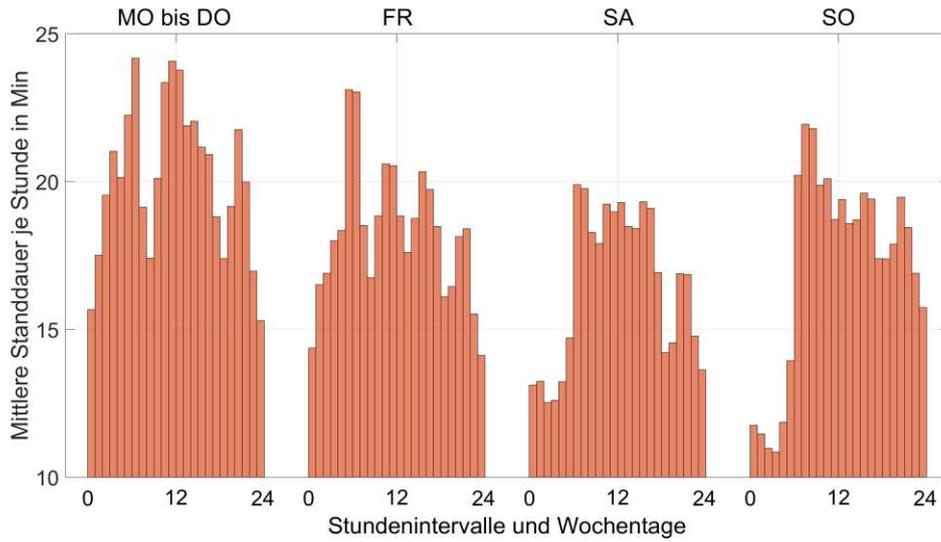


Abbildung A-1: Abhängigkeit des Merkmals „Standdauer am TSP“ von der Uhrzeit und je Wochentag (Mittelwerte der Daten je Stunde)

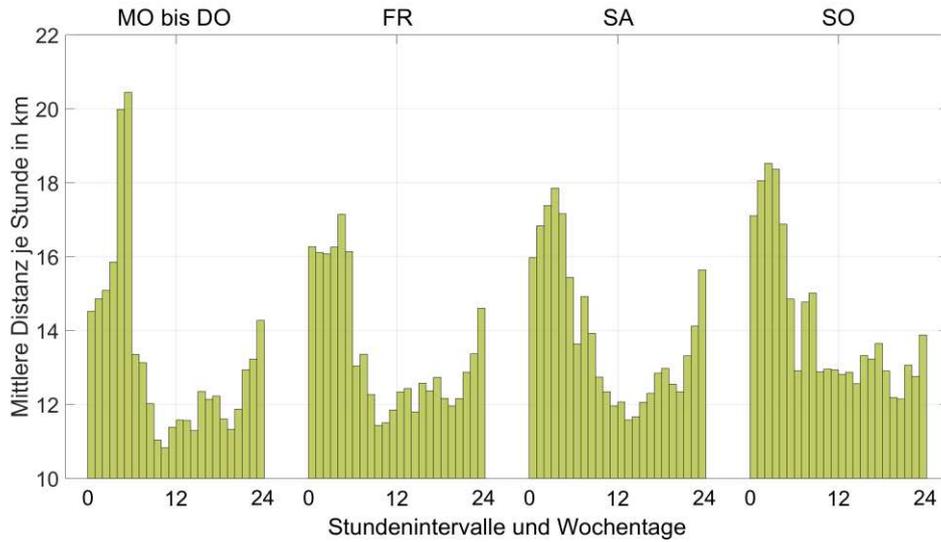


Abbildung A-2: Abhängigkeit des Merkmals „Distanz“ von der Uhrzeit und je Wochentag (Mittelwerte der Daten je Stunde)

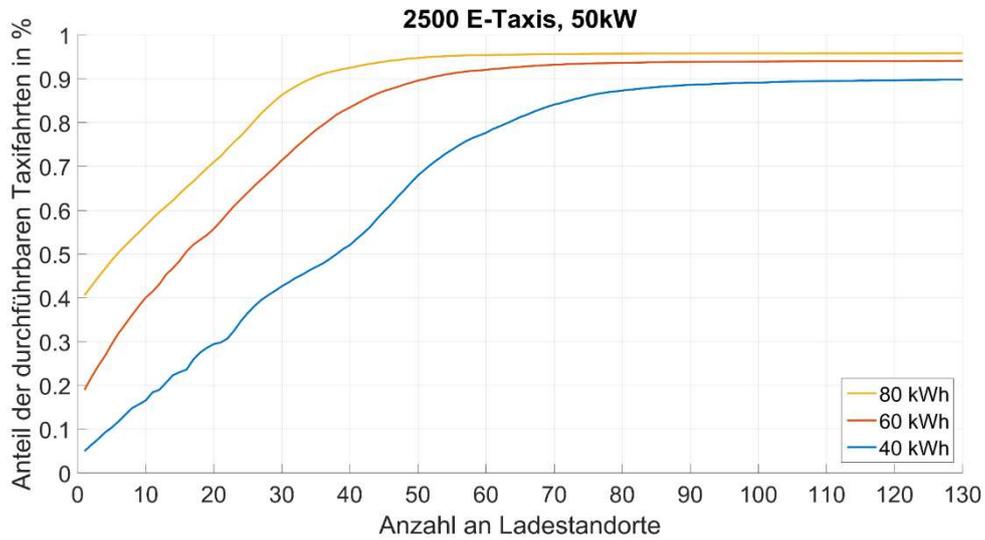


Abbildung A-3: Anteil der rein elektrisch durchführbaren Taxifahrten bei 2.500 E-Taxis (Basisszenarien mit 40, 60 und 80 kWh, 1 LP je Ladestandort mit 50 kW)

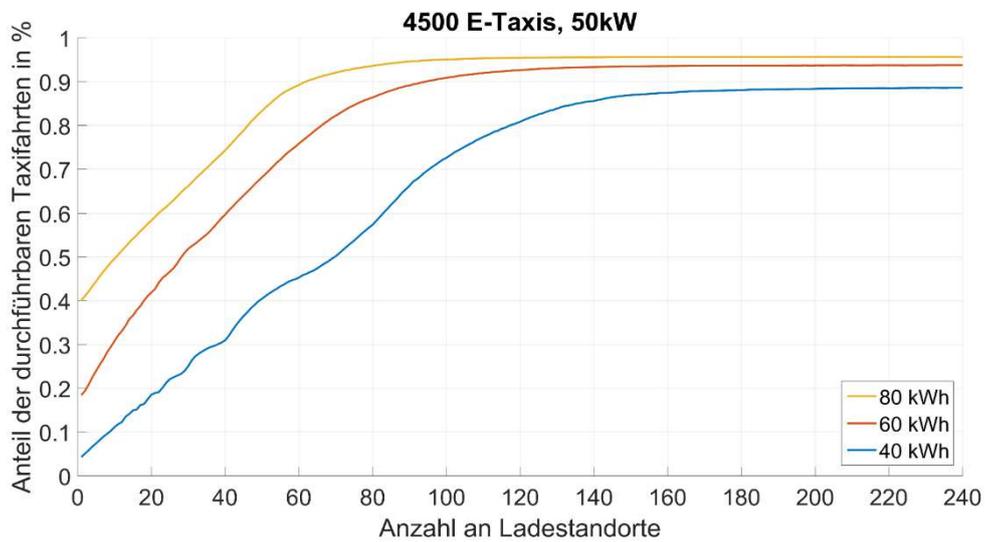


Abbildung A-4: Anteil der rein elektrisch durchführbaren Taxifahrten bei 4.500 E-Taxis (Basisszenarien mit 40, 60 und 80 kWh, 1 LP je Ladestandort mit 50 kW)

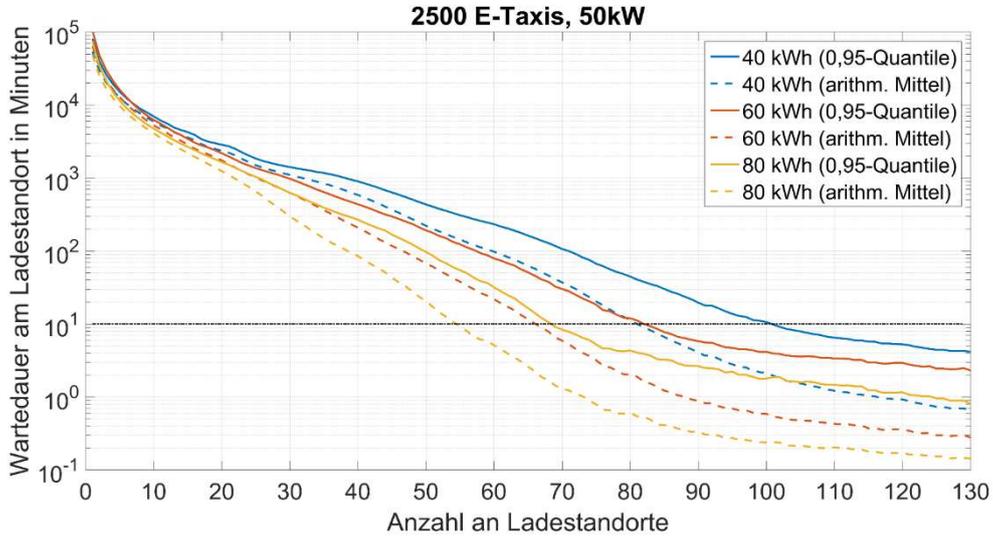


Abbildung A-5: Wartedauer am Ladestandort in Abhängigkeit der Anzahl an Ladestandorte (Basisszenarien mit 40, 60 und 80 kWh, 2.500 E-Taxis, 1 LP je Ladestandort mit 50 kW)

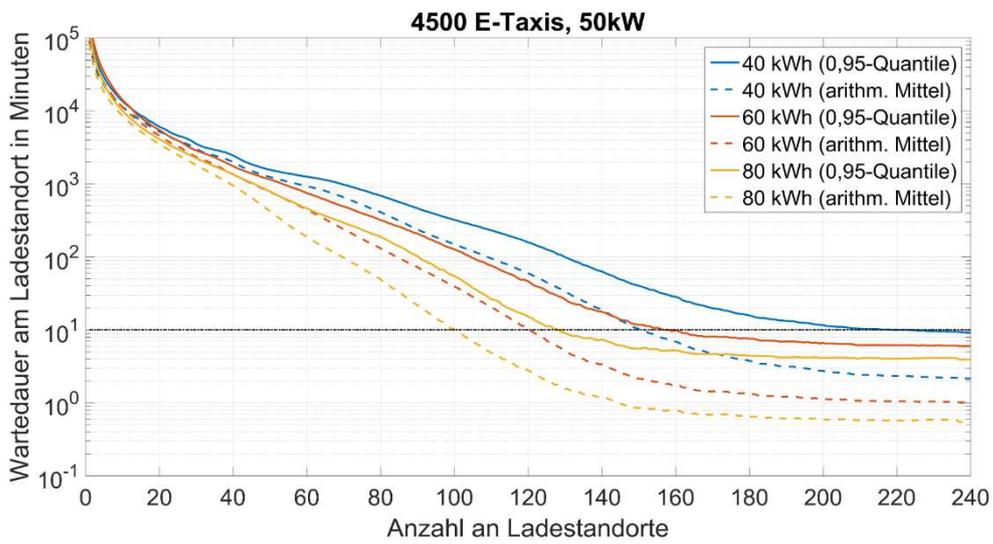


Abbildung A-6: Wartedauer am Ladestandort in Abhängigkeit der Anzahl an Ladestandorte (Basisszenarien mit 40, 60 und 80 kWh, 4.500 E-Taxis, 1 LP je Ladestandort mit 50 kW)

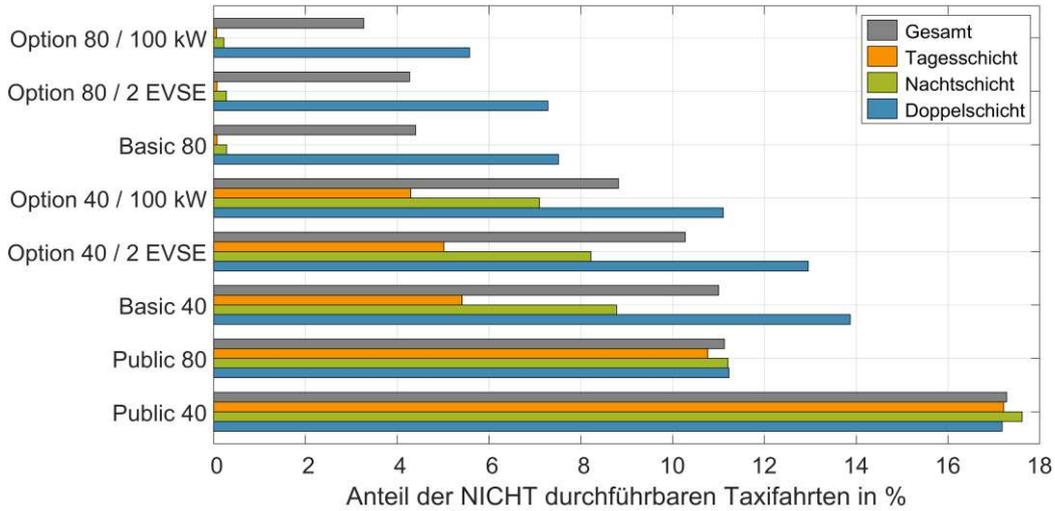


Abbildung A-7: Anteil NICHT durchführbaren Taxifahrten (für alle Basis- und Alternativszenarien sowie für alle Betriebsarten)

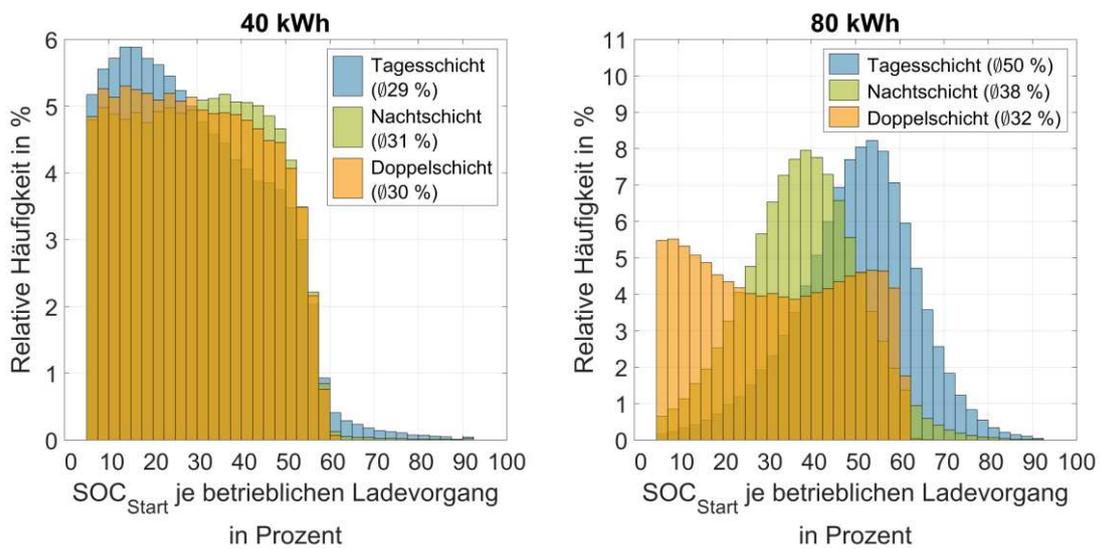


Abbildung A-8: Verteilung des Batterieladezustandes zu Beginn der Ladevorgänge an betrieblichen Ladestationen

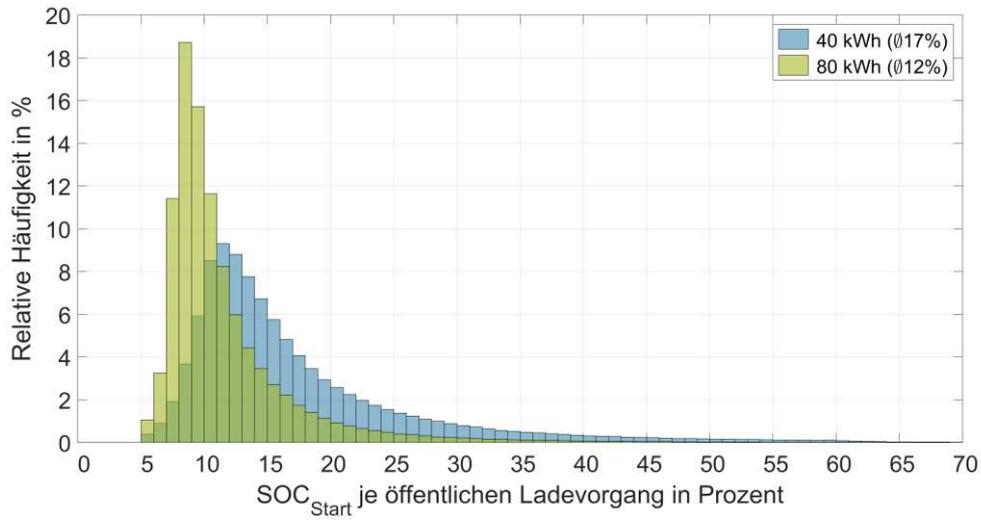


Abbildung A-9: Verteilung des Batterieladezustandes zu Beginn der Ladevorgänge an öffentlichen Ladestationen

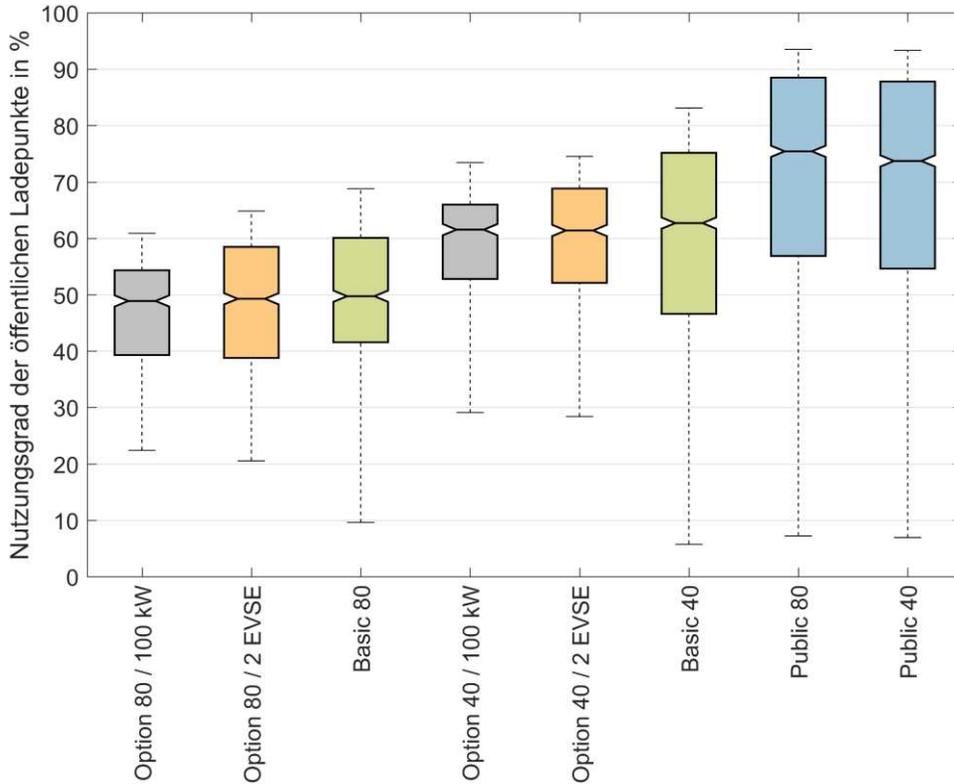


Abbildung A-10: Verteilung der Nutzungsgrade von öffentlichen Ladepunkten (2.500 E-Taxis)  
 (dargestellte Kennwerte: Maximum, 0,75-Quartil, Median, 0,25-Quantil, Minimum)

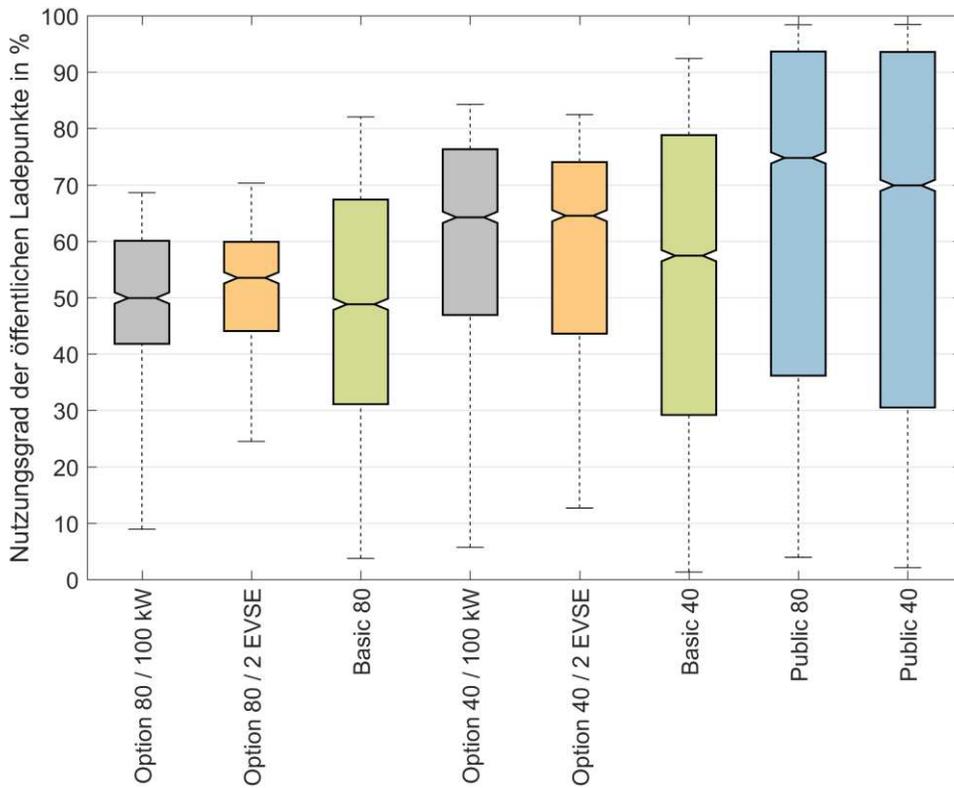


Abbildung A-11: Verteilung der Nutzungsgrade von öffentlichen Ladepunkten (4.500 E-Taxis)  
(dargestellte Kennwerte: Maximum, 0,75-Quartil, Median, 0,25-Quantil, Minimum)

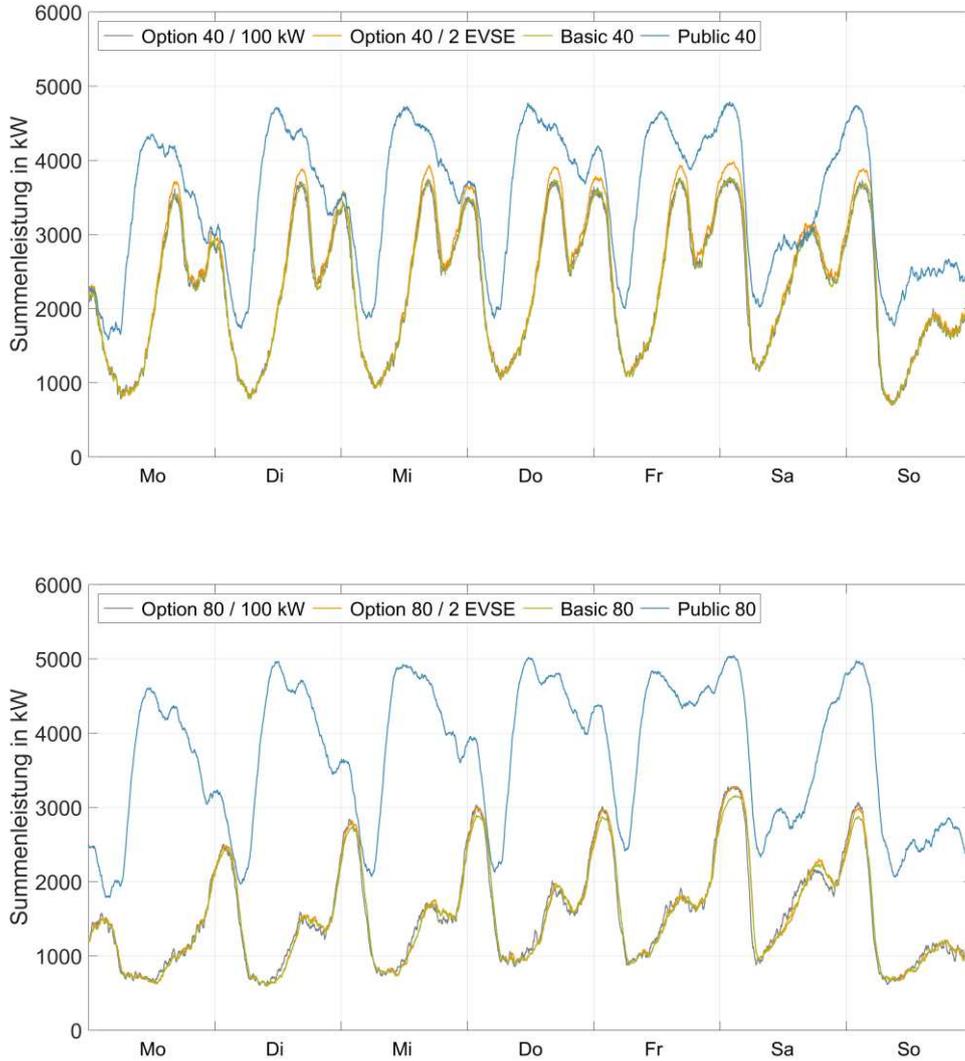


Abbildung A-12: Summenladeprofil aller öffentlichen Ladepunkte  
(mittlere Wochenganglinie, 2.500 E-Taxis)

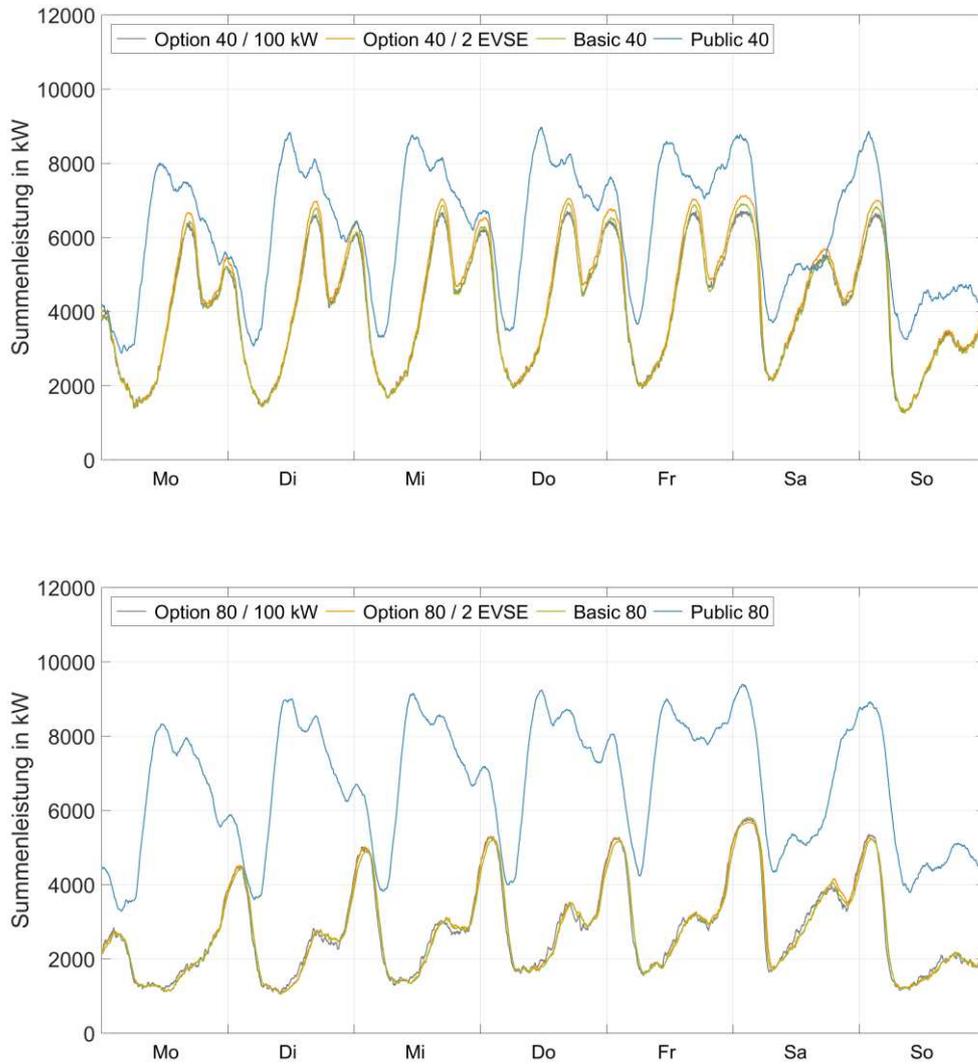
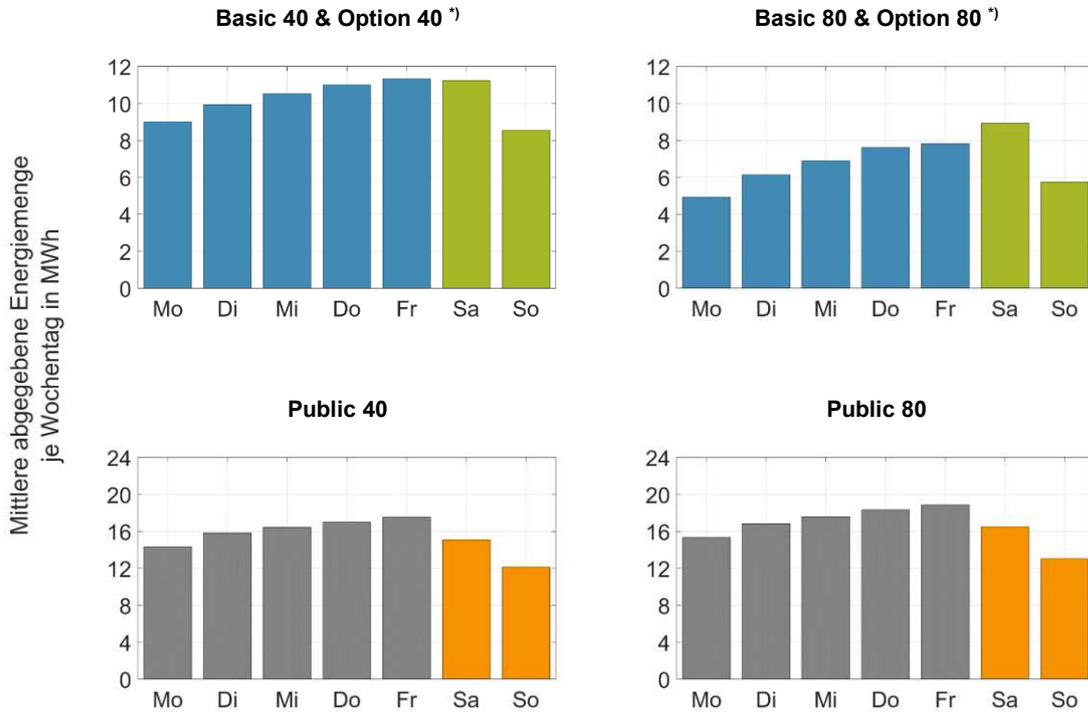
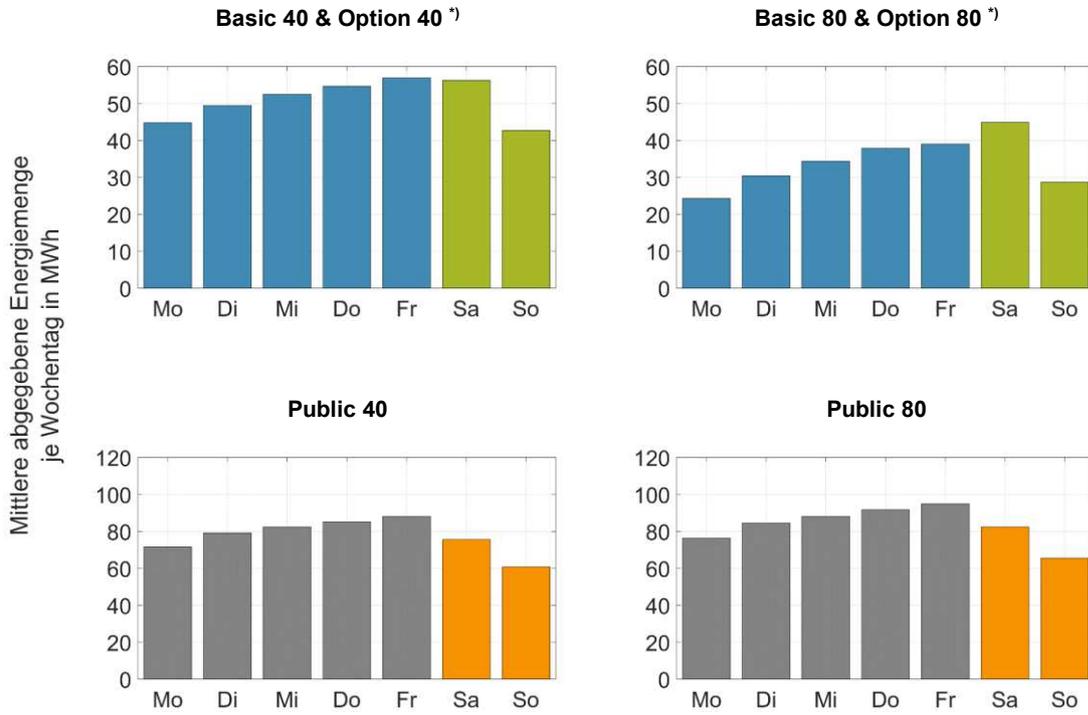


Abbildung A-13: Summenladeprofil aller öffentlichen Ladepunkte (mittlere Wochenganglinie, 4.500 E-Taxis)



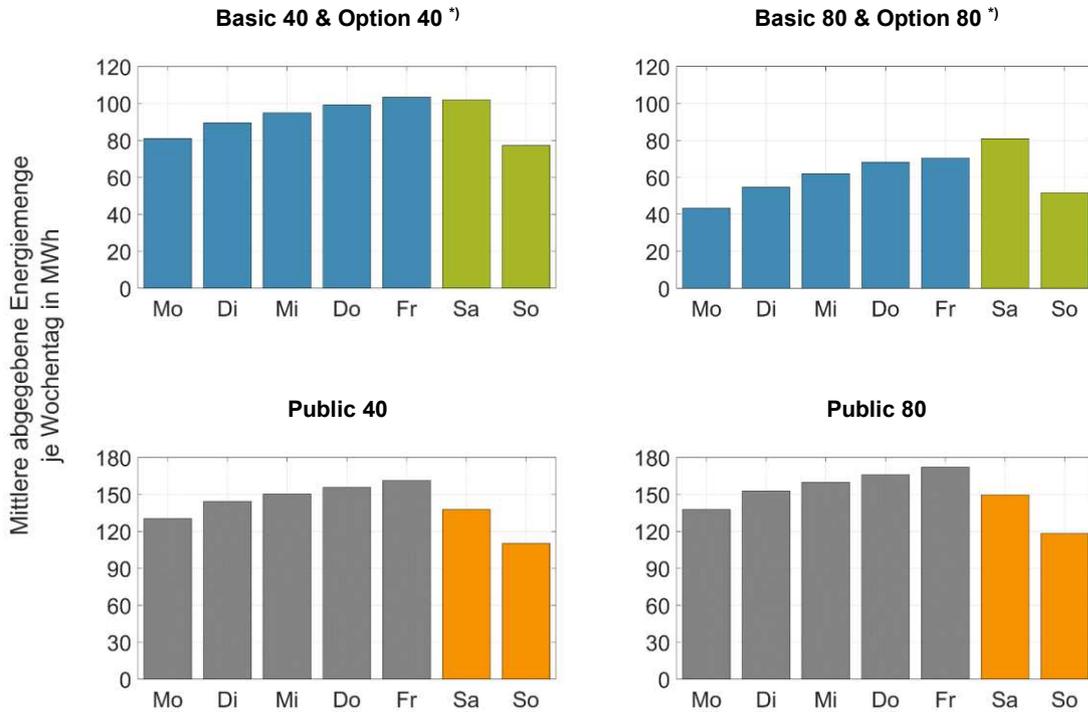
<sup>\*)</sup> Für die Szenarien „Option“ gelten die Werte näherungsweise. Konkret ergibt sich eine Proportionalität zum Jahresenergiebedarf (siehe Tabelle 6-8).

Abbildung A-14: Durchschnittlich abgegebene Energiemenge je Wochentag an den öffentlichen Ladepunkten (500 E-Taxis)



<sup>\*)</sup> Für die Szenarien „Option“ gelten die Werte näherungsweise. Konkret ergibt sich eine Proportionalität zum Jahresenergiebedarf (siehe Tabelle 6-8).

Abbildung A-15: Durchschnittlich abgegebenen Energiemenge je Wochentag an den öffentlichen Ladepunkten (2.500 E-Taxis)



<sup>\*)</sup> Für die Szenarien „Option“ gelten die Werte näherungsweise. Konkret ergibt sich eine Proportionalität zum Jahresenergiebedarf (siehe Tabelle 6-8).

Abbildung A-16: Durchschnittlich abgegebenen Energiemenge je Wochentag an den öffentlichen Ladepunkten (4.500 E-Taxis)

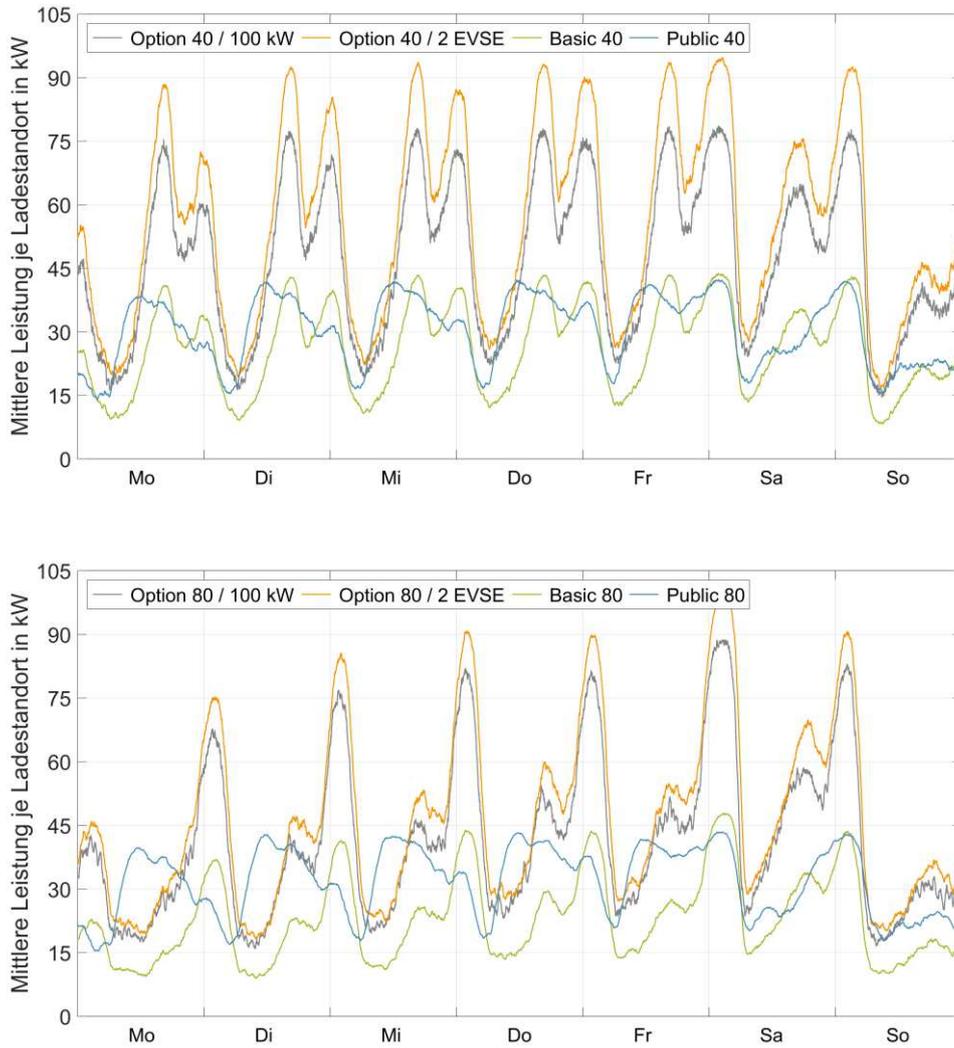


Abbildung A-17: Mittleres Lastprofil am öffentlichen Ladestandort (mittlere Wochenganglinie, 2.500 E-Taxis)

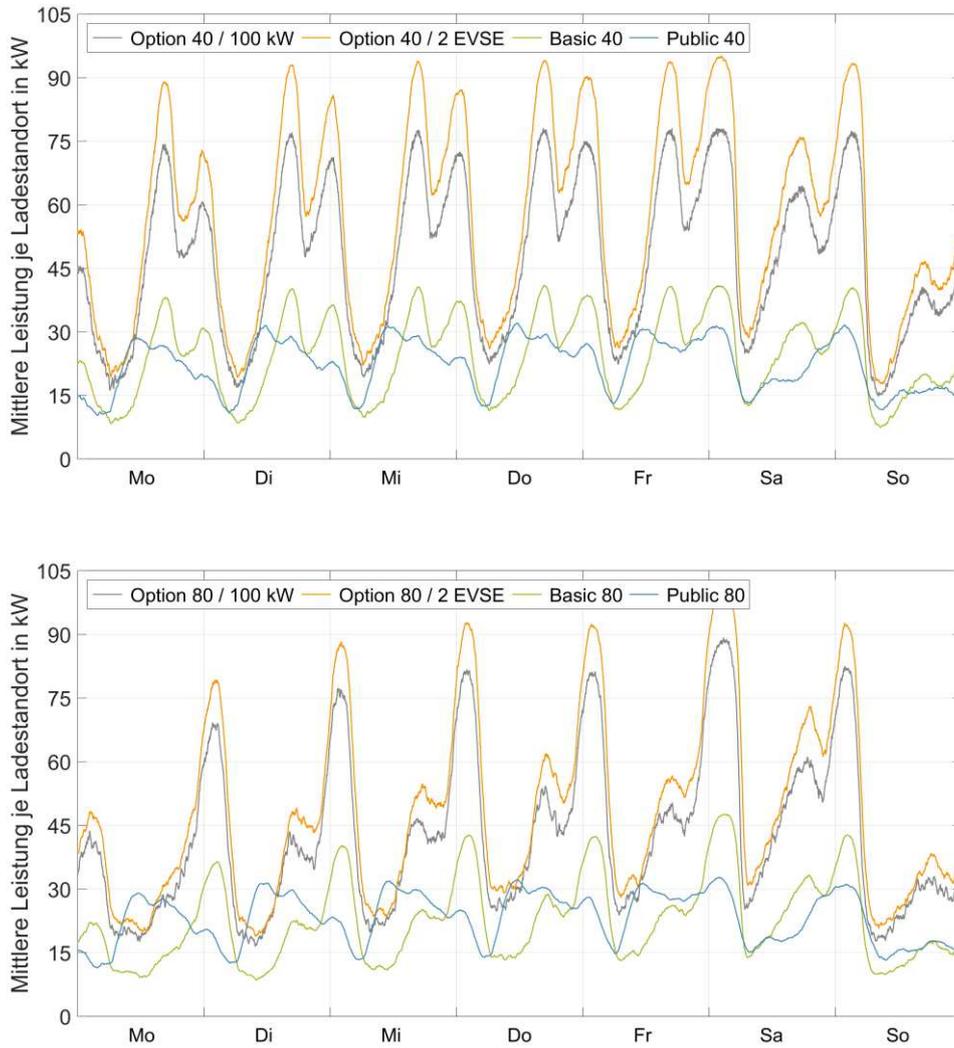


Abbildung A-18: Mittleres Lastprofil am öffentlichen Ladestandort (mittlere Wochenganglinie, 4.500 E-Taxis)

## Anhang B „Ergänzende Tabellen“

Tabelle B-1: Statuswerte der Vermittlungsgesellschaft TAXI 31300

(Quelle: [44], eigene Darstellung)

Status/Kategorie	Erklärung	Gruppe
<b>Angemeldet</b>	Funktaxi frei, jedoch keine gültige Umgebung manuell oder per GPS übermittelt	Leerfahrt
<b>Besetzt mit KundIn</b>	Funktaxi besetzt, Taxameter auf Modus „besetzt“, kein Fahrziel eingegeben	Besetztfahrt
<b>In Umgebung</b>	Funktaxi frei, Umgebung manuell oder per GPS übermittelt und dort eingebucht	Leerfahrt
<b>In Anfahrt</b>	Fahrt zum Kunden/zur Kundin nach Erhalten eines Funkauftrages	Leerfahrt
<b>Besetzt m. Folgeauftrag</b>	Weiterfahrt im Besetztstatus mit einem übernommenen Folgeauftrag	Besetztfahrt
<b>Am Standplatz</b>	Wartezeit am Taxistandplatz. Der Fahrer/die FahrerIn gibt das Eintreffen manuell ein	Wartezeit
<b>Beim Kunden/bei der Kundin</b>	Wartezeit beim Kunden/bei der Kundin. Der Fahrer/die FahrerIn gibt das Eintreffen manuell ein	Wartezeit
<b>Besetzt mit Fahrziel</b>	Funktaxi besetzt, Taxameter auf Modus „besetzt“, gültiges Fahrziel eingegeben	Besetztfahrt

Tabelle B-2: Taxischichtdauern je Betriebsarten und je Wochentag

Quantile der Taxischichtdauer		Montag bis Donnerstag (in Stunden)	Freitag (in Stunden)	Samstag (in Stunden)	Sonntag (in Stunden)
Tagesschicht	Q <sub>25</sub>	7,4	7,0	12,9	7,0
	Q <sub>50</sub>	8,8	8,7	14,0	8,1
	Q <sub>75</sub>	10,3	10,5	15,2	9,4
Nachtschicht	Q <sub>25</sub>	11,0	8,8	9,1	9,2
	Q <sub>50</sub>	12,4	10,3	10,2	11,8
	Q <sub>75</sub>	13,8	12,0	11,4	14,2
Doppelschicht	Q <sub>25</sub>	9,0	9,9	9,6	8,3
	Q <sub>50</sub>	10,1	10,8	10,6	9,7
	Q <sub>75</sub>	11,2	11,7	11,5	11,1
Gesamt	Q <sub>25</sub>	8,6	9,0	9,6	8,1
	Q <sub>50</sub>	10,0	10,4	10,6	9,7
	Q <sub>75</sub>	11,5	11,6	11,8	11,5

Tabelle B-3: Anzahl der Taxifahrten je Taxischicht (nach Betriebsarten und Wochentagen)

Quantile der Anzahl der Taxifahrten		Montag bis Donnerstag (in p.u.)	Freitag (in p.u.)	Samstag (in p.u.)	Sonntag (in p.u.)
<b>Tagesschicht</b>	Q <sub>25</sub>	7	7	13	7
	Q <sub>50</sub>	9	9	16	9
	Q <sub>75</sub>	11	12	18	11
<b>Nachtschicht</b>	Q <sub>25</sub>	11	9	9	10
	Q <sub>50</sub>	14	12	12	13
	Q <sub>75</sub>	16	14	14	16
<b>Doppelschicht</b>	Q <sub>25</sub>	9	10	10	9
	Q <sub>50</sub>	11	12	12	11
	Q <sub>75</sub>	13	14	14	13
<b>Gesamt</b>	Q <sub>25</sub>	9	9	10	9
	Q <sub>50</sub>	11	11	12	11
	Q <sub>75</sub>	13	14	14	14

Tabelle B-4: Kilometerleistungen je Nutzungstag (nach Betriebsarten und Wochentagen)

Quantile der Kilometerleistungen		Montag bis Donnerstag (in km)	Freitag (in km)	Samstag (in km)	Sonntag (in km)
<b>Tagesschicht</b>	Q <sub>25</sub>	93	91	164	86
	Q <sub>50</sub>	118	121	193	109
	Q <sub>75</sub>	147	154	223	135
<b>Nachtschicht</b>	Q <sub>25</sub>	142	122	127	121
	Q <sub>50</sub>	169	150	153	160
	Q <sub>75</sub>	199	181	181	202
<b>Doppelschicht</b>	Q <sub>25</sub>	238	276	270	223
	Q <sub>50</sub>	274	309	304	265
	Q <sub>75</sub>	313	345	340	309
<b>Gesamt</b>	Q <sub>25</sub>	124	122	156	125
	Q <sub>50</sub>	179	172	219	193
	Q <sub>75</sub>	259	283	300	264

Tabelle B-5: Prozentualer Anteil der durchführbaren Taxifahrten in Abhängigkeit der Szenarien

Szenarien	Anteil der durchführbaren Taxifahrten in %			
	Gesamt	Tagesschicht	Nachtschicht	Doppelschicht
<b>Option 80 / 100 kW</b>	96,7	99,9	99,8	94,4
<b>Option 80 / 2 EVSE</b>	95,7	99,9	99,7	92,7
<b>Basic 80</b>	95,6	99,9	99,7	92,5
<b>Option 40 / 100 kW</b>	91,2	95,7	92,9	88,9
<b>Option 40 / 2 EVSE</b>	89,7	95	91,8	87
<b>Basic 40</b>	89	94,6	91,2	86,1
<b>Public 80</b>	88,9	89,2	88,8	88,8
<b>Public 40</b>	82,7	82,8	82,4	82,8

Tabelle B-6: Nutzungsgrad der öffentlichen Ladestationen je Szenario (2.500 E-Taxis)

Szenarien	Nutzungsgrad der öffentlichen Ladepunkte in %				
	Maximum	0,75-Quantil	Median	0,25-Quantil	Minimum
<b>Option 80 / 100 kW</b>	61	54	49	39	22
<b>Option 80 / 2 EVSE</b>	65	58	49	39	21
<b>Basic 80</b>	69	60	50	42	10
<b>Option 40 / 100 kW</b>	73	66	62	53	29
<b>Option 40 / 2 EVSE</b>	75	69	61	52	28
<b>Basic 40</b>	83	75	63	47	6
<b>Public 80</b>	94	88	75	57	7
<b>Public 40</b>	93	88	74	55	7

Tabelle B-7: Nutzungsgrad der öffentlichen Ladestationen je Szenario (4.500 E-Taxis)

Szenarien	Nutzungsgrad der öffentlichen Ladepunkte in %				
	Maximum	0,75-Quantil	Median	0,25-Quantil	Minimum
<b>Option 80 / 100 kW</b>	69	60	50	42	9
<b>Option 80 / 2 EVSE</b>	70	60	53	44	24
<b>Basic 80</b>	82	67	49	31	4
<b>Option 40 / 100 kW</b>	84	76	64	47	6
<b>Option 40 / 2 EVSE</b>	82	74	65	44	13
<b>Basic 40</b>	92	79	57	29	1
<b>Public 80</b>	98	94	75	36	4
<b>Public 40</b>	98	94	70	30	2

Tabelle B-8: Anzahl der täglichen Ladevorgänge an öffentlichen Ladepunkten (LP) für eine Durchdringung von 2.500 E-Taxis

Szenarien	Anzahl der öffentlichen Ladevorgänge je LP und Tag				
	Maximum	0,75-Quantil	Median	0,25-Quantil	Minimum
<b>Option 80 / 100 kW</b>	30	27	24	19	11
<b>Option 80 / 2 EVSE</b>	17	15	13	10	5
<b>Basic 80</b>	18	16	13	11	2
<b>Option 40 / 100 kW</b>	76	69	64	54	30
<b>Option 40 / 2 EVSE</b>	43	39	35	30	16
<b>Basic 40</b>	48	43	36	26	3
<b>Public 80</b>	24	23	19	15	2
<b>Public 40</b>	52	49	41	31	4

Tabelle B-9: Anzahl der täglichen Ladevorgänge an öffentlichen Ladepunkten (LP) für eine Durchdringung von 4.500 E-Taxis

Szenarien	Anzahl der öffentlichen Ladevorgänge je LP und Tag				
	Maximum	0,75-Quantil	Median	0,25-Quantil	Minimum
<b>Option 80 / 100 kW</b>	34	29	24	20	4
<b>Option 80 / 2 EVSE</b>	18	16	14	11	6
<b>Basic 80</b>	21	17	13	8	1
<b>Option 40 / 100 kW</b>	88	79	66	48	6
<b>Option 40 / 2 EVSE</b>	47	42	37	25	7
<b>Basic 40</b>	53	45	32	16	1
<b>Public 80</b>	25	24	19	9	1
<b>Public 40</b>	55	52	38	16	1

Tabelle B-10: Gesamte Stickoxidemissionen in g NO<sub>x</sub> pro Fahrzeugkilometer verschiedener Antriebsarten und Stromerzeugungen.

Szenarien	NO <sub>x</sub> -Emissionen in g/Fkm		
	Diesel-Taxi	E-Taxi (Ö-Strommix)	E-Taxi (regenerativ)
<b>Fahrbetrieb</b> (direkte Emissionen)	0,228	-	-
<b>Fahrzeugherstellung</b> (indirekte Emissionen)	0,033	0,032	0,032
<b>Batterieherstellung</b> (indirekte Emissionen)	-	0,060	0,060
<b>Energiebereitstellung</b> (indirekte Emissionen)	0,074	0,124	0,027
<b>Gesamt</b>	<b>0,335</b>	<b>0,216</b>	<b>0,119</b>

Tabelle B-11: Gesamte Partikel-Emissionen in g PM pro Fahrzeugkilometer verschiedener Antriebsarten und Stromerzeugungen.

Szenarien	PM-Emissionen in g/Fkm		
	Diesel-Taxi	E-Taxi (Ö-Strommix)	E-Taxi (regenerativ)
<b>Fahrbetrieb</b> (direkte Emissionen)	0,003	-	-
<b>Fahrzeugherstellung</b> (indirekte Emissionen)	0,013	0,015	0,015
<b>Batterieherstellung</b> (indirekte Emissionen)	-	0,011	0,011
<b>Energiebereitstellung</b> (indirekte Emissionen)	0,007	0,008	0,004
<b>Gesamt</b>	<b>0,023</b>	<b>0,034</b>	<b>0,030</b>

Tabelle B-12: Kumulierter Energieaufwand in kWh pro Fahrzeugkilometer verschiedener Antriebsarten und Stromerzeugungen.

Szenarien	Kumulierter Energieaufwand in kWh/Fkm		
	Diesel-Taxi	E-Taxi (Ö-Strommix)	E-Taxi (regenerativ)
<b>Fahrbetrieb</b> (direkte Emissionen)	0,69	0,27 <sup>*)</sup>	0,27 <sup>*)</sup>
<b>Fahrzeugherstellung</b> (indirekte Emissionen)	0,05	0,05	0,05
<b>Batterieherstellung</b> (indirekte Emissionen)	-	0,05	0,05
<b>Energiebereitstellung</b> (indirekte Emissionen)	0,08	0,23	0,04
<b>Gesamt</b>	<b>0,82</b>	<b>0,6</b>	<b>0,41</b>

<sup>\*)</sup> Dieser Wert beinhaltet ebenfalls einen zusätzlichen Energieaufwand von durchschnittlich 0,02 kWh/km für u. a. die Klimatisierung des Fahrgastraumes während der Standzeit am TSP.

## Anhang C „Ergänzende Beschreibungen“

### Taxitarife

Laut Gelegenheitsverkehrs-Gesetz kann der Landeshauptmann auf Anregung der zuständigen Fachgruppe oder von Amts wegen, unter Berücksichtigung der bestehenden Verhältnisse, für das Taxigewerbe verbindliche Tarife festlegen. Die Tarife sind durch Verordnung zu bestimmen und können für das gesamte Bundesland, für einzelne Verwaltungsbezirke oder für einzelne Gemeinden festgelegt werden.

In Wien sind die – durch den Landeshauptmann – verordneten Tarife des Taxigewerbes für das gesamte Bundesland verbindlich. In einem mehrjährigen Abstand werden die Tarifsätze an die Inflation angepasst und neu verordnet [44]. Die aktuellen, ab den 01.12.2012 in Wien gültigen, Tarife sind in Tabelle C-1 ersichtlich [95].

Die angegebenen Tarife finden zwar in den durchgeführten Berechnungen der vorliegenden Arbeit keine Berücksichtigung, stellen aber im Hinblick auf die gegebenen Rahmenbedingungen einen wesentlichen Aspekt dar und sind deshalb ergänzend angeführt. Die Tarife gelten auf alle Fälle unabhängig von Fahrzeugtyp oder der verwendeten Antriebstechnologie und somit ebenfalls für rein elektrisch angetriebene Taxis. Mögliche Bevorzugungen oder Benachteiligungen können daher über die Tarifgestaltung nicht realisiert werden.

Sondervereinbarungen (Pauschalen) können im Tarif nur für „Beförderungen aus besonderen Anlässen“ festgelegt werden. In Wien gelten z. B. für Botenfahrten solche Pauschalen, welche über entsprechende Tarifzonen ermittelt werden.<sup>190</sup>

---

<sup>190</sup> Nähere Infos z. B. unter <http://www.taxi31300.at> und <http://www.taxi40100.at>

Tabelle C-1: Wiener Taxitarife (gültig ab 01.12.2012)

<b>Tagtarif (werktags von 6-23 Uhr)</b>			
<b>Grundtaxe</b>	€ 3,80	Anfangsstrecke bis 859,2 m	4,42 € / km
<b>Strecke bis 4 km</b>	€ 0,20	für begonnene 140,7 m	1,42 € / km
<b>Strecke ab 4 km</b>	€ 0,20	für begonnene 184,6 m	1,08 € / km
<b>Strecke ab 9 km</b>	€ 0,20	für begonnene 190,6 m	1,05 € / km
<b>Wartezeit (Zeittaxe)</b>	€ 0,20	für begonnene 25,9 sec	27,80 € / Std

<b>Nachttarif (werktags von 23-6 Uhr) Sonn- und Feiertagstarif (von 0-24 Uhr)</b>			
<b>Grundtaxe</b>	€ 4,30	Anfangsstrecke bis 1000 m	4,30 € / km
<b>Strecke bis 4 km</b>	€ 0,20	für begonnene 123,2 m	1,62 € / km
<b>Strecke ab 4 km</b>	€ 0,20	für begonnene 156,8 m	1,28 € / km
<b>Strecke ab 9 km</b>	€ 0,20	für begonnene 169,5 m	1,18 € / km
<b>Wartezeit (Zeittaxe)</b>	€ 0,20	für begonnene 25,9 sec	27,80 € / Std

<b>Diverse Zuschläge</b>	
<b>Für Bestellungen über Standplatztelefon</b>	€ 1,40
<b>Für Bestellungen über Funk</b>	€ 2,80
<b>Für die Beförderung von mehr als vier Personen</b>	€ 2,00

Ein aktuelles Thema, welches – zwar nicht exklusiv, aber im Besonderen – das Taxigewerbe betrifft, ist die Registrierkassen- und Belegerteilungspflicht (beide ab dem ersten Oktober 2016) und soll an dieser Stelle kurz Erwähnung finden. Dabei wird unter „Registrierkasse“ allgemein jedes elektronische Datenverarbeitungssystem verstanden,

das elektronische Aufzeichnungen zur Losungsermittlung und Dokumentation von Barumsätzen<sup>191</sup> erstellt (z. B. Registrierkassen, serverbasierte Aufzeichnungssysteme, Waagen, Taxameter, etc.). Aufzeichnungspflichten bestehen für alle Bareinnahmen zum Zweck der Losungsermittlung nur, wenn der Jahresumsatz je Betrieb netto € 15.000,- und die Barumsätze dieses Betriebes netto € 7.500,- im Jahr überschreiten. Die Belegerteilungsverpflichtung gilt jedoch für jeden/jede UnternehmerIn ab dem ersten Barumsatz (egal ob Kassenpflicht besteht oder nicht). Darüber hinaus muss der ausgehändigte Beleg vom Kunden/von der Kundin zwecks Kontrolle durch die Finanzverwaltung mitgenommen werden. [51]

## Gamma-Verteilung

Im Zusammenhang mit der Approximation der Merkmale „Standdauer“, „Fahrdauer“, „Distanz“ und „Energiebedarf“ weist die Gamma-Verteilung neben der Log-Logistischen Verteilung, der logarithmischen Normalverteilung sowie die Burr-Verteilungen ebenfalls relativ kleine MSE-Werte auf (siehe Kapitel 4.4). Zur Ergänzung wird deshalb die Gamma-Verteilung an dieser Stelle kurz beschreiben:

Wie die Weibull-, ist die Gamma-Verteilung eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung über der Menge der positiven reellen Zahlen. Sie besitzt die reellen Parameter  $a > 0$  (Formparameter) und  $b > 0$  (Skalenparameter). Auch hier lassen sich alternative Schreibweisen für die beiden Parameter finden:  $(\alpha = a, \beta = 1/b)$ ,  $(k = a, \theta = b)$  oder  $(p = a, b = 1/b)$ . Die Gamma-Verteilung ist u. a. eine direkte Verallgemeinerung der Exponentialverteilung und geht für  $a = 1$  in diese über. Eine weitere Eigenschaft, welche sie mit der Weibull-Verteilung gemeinsam hat. Deshalb ist es auch nicht verwunderlich, dass beide in ähnlichen Anwendungsfällen zum Einsatz kommen. Die Gamma-Verteilung wird z. B. zur Beschreibung von Bedienungszeiten oder Reparaturzeiten sowie in der Versicherungsmathematik zur Modellierung von kleineren bis mittleren Schäden herangezogen.

---

<sup>191</sup> Der Begriff „Barumsätze“ umfasst auch die Zahlung mit Bankomat- oder Kreditkarte vor Ort, die Hingabe von Barschecks oder ausgegebenen Gutscheinen, Bons, etc. Nicht als Barumsatz gelten Zahlungen mit Verrechnungsscheck oder Orderschecks, Online-Banking Überweisungen, PayPal und Einziehungsaufträge. [51]

Die zugehörige Dichtefunktion der Gamma-Verteilung lautet:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b^a \Gamma(a)} x^{a-1} e^{-\frac{x}{b}} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (\text{C.1})$$

Dabei repräsentiert  $\Gamma(z)$  die Gammafunktion, nach der die Verteilung benannt ist:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt, \quad z > 0 \quad (\text{C.2})$$

Die Gamma-Verteilung genügt der Verteilungsfunktion:

$$F(x) = \begin{cases} \frac{\int_0^x t^{a-1} e^{-t} dt}{\Gamma(a)} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (\text{C.3})$$

*„In dieser Welt hat alles,  
was einen Anfang genommen hat,  
auch sein Ende.“*

Zitat von **Jules Verne** in Zwanzigtausend Meilen unter'm Meer (Buchzitat)