



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Synthetische Modellierung und Ladeprofilbildung einer elektrischen Taxi-Flotte

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades des
Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang GAWLIK

und

Dipl.-Ing. Markus LITZLBAUER

Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe

eingereicht an der

Technischen Universität Wien

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

von

Robert STRASSER, Bakk.

0425841

Braunhubergasse 26/1/13, 1110 Wien

Wien, 4. November 2013

Kurzfassung

Batteriebetriebene Elektroautos entwickeln sich zunehmend zu einer konkurrenzfähigen Alternative zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren.

Vor allem in Städten wird ein Teil des motorisierten Individualverkehrs von Taxis gedeckt. Durch das Vorhandensein von kurzen Wegstrecken, die durch Pausen unterbrochen sind, besteht gerade bei dieser Mobilitätsform ein großes Potential, auf dieses umweltschonende Antriebskonzept umzusteigen und somit einen wichtigen Beitrag zur Senkung des CO₂ Ausstoßes zu leisten. Der Übergang von konventionellen Taxis auf batteriebetriebene Taxis ist mit einem Infrastrukturausbau und hohen Kosten verbunden. Durch Analyse des Fahrverhaltens dieses Verkehrsegmentes können Empfehlungen abgegeben werden, wie der Umstieg auf Elektrofahrzeuge und der Ausbau von Ladestationen effizient erfolgen können und in welchem Ausmaß dies möglich ist.

Anhand eines vorhandenen, anonymisierten GPS-Datensatzes einer Taxiflotte und mit Hilfe der stochastischen Verteilungen der Fahrparameter ist ein Modell entwickelt worden, das das Fahrverhalten einzelner Fahrzeuge einer Fahrzeugflotte simuliert und durchgängige fahrzeugbezogene Mobilitätsdaten generiert. Aufbauend auf dieser Datengrundlage wird der Umstieg auf Elektrotaxis vollzogen, indem Taxistandplätze mit Ladestationen ausgestattet und die Ladezustände der Batterien berechnet werden. Variationen der einzelnen Ladeparameter, der Ausbaugrad der Ladeinfrastruktur und die Größe der Kapazität der Batterien zeigen die Auswirkungen auf die Erfüllbarkeit der Mobilität auf. In drei ausgewählten Szenarien wird detailliert auf Ladeprofile, Auslastung der Standplätze und fehlende Energiebeträge bei zu geringen Reichweiten eingegangen.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt auf, dass ein Umstieg auf Elektrotaxis möglich ist. Ein gewisser Teil der Taxifahrten kann mit einem Minimalausbau der Ladeinfrastruktur und kleineren Batteriekapazitäten erfolgreich absolviert werden. Eine vollständige Substitution herkömmlicher Taxis ohne Anpassung des Fahrverhaltens ist allerdings nicht durchführbar.

Abstract

Battery-powered electric vehicles are becoming a competitive alternative to cars with combustion engines.

In urban areas a significant part of the individual transport is done by taxis. Due to short distances interrupted by breaks especially this kind of mobility offers a big potential of reducing carbon dioxide emissions by changing to this environmentally friendly drive concept. The changeover from conventional taxis to electric taxis is cost intensive and moreover connected to an adaptation of the existing taxi ranks. By analysing the driving characteristics of this transport field, suggestions for the integration of electric vehicles in a taxi fleet and efficient provision of taxi ranks with charging stations can be given.

By using stochastic distributions of the driving parameters of an existing and anonymized GPS-dataset of a taxi fleet a model for simulating the driving behaviour of taxis has been developed. Continuous assignable mobility data can be generated this way. On basis of this new data set the transition to electric vehicles is done by equipping the taxi ranks with charging stations and calculating the states of charge of the batteries. For assessing the extent of mobility which can be achieved by electric taxis, the impacts of variations of the charging parameters, the degree of the extension of charging stations and the size of the battery capacity are examined. Three selected scenarios take a closer look to load profiles, the load factors of the taxi ranks and missing energy amounts due to insufficient ranges.

The main findings of this research demonstrate the possibility of changing to electric taxis. A certain amount of trips can be accomplished by providing a minimal extension of the charging infrastructure and small battery capacities. The complete substitution of conventional taxis without an adaptation of the driving behaviour cannot be achieved.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Gliederung der Arbeit	4
2	Ausgangssituation	5
3	Modellierung	10
3.1	Modellansatz	11
3.2	Funktionsweise des Modells	13
3.2.1	Zufallsgenerator	15
3.2.2	Trip-Suche	17
3.2.3	Hauptprogramm	20
3.2.4	Berechnung des State of Charge und Laden der Batterien	25
3.3	Validierung des Modells	32
3.3.1	Analyse des Fahrverhaltens der Taxis	37
4	Analyse der Mobilitätsdaten - Umstieg auf Elektroautos	40
4.1	Parametervariationen	41
4.1.1	Variation der Batteriekapazität	42
4.1.2	Variation der Anzahl der Taxistandplätze mit Ladestationen	44
4.1.3	Variation der maximalen Ladeleistung an den Taxistandplätzen	48
4.1.4	Variation der maximalen Ladeleistung in der inaktiven Phase	50
4.2	Szenarien	53
4.2.1	Szenario 1 - Minimalausbau	53
4.2.2	Szenario 2 - Erweiterter Ausbau	58
4.2.3	Szenario 3 - Ladezeitverlängerung	63
4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen	68
5	Zusammenfassung	73
	Literaturverzeichnis	76
	Abbildungsverzeichnis	77

1 Einleitung

Die Mobilität hat sich zu einer der wichtigsten Bedürfnisse der heutigen Gesellschaft entwickelt. Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts wurde sie vom Großteil der Bevölkerung noch durch Nutztiere und Fußmärsche erfüllt. Mit der Entwicklung von Verbrennungsmotoren, die durch fossile Brennstoffe angetrieben werden, begann schließlich eine neue Ära in der Fortbewegung. Durch den immer billiger werdenden Benzin, startete in den 1920er Jahren dann schließlich der Siegeszug dieser Fahrzeuge, der – bis heute – ungebremst anhält. Erst mit steigendem Umweltbewusstsein, aber auch durch den erheblichen Anstieg des Erdölpreises wird verstärkt nach Alternativen gesucht und vorhandene Antriebskonzepte, wie den Elektromotorantrieb, neu aufgegriffen. Die ersten Elektroautos wurden schon Ende des 19. Jahrhunderts gebaut, konnten sich aber durch die begrenzte Energiespeicherung und den damit verbundenen geringen Reichweiten gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren nicht durchsetzen. Erst durch die Entwicklung neuer Batterietechnologien und Verbesserung der Antriebe wurde es möglich, dass batteriebetriebene Elektrofahrzeuge eine ernstzunehmende Konkurrenz geworden sind.

1.1 Motivation

Die Stabilisierung des Klimawandels und die Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen sind sicher die größten Herausforderungen der Menschheit – bis heute.

Um dies zu erreichen, ist es ein großes Ziel, die Verbrennung von fossilen Rohstoffen und die damit verbundene Freisetzung von CO_2 zu reduzieren. Durch den hohen Anteil des Verkehrssektors an den Treibhausgasemissionen von 27 % [1] ist es von großer Bedeutung, diesen Bereich zu optimieren und die Emissionen drastisch zu senken. Wenn möglich, sollte dies jedoch nicht auf Kosten von Komfort und Lebensqualität, wofür Mobilität in unserer Gesellschaft steht, erreicht werden. Es muss also die Mobilität

umweltfreundlicher werden und sich von Grund auf ändern. Eine Möglichkeit besteht darin, Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren durch batteriebetriebene Elektrofahrzeuge zu ersetzen. Die größere Effizienz in der Energieumwandlung und bei den Motoren und der Wegfall der lokalen Emissionen zählen zu den entscheidenden Vorteilen. Außerdem machen ein Verringerung des Lärmpegels und geringe laufende Wartungskosten diese Art der Mobilität sehr attraktiv. Elektroautos sind jedoch nur dann sinnvoll, wenn der benötigte Strom regenerativ erzeugt werden kann. Ist dies nicht der Fall, werden die Treibhausgasemissionen zwar durch die zentrale Stromproduktion etwas reduziert, das Problem wird jedoch nur örtlich verlagert. Auch wenn momentan durch Forschung und Entwicklung laufend die Reichweiten und Batteriekapazitäten erhöht werden können, der große Durchbruch der Elektromobilität wurde aufgrund der hohen Anschaffungskosten und dem Nichtvorhandensein von flächendeckender Ladeinfrastruktur noch nicht erzielt.

Im urbanen Raum besteht der große Vorteil, dass ein Teil der Mobilität durch öffentliche Verkehrsmittel abgedeckt werden kann. Bei großflächigem Ausbau und gutem Angebot stellt diese Art der Fortbewegung die umweltfreundlichste Form dar, abgesehen vom Zufußgehen oder Fahrradfahren. Dennoch bleibt der Bedarf nach öffentlicher individueller Fortbewegung bestehen und wird zum aktuellen Zeitpunkt sowie auch zukünftig von Taxis erfüllt werden. Dadurch, dass Taxis eine sehr hohe Kilometerleistung vorweisen und meist auch Taxistandplätze, die für Lademöglichkeiten benutzt werden können, flächendeckend vorhanden sind, macht hier der Umstieg von konventionellen Fahrzeugen auf batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEV) Sinn. Außerdem können die hohen Investitionskosten vom Fahrzeugbesitzer durch die gewerbliche Nutzung und die hohen Betriebsstunden leichter getragen werden, als von privaten Personen.

Die zentralen Fragen, die sich nun stellen sind:

- *Können Taxis, die bisher mit fossilem Treibstoff ihre Fahrten absolviert haben, durch batteriebetriebene Elektrofahrzeuge ersetzt werden?*
- *Ist dies zu 100 % möglich oder muss mit Einschränkungen gerechnet werden?*
- *Sind die notwendigen Einschränkungen vertretbar?*
- *Mit welchen Mitteln können diese Einschränkungen verringert werden?*

Diese Arbeit beschäftigt sich damit, diese Fragen bestmöglich zu beantworten.

1.2 Zielsetzung

Sollen konventionelle Fahrzeuge durch batteriebetriebene Elektrofahrzeuge ersetzt werden, muss sichergestellt sein, dass sich keine Einschränkungen hinsichtlich der Mobilität ergeben. Ein Elektrotaxi sollte also bei vollständiger Substitution dieselben Fahrtwege und -distanzen absolvieren, wie ein Taxi mit Verbrennungsmotor, wobei jedoch die Akkukapazität begrenzend wirkt.

Um diesen Umstieg analysieren und bewerten zu können, werden als Grundlage Mobilitätsdaten benötigt, um zu wissen, welche Distanzen ein Taxi in einem bestimmten Zeitraum zurücklegt, wie oft Taxistandplätze angefahren werden und wie lange die Wartezeiten an den Taxistandplätzen zwischen den einzelnen Fahrten sind.

Im Zuge des Forschungsprojektes ZENEM¹ wurden vorhandene GPS-Daten der Fahrzeugflotte des Taxivermittlungsunternehmens 31300 durch das Austrian Institute of Technology (AIT) so aufbereitet, dass eine Datengrundlage für das Fahrverhalten einer Taxiflotte über das Jahr 2011 zur Verfügung steht. Eine große Einschränkung dieses Datensatzes besteht jedoch darin, dass lediglich Fahrten bzw. Fahrtblöcke einzelner Taxis wiedergegeben werden. Die eindeutige Zuordnung der Fahrten zu bestimmten Fahrzeugen ist nicht gegeben.

Somit ergibt sich folgende Zieldefinition:

Aus dem vorhandenen Datensatz auf Basis der stochastischen Verteilungen der Fahrteigenschaften (Distanz, Dauer, Taxistandplätze) sollen durchgängige und einzelnen Fahrzeugen zuweisbare Mobilitätsdaten durch Modellierung von Taxis bzw. einer Taxiflotte generieren werden. Aufbauend auf die Analyse des Fahrverhaltens der Fahrzeuge wird der Umstieg auf batteriebetriebene Elektroautos vollzogen. Ladeprofile sollen generiert und eine Analyse der Erfüllbarkeit der Mobilitätsbedürfnisse durchgeführt werden.

¹Zukünftige Energienetze mit Elektromobilität, für nähere Informationen siehe [2]

1.3 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist, abgesehen von der Einleitung, in drei wesentliche Abschnitte unterteilt.

In Kapitel 2 wird die Ausgangssituation beschrieben. Hier wird der vorhandene Datensatz analysiert und darauf eingegangen, wie dieser für das Modell aufbereitet wird.

Anschließend zeigt Kapitel 3 den Modellierungsvorgang detailliert auf. Es wird der Modellansatz veranschaulicht, darauf eingegangen, welche Einschränkungen und Annahmen für das Modell getroffen werden und wie die Umsetzung in MATLAB erfolgt. Die Berechnung des State of Charge (SOC), mit dem der Übergang von einem allgemeinem Modell für eine Taxiflotte auf eine Elektrotaxiflotte vollzogen wird, vervollständigt schließlich das Modell. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Validierung des Modells, um die Leistungsfähigkeit und Qualität des Modells zu ermitteln.

Das letzte Kapitel dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Analyse der neu generierten Mobilitätsdaten. Es wird untersucht, in welchem Ausmaß die Mobilität der einzelnen Fahrzeuge erfüllt werden kann und welche Parameter diese beeinflussen. Weiters wird auf mögliche Szenarien für eine elektrifizierte Taxiflotte eingegangen und darauf welche Voraussetzungen hier seitens der Infrastruktur erfüllt werden müssen. Abschließend zeigt eine ausführliche Beschreibung der Schlussfolgerungen der Analyse die gewonnenen Erkenntnisse auf.

2 Ausgangssituation

Bevor mit der Modellierung begonnen werden kann, muss der vorhandene Datensatz analysiert und für das Modell aufbereitet werden. Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über den Aufbau der Daten und es werden die einzelnen Fahrtparameter untersucht.

Als Grundlage dieser Arbeit dient ein von dem Wiener Taxiunternehmen 31300 zur Verfügung gestellter anonymisierter Datensatz aus dem Jahr 2011. Die gesamte Fahrzeugflotte des Unternehmens ist mit GPS-Sendern ausgestattet, wobei diese Positionsermittlung lediglich auf die Vermittlung der Fahrzeuge ausgelegt ist. Es werden somit keine Fahrtwege, sondern einzelne Wegpunkte aufgezeichnet, mithilfe denen eine rasche und effektive Vermittlung stattfinden kann. Ein großer Vorteil der GPS-Daten gegenüber statistischen Verkehrsdaten liegt in der Genauigkeit und der Realitätsnähe, wodurch eine gute Basis für eine Modellierung gegeben ist.

Im Rahmen des Forschungsprojektes ZENEM wurden diese Positionsdaten vom AIT durch MapMatching, Routing Filteralgorithmen und Aggregierungsfunktionen so aufbereitet¹, dass die einzelnen Wegpunkte verbunden und somit ein Datensatz generiert wurde, der einzelne Fahrten oder Fahrtblöcke von Taxis enthält. Diese Fahrten haben ihren Beginn und ihr Ende an einem der über 250 Taxistandplätze in Wien und liefern folgende zusätzlich relevante Informationen:

- ID des Taxis
- Startzeitpunkt der Fahrt
- Endzeitpunkt der Fahrt
- Nummer des Standortes bei Beginn der Fahrt
- Nummer des Standortes beim Ende der Fahrt
- Distanz der Fahrt

¹für mehr Information siehe [2]

- Energieverbrauch
- Wartezeit bis zur nächsten Fahrt
- Qualitätsfaktor der Fahrt

Sobald sich der Fahrer eines Taxis am System anmeldet, wird dem Taxi eine ID zugeteilt, die es bis zum Abmeldezeitpunkt am System beibehält. Macht nun der Fahrzeuglenker eine kurze Pause oder meldet sich aus einem anderen Grund vom System ab, so wird dem Fahrzeug bei erneuter Anmeldung auch eine neue ID zugewiesen. Das Taxi kann also nur solange verfolgt werden, solange sein Fahrer am System angemeldet ist, wodurch sich systembedingt keine durchgängigen Mobilitätsdaten einzelner Fahrzeuge ergeben. Der Großteil des Datensatzes besteht somit nicht aus einzelnen Fahrten, sondern aus Fahrtblöcken, die von einem Taxilenker getätigt wurden. Hierbei handelt es sich um mehrere Fahrten, die hintereinander ohne Abmeldung vom Vermittlungssystem durchgeführt wurden. Dieser Umstand soll bei der Modellierung berücksichtigt werden.

In der vorliegenden Arbeit wird – zwecks Einfachheit – das Taxi als ausführendes Subjekt gehandelt. Wenn von einem Taxi, das sich am System anmeldet, geschrieben wird, führen natürlich die Anmeldung die Taxilenker selbst durch. Da jedoch das Fahrzeug von größerem Interesse ist und das Modell keine Interaktion von den Fahrern berücksichtigt, vereinfacht sich die Formulierung und die Lesbarkeit.

Im ersten Schritt wurde der vorhandene Datensatz analysiert und für die Modellierung vorbereitet. Da die Fahrten der Taxis, wie weiter oben schon erwähnt, durch einen automatisierten Rekonstruktionsprozess gebildet wurden, war davon auszugehen, dass durch Ungenauigkeiten oder Unregelmäßigkeiten in der Positionserfassung der Fahrzeuge einige Einträge fehlerhaft sein könnten. Um etwaige Ausreißer oder sonstige Auffälligkeiten zu entdecken, wurden sämtliche Parameter der einzelnen Fahrten einer Plausibilitätsüberprüfung unterzogen. Dadurch konnten Einträge des Datensatzes (0,7%) gefunden und entfernt werden, bei denen einige Merkmale grobe Abweichungen gegenüber dem Durchschnitt aufwiesen.

Im Zuge der Aufbereitung des Datensatzes wurde durch das AIT ein Qualitätsfaktor eingeführt, der die Zuverlässigkeit der Rekonstruktion der Fahrten widerspiegelt. Abbildung 2.1 zeigt die kumulierte Häufigkeitsverteilung des Qualitätsfaktors. Es gibt nur einen geringen Anteil an Dateneinträgen (ca. 10%), bei denen der Faktor kleiner als 60% ist, wobei Werte unter 10% am stärksten vertreten sind. Da der Großteil der Daten somit einen hohen Qualitätsfaktor aufweist und der gesamte Datenpool ca. 1,8

Millionen einzelne Fahrten umfasst, konnten ohne Bedenken alle Fahrten mit einem Qualitätsfaktor unter 60 % gelöscht werden.

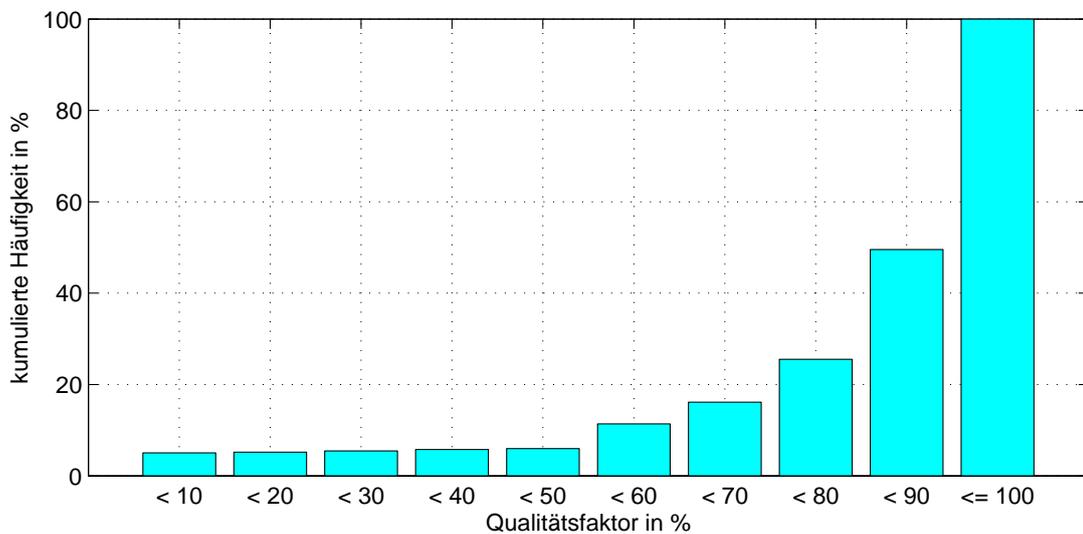


Abbildung 2.1: kumulierte Häufigkeitsverteilung des Qualitätsfaktors, basierend auf den Daten von [2]

Der so überarbeitete Datensatz wurde anschließend ausführlich analysiert und die relevanten Parameter beziehungsweise Merkmale in Bezug auf die Modellierung untersucht. Zu Beginn wurde die Anzahl der am System angemeldeten Taxis über eine Woche extrahiert und der Verlauf grafisch dargestellt (siehe Abbildung 2.2). Hierfür wurde die Kalenderwoche 21 des Jahres 2011 als Beispiel gewählt. Es hat sich gezeigt, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Wochen des Jahres nicht sonderlich groß sind und die Verläufe nur geringe Abweichungen von einander aufweisen. Feiertage, die auf einen Werktag fallen, bilden die Ausnahme, wobei der Verlauf mit dem eines Sonntages verglichen werden kann. Bei den Wochentagen ergeben sich vor allem am Wochenende unterschiedliche zeitliche Verläufe der Tagesganglinien. An den Tagen Montag bis Donnerstag wird das Tagesmaximum gegen 12 Uhr Mittag erreicht, was auf das Überbrücken der lukrativen Vormittags- und Abendgeschäfte der Fahrer zurückzuführen sind. Außerdem beginnen bis Mittag meist jene Fahrer wieder eine neue Schicht, die in den Nachtstunden unterwegs waren. Zwischen 17 und 20 Uhr gibt es einen erneuten Anstieg der angemeldeten Taxis, da in diesem Zeitraum viele Stadtbewohner den Nachhauseweg von der Arbeit antreten. Das Minimum wird in den darauffolgenden Morgenstunden gegen 4 Uhr erreicht. Gesondert zu behandeln ist der Freitag, an dem die abendliche Spitze ausgeprägter ist und ein erneutes Maximum um Mitternacht erreicht wird, das sich durch den Wochenendbeginn erklären lässt. Das Samstagsgeschäft besteht größtenteils aus Fahrten am Abend und in den Nachtstunden, wodurch sich das Tagesmaximum gegen

Mitternacht ergibt. Am Sonntag ist generell von wenigen angemeldeten Fahrzeugen auszugehen, da er jener Tag der Woche ist, an dem die geringste Anzahl an Taxis erreicht wird.

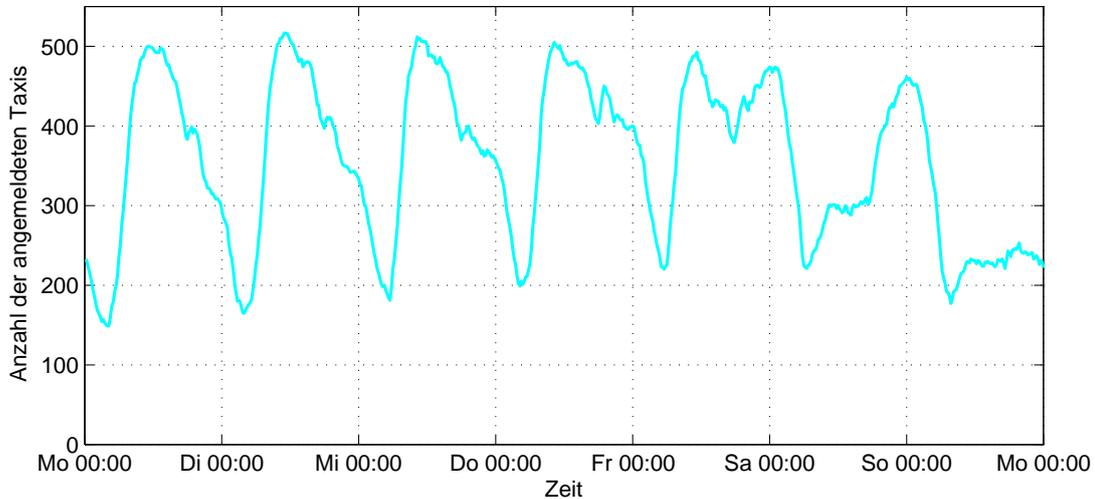


Abbildung 2.2: Verlauf der Anzahl der angemeldeten Taxis der KW 21 des Jahres 2011, basierend auf den Daten von [2]

Ein für die Modellierung sehr wichtiger Parameter einer Taxifahrt ist die Wartezeit an den Taxistandplätzen. Sie gibt jene Zeitdauer an, die ein Taxi am Standplatz verbringt, bis die nächste Fahrt beginnt und somit für eine Ladung der Batterien verwendet werden kann. Der Median des bereinigten Datenpools liegt bei 8,7 Minuten, wobei das 0,25-Quantil bei 1,35 Minuten und das 0,75-Quantil bei 21,15 Minuten liegt. Abbildung 2.3 zeigt die relative Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten. Bei 38 % aller Fahrten beträgt die Verweildauer am Standplatz weniger als 5 Minuten, wodurch eine Ladung der Batterien in der Realität nicht möglich sein wird. Diese Annahme wird vor allem gestützt durch den Umstand, dass der Ladevorgang nicht unmittelbar nach Ankunft am Standplatz beginnen kann, da der Ladestecker eingesteckt und der Ladevorgang initialisiert werden muss. Für den Rest der Taxifahrten stehen zumindest einige Minuten für Ladezwecke zur Verfügung. Bei fast 15 % der Fahrten beträgt die Zeitdauer mehr als 30 Minuten, wodurch die Batterien mit Schnellladung signifikant geladen werden können.

Der Energieverbrauch pro Taxifahrt wurde durch die Modellierung eines Elektrotaxis vom AIT [2] berechnet und Fahrzeugeigenschaften wie Fahrzeuggewicht, Strömungswiderstand und Beladung des Taxis berücksichtigt. Durch die Beladung ist somit die Unterscheidung zwischen Kunden- und Leerfahrten schon einbezogen und spiegelt sich in den unterschiedlichen spezifischen Energieverbräuchen wider. Der Median des Energieverbrauches des ganzen Datensatzes liegt bei 1,75 kWh. Die mittleren 50 % der Werte

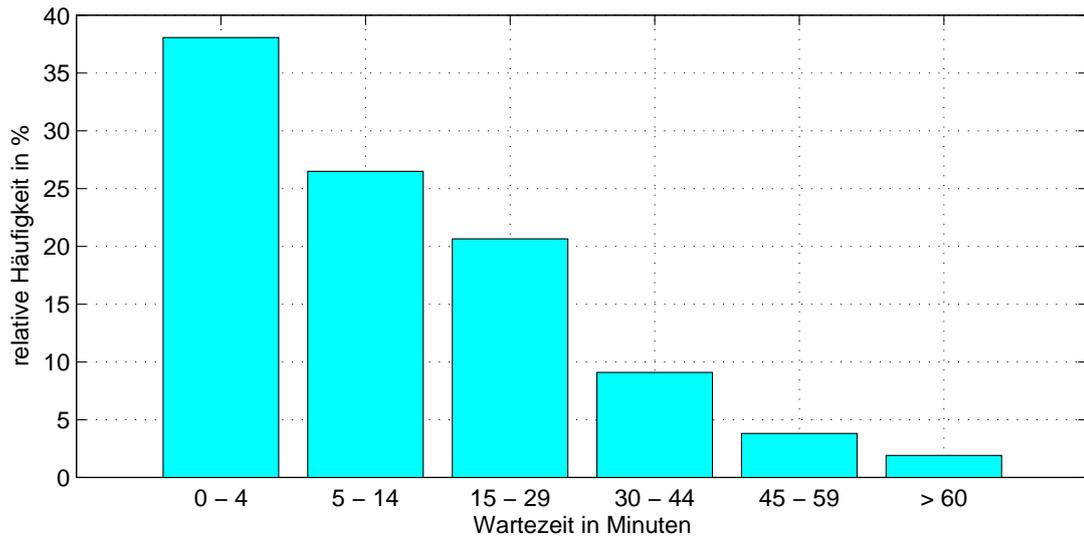


Abbildung 2.3: Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten am Standplatz je Fahrt, basierend auf den Daten von [2]

(0,25- bis 0,75-Quantil) liegen in einem Bereich zwischen einer und drei Kilowattstunden. Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 2.4, in der die Häufigkeitsverteilung des Energieverbrauches abgebildet ist, veranschaulicht. Es zeigt sich, dass bei über 55 % der Fahrten weniger als 2 kWh an elektrischer Energie verbraucht werden. Dieser Wert ist bezogen auf die gängigen Batteriegrößen von Elektrofahrzeugen als gering anzusehen. Es muss aber bedacht werden, dass mehrere solcher Fahrten hintereinander durchgeführt werden und dazwischen nur geringe Wartezeiten vorhanden sein können.

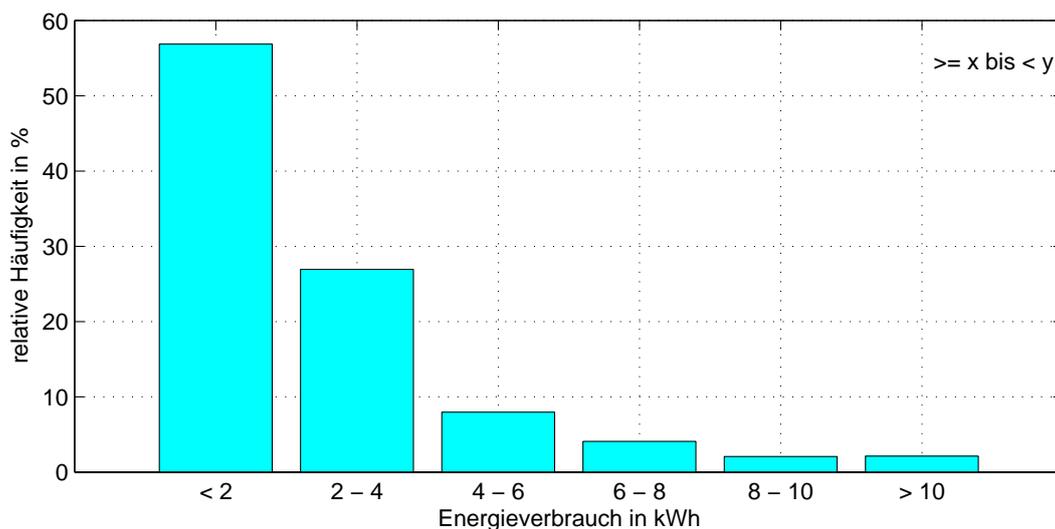


Abbildung 2.4: Häufigkeitsverteilung des Energieverbrauches je Fahrt, basierend auf den Daten von [2]

3 Modellierung

In diesem Kapitel wird auf die Realisierung des Modells eingegangen. Die Funktionsweise sowie die einzelnen Abläufe werden detailliert beschrieben und im Anschluss eine Validierung des Modells durchgeführt. Die neuen Mobilitätsdaten werden danach ausführlich analysiert und mit dem originalen Datensatz verglichen. Abschließend wird auf die Berechnung des State of Charge (SOC) eingegangen.

Unter Modellierung oder Modellbildung versteht man jenen Prozess, mit mathematischen Beschreibungen die Realität abzubilden und dadurch Aussagen über zukünftige oder aber auch vergangene Verläufe oder Zustände zu gewinnen. Es darf jedoch nicht angenommen werden, dass mit einem Modell die Realität vollständig abgebildet werden kann. Durch ein Modell werden im Vorhinein Einschränkungen und Annahmen getroffen, die den Modellierungsprozess vereinfachen und somit überhaupt ermöglichen, die Realität abzubilden, natürlich mit Fehlern und Abweichungen behaftet.

Das Modell wurde zur Gänze mit der Software MATLAB¹ entwickelt. Bei MATLAB handelt es sich um ein Programm zur numerischen Lösung von Problemen, mit dem Fokus auf der Verarbeitung von Matrizen und Vektoren. Damit ist die Software sehr gut für Simulationen, Datenerfassung, Datenanalyse und -auswertung geeignet und hat sich auf diesem Gebiet praktisch zum Standard entwickelt.

In den folgenden Abschnitten wird die Herangehensweise an die Modellierung, der Lösungsansatz und schlussendlich die Funktionsweise des Modells näher beschrieben. Auf die detaillierte Programmierung und Umsetzung des Programmcodes wird allerdings nicht eingegangen, da dies nicht Bestandteil dieser Arbeit ist sowie zu umfangreich ausfallen würde.

¹Für ausführliche Informationen siehe [5]

3.1 Modellansatz

Zu Beginn einer Modellierung ist es sehr hilfreich, das Modell als Blackbox mit fixen Eingangsgrößen, veränderbaren Parametern und Ausgangsgrößen zu betrachten. Erst wenn diese Größen definiert sind, kann mit dem Entwickeln des Modells begonnen werden. Abbildung 3.1 gibt einen Überblick über die Zusammenhänge der einzelnen Größen.

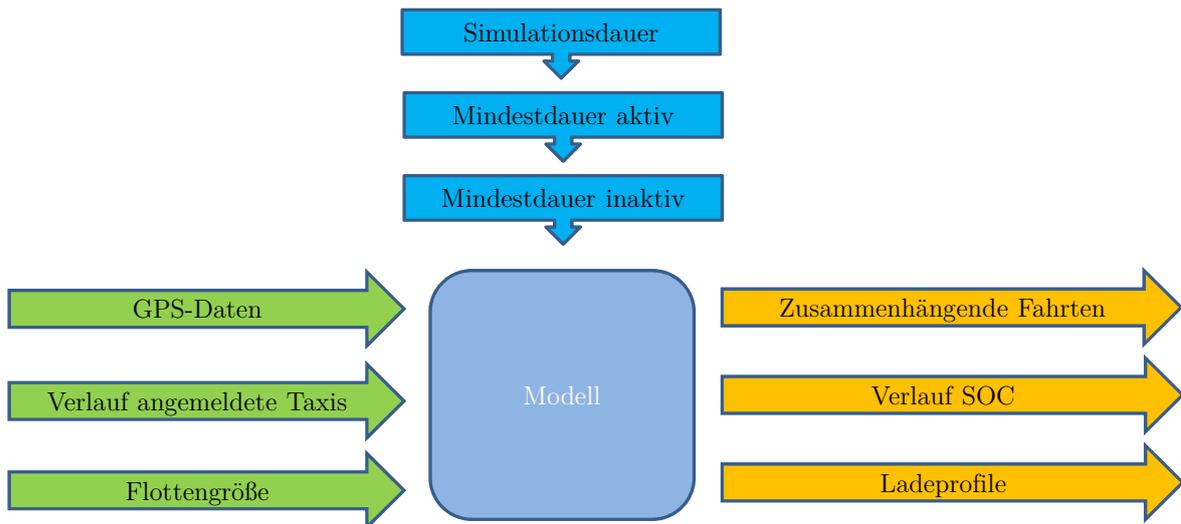


Abbildung 3.1: Überblick des Modells

Als Basiseingangsgröße dient der GPS-Datensatz des Taxiunternehmens 31300, der wie in Kapitel 2 beschrieben, vom AIT aufbereitet und für die Zwecke dieser Arbeit weiter eingeschränkt wurde. Bei der Rekonstruktion der Fahrten aus den GPS-Wegpunkten handelt es sich im Grunde auch um ein Modell, mit dessen Hilfe versucht wurde, die Realität bestmöglich nachzubilden. Da aufgrund der Komplexität der abzubildenden Prozesse jede Modellierung mit Ungenauigkeiten behaftet ist, werden diese in dieses Modell weitergereicht und sind bei der Validierung zu berücksichtigen. In dem zugrunde liegenden Datensatz befinden sich einzelne Fahrten bzw. Fahrtblöcke, die von den Taxis im Jahr 2011 absolviert wurden. Aus diesen Daten lässt sich anhand der Start- und Endzeitpunkte der Fahrten die Anzahl der am System angemeldeten Taxis zu bestimmten Zeitpunkten berechnen. Der sich somit ergebende zeitliche Verlauf stellt ebenfalls eine Eingangsgröße dar. Da die Hauptaufgabe des Modells die realitätsnahe Verkettung der Fahrten zu zusammenhängenden durchgängigen Mobilitätsdaten ist, soll dieser zeitliche Verlauf der angemeldeten Taxis bestmöglich nachgebildet werden und kann somit mit der Sollgröße eines Regelkreises verglichen werden. Ein weiterer Input in das Modell ist

durch die Flottengröße gegeben. Sie wird durch Taxis gebildet, die bei der Vermittlungsgesellschaft im System registriert sind.

Bei den Parametern handelt es sich um jene Größen, deren Werte nicht vorgegeben sind und durch Änderung das Ergebnis des Modells beeinflussen. Durch sie werden Rahmenbedingungen vorgegeben, die das Verhalten der Taxis in der Realität abbilden sollen. In der Taxibranche gibt es, so wie in jeder anderen Berufsbranche, Arbeitszeiten und Ruhepausen, die eingehalten werden müssen. Jeder Fahrer arbeitet somit eine gewisse Anzahl an Stunden, in denen er Kunden seine Fahrdienste anbietet. Nachdem die Normalarbeitszeit laut Kollektivvertrag [8] acht Stunden beträgt, wird davon ausgegangen, dass ein Fahrzeug mindestens diese Zeitspanne benutzt wird und am System als aktives Taxi angemeldet ist. Dieser Umstand soll durch die Definition des Parameters *Mindestdauer aktiv* im Modell berücksichtigt werden.

Bei der Benutzung der Taxis gibt es Unterschiede im Ausnutzungsgrad durch die Lenker. Ein Großteil der Taxis wird von mehreren Fahrern gemeinsam verwendet. Endet die Schicht des ersten Fahrers, übernimmt ein anderer Fahrer anschließend das Auto und absolviert seine Kundenfahrten. Das Taxi wird somit bei einem Fahrerwechsel weiterhin als aktiv zu werten sein, wobei die Übergabe in den vorhandenen Standzeiten an den Taxistandplätzen vollzogen werden kann. Haben alle Fahrzeuglenker ihre Schicht absolviert, so ist das Fahrzeug als inaktiv zu werten, vom System abzumelden und steht für weitere Kundenfahrten nicht zur Verfügung. Ist der Taxifahrer Besitzer des Autos und verwendet es alleine, so wird das Auto bis zum Beginn seiner nächsten Schicht, die meist am nächsten Tag beginnt, ebenfalls nicht mehr am System angemeldet. Durch Einführung des Parameters *Mindestdauer inaktiv*, der für jedes Fahrzeug und jede Schicht variabel ist, sollen verschiedene Szenarien des Fahrzeugbesitzes sowie der Nutzung durch mehrere Fahrer berücksichtigt werden.

Um Simulationen des Modells flexibel gestalten zu können, wird der Parameter *Simulationsdauer* eingeführt, der angibt, wie lange die Taxis ihre Fahrten absolvieren sollen.

Nachdem Eingangsgrößen und Parameter definiert sind, werden die Ausgänge bzw. Ergebnisse des Modells konkretisiert. Durch das Modell soll ein neuer Datensatz generiert werden, in dem der zeitliche und fahrzeugbezogene Zusammenhang zwischen den einzelnen Taxifahrten enthalten ist. Die vorhandenen Fahrten werden neu geordnet, einem Fahrzeug zugewiesen und durch inaktive Phasen, in denen das Fahrzeug nicht am System angemeldet ist, getrennt werden. Sind die Mobilitätsdaten der Taxiflotte vorhanden, ist

anschließend mit den Parametern der einzelnen Fahrten² der Verlauf des State of Charge der Fahrzeuge zu berechnen und darauf aufbauend Ladeprofile zu erstellen.

3.2 Funktionsweise des Modells

Ziel des Modells ist, einzelne Taxifahrten aneinander zu reihen und somit einen durchgängigen Datensatz auf Fahrzeugbasis zu erhalten. Diese Verkettung der Fahrten beruht auf der Tatsache, dass sich sowohl Anfangs- als auch Endpunkt einer Fahrt an einem Taxistandplatz befinden. Geht man nun von einem bestimmten Standplatz aus, so kann man annehmen, dass von diesem zu bestimmten Zeitpunkten mehrere Fahrten mit unterschiedlichen Endstandplätzen ausgehen können. Jeder Standplatz repräsentiert einen zeitlichen Zustand des Fahrzeuges, von dem durch eine Fahrt in einen anderen Zustand, also Standplatz, übergegangen werden kann. Da der Zusammenhang zwischen den Fahrten nicht vorhanden ist und somit auch keine deterministischen Regeln für den Übergang zwischen den einzelnen Zuständen existieren, muss auf die Stochastik zurückgegriffen werden, durch die die Zufälligkeit der aufeinander folgenden Fahrten berücksichtigt werden kann. Die Aufgabe besteht also darin, diese stochastischen Regeln zu finden, um von einem Zustand in einen anderen zu gelangen. Aus dem Datensatz lassen sich durch Analyse der Fahrten und deren Start- und Endstandplätzen relative Häufigkeiten berechnen. Diese geben an, wie oft ein bestimmter Standplatz angefahren wurde und vor allem, von welchem Startstandplatz dies geschehen ist. Diese relativen Häufigkeiten sind somit ein Wahrscheinlichkeitsmaß für die Übergänge zwischen den Zuständen und werden als Übergangswahrscheinlichkeiten bezeichnet.

Mit diesen Überlegungen lässt sich nun zusammenfassen, dass es sich bei dem Modell um einen diskreten stochastischen Prozess handelt, der sich als Markov-Kette [3, Seite 120 ff] modellieren lässt. Eine weitere wichtige Eigenschaft einer Markov-Kette ist, dass bei einem Übergang zwischen zwei Zuständen keine Kenntnis über frühere Zustände benötigt wird. Das System ist somit gedächtnislos und die Übergangswahrscheinlichkeiten werden nur durch den aktuellen Zustand beeinflusst. Befindet sich also ein Taxi auf einem Standplatz, so sind nur die Fahrten von Interesse, welche von diesem Standplatz gestartet wurden. Wo das Taxi zu früheren Zeitpunkten unterwegs war, ist unerheblich und muss für weitere Schritte nicht mehr berücksichtigt werden.

²siehe Auflistung in Kapitel 2, Ausgangssituation

Um nun Mobilitätsdaten für ein Taxi zu generieren, muss ein passender Pfad durch die Markov-Kette gefunden bzw. gewählt werden. Abbildung 3.2 zeigt das Prinzip der Markov-Kette, angewandt auf die Aneinanderreihung von Taxifahrten. Geht man zur Veranschaulichung von einem zufällig gewählten Taxistandplatz A aus, so werden von diesem z.B. zwei Fahrten gestartet, die auf unterschiedlichen Standplätzen enden. p_{AB} und p_{AC} geben dabei die Übergangswahrscheinlichkeiten an, dass der jeweilige Taxistandplatz als Endstandplatz gewählt wird und lassen sich aus den Verteilungen der Standplätze im Datenpool extrahieren. Verfolgt man den Graphen weiter, so steht man nach jeder Fahrt erneut vor der Entscheidung, welcher Standplatz im nächsten Schritt angefahren werden soll. Welcher Pfad schlussendlich gewählt wird, bestimmen Zufalls-generatoren. Diese wählen, abhängig von den Häufigkeitsverteilungen der Standplätze, einen neuen Endstandplatz aus.

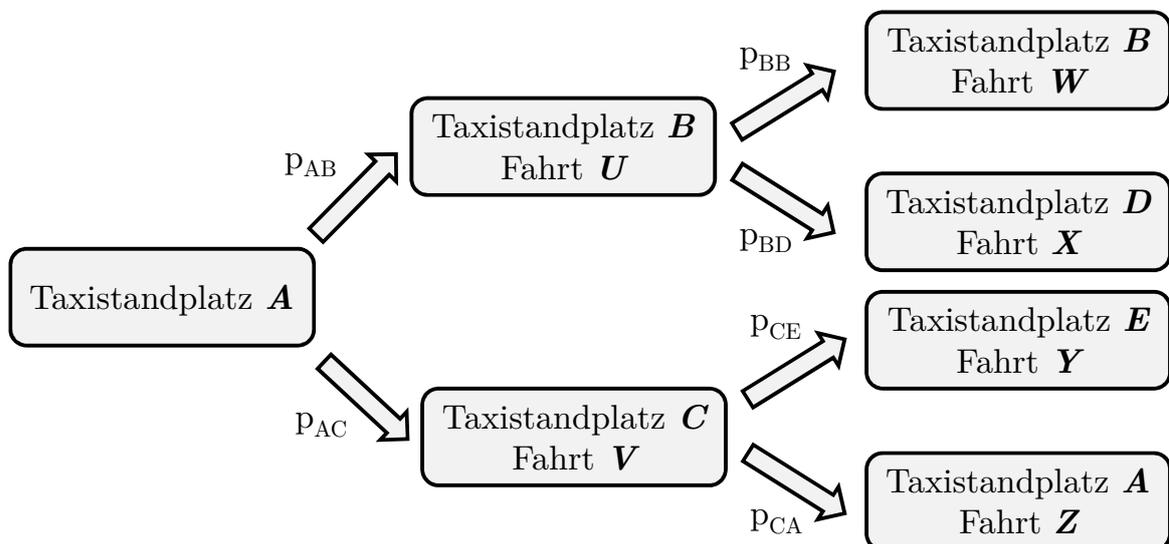


Abbildung 3.2: Übergangsgraph zur Aneinanderreihung von Fahrten

Das Programm besteht grundsätzlich aus drei wichtigen Bausteinen bzw. Programmteilen. Ein wichtiger Bestandteil des Modells ist der *Zufallsgenerator*, durch den die statistische Verkettung der Fahrten realisiert wird. In der *Tripsuche* wird der originale Datensatz durchsucht und die passenden Fahrten für die einzelnen Fahrzeuge ermittelt. Die Zusammenführung der beiden genannten Programmteile erfolgt im *Hauptprogramm*, in dem zusätzlich An- und Abmeldung, sowie die Generierung des neuen Datensatzes durchgeführt werden.

3.2.1 Zufallsgenerator

Der Übergang von einem Zustand der Markov-Kette in einen anderen wird durch die Übergangswahrscheinlichkeiten bestimmt, die sich, basierend auf den Häufigkeitsverteilungen der Standplätze im Datensatz, ermitteln lassen. Mithilfe von Zufallsgeneratoren soll nun entschieden werden, welcher Pfad in der Kette gewählt wird. Ist die Übergangswahrscheinlichkeit p_{AB} (siehe Abbildung 3.2) zum Beispiel höher als p_{AC} , so wird der Pfad *Standplatz A - Standort B* bei mehrmaliger Entscheidung öfter zu wählen sein, als der Pfad *Standplatz A - Standort C*. Dadurch wird eine Nachbildung jener Verteilung der relativen Häufigkeiten aus dem Datensatz angestrebt.

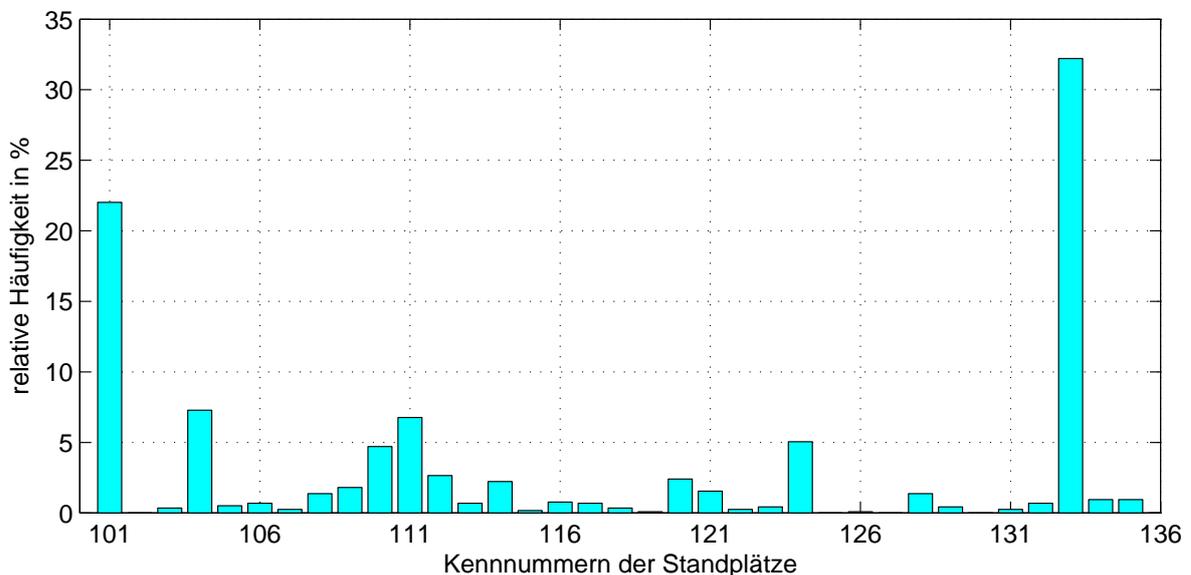


Abbildung 3.3: Häufigkeitsverteilung der Standplätze im 1. Bezirk, ausgehend vom Taxistand mit der Kennnummer 101

Abbildung 3.3 zeigt eine Häufigkeitsverteilung von jenen Endstandplätzen, die bei Fahrten ausgehend vom Standplatz mit der Kennnummer 101 im 1. Bezirk getätigt wurden. Es lässt sich erkennen, dass es einige Standplätze gibt, die öfter als andere und einige Standplätze, die nie angefahren wurden. Ebenso fällt auf, dass mehr als 20% der Fahrten wieder beim selben Standplatz endeten. Der verwendete Zufallsgenerator soll nun anhand der Häufigkeitsverteilungen aller Standplätze einen Pfad in der Markov-Kette auswählen und die unterschiedlichen Häufigkeiten berücksichtigen. Das Programm MATLAB bietet eine Reihe von fertigen Zufallsgeneratoren an, diese arbeiten mit den bekannten Standardverteilungen, wie zum Beispiel Normal-, Exponential- und F-Verteilungen. Für diese Arbeit wurde jedoch ein eigener Zufallsgenerator programmiert, der mit den

Häufigkeitsverteilungen aus dem Datensatz arbeitet und somit diese auch im Modell nachbildet.

Realisiert wurde der Zufallsgenerator basierend auf der Inversionsmethode [10, Seite 8-12]. Sie macht sich den Umstand zunutze, dass jede kumulierte Verteilungsfunktion $F(X)$ auf dem Intervall $[0,1]$ definiert und monoton steigend ist. Wird nun eine gleich verteilte Zufallszahl U auf demselben Intervall generiert, kann mit Hilfe der invertierten kumulierten Verteilungsfunktion $F^{-1}(U)$ die Zufallsvariable X berechnet werden.

$$U = F(X) \tag{3.1}$$

$$X = F^{-1}(U) \tag{3.2}$$

Die Formeln (3.1) und (3.2) zeigen diesen Zusammenhang auf. Diese Methode kann sowohl auf kontinuierliche als auch diskrete Verteilungen angewandt werden, obwohl gerade bei kontinuierlichen Verteilungen Probleme bei der Berechnung der kumulierten Verteilungsfunktion oder ihrer Inversen auftreten können. Für diskrete Verteilungen ergibt sich jedoch der große Vorteil, dass die Wahrscheinlichkeiten für jeden Wert der Zufallsvariablen X vorhanden sind und nur mit der erzeugten gleichverteilten Zufallszahl U verglichen werden müssen. Abbildung 3.4 verdeutlicht grafisch die Vorgehensweise der Inversionsmethode, angewandt auf diskrete Verteilungen. Die treppenförmige kumulierte Wahrscheinlichkeitsfunktion $F(X)$ summiert alle relativen Häufigkeiten jedes vorkommenden Wertes der Zufallsvariablen. Wird nun eine gleichverteilte Zahl aus dem Intervall $[0,1]$ per Zufallsgenerator erzeugt, kann diese auf der y-Achse des Diagrammes eingetragen und durch Bildung des Schnittpunktes mit der Verteilungsfunktion $F(X)$ der Variablenwert X bestimmt werden (in diesem Fall $X = 6$ bei einer Zufallszahl $U = 0,8$). Hat ein Variablenwert eine hohe relative Häufigkeit, dann resultiert auch eine höhere Stufe in der Verteilungsfunktion, wodurch ein größerer Teil des Intervalls $[0,1]$ diesem Wert entspricht. Es kann also durch Verwendung gleichverteilter Zufallsgeneratoren, die prinzipiell schon in den Programmen implementiert sind, und anschließender Transformation jede beliebige Verteilung nachgebildet werden.

Das vorgestellte Prinzip zur Ermittlung einer Zufallsvariablen basiert auf den Verteilungen aus dem Datensatz vom Forschungsprojekt ZENEM und wird angewandt, um den nächsten Standplatz der anzufahren ist auszuwählen. Die eigentliche Fahrt wird anschließend durch Verkleinerung des Datenpools der in Frage kommenden Fahrten und

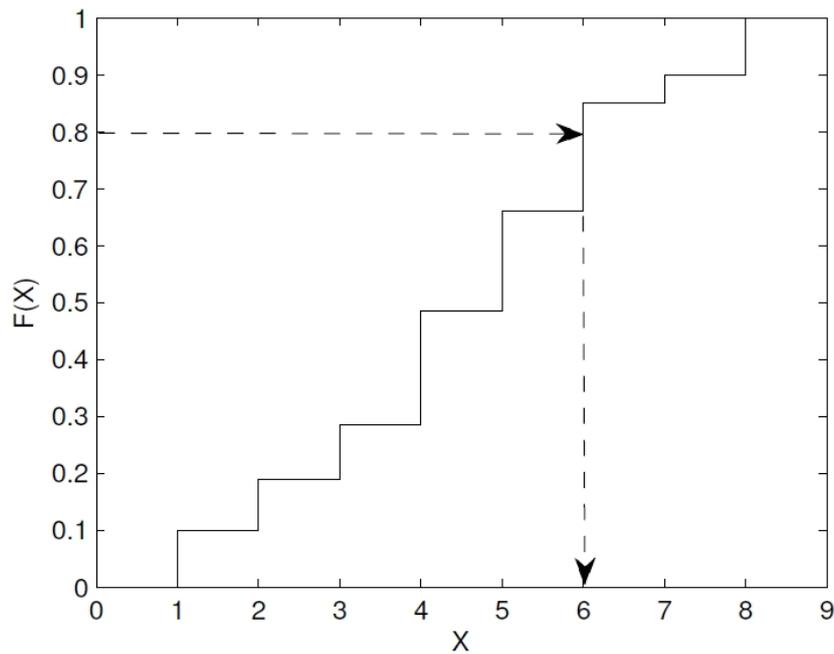


Abbildung 3.4: Prinzip der Inversionsmethode ($X = 6$ bei einer Zufallszahl $U = 0,8$), nach [10]

einem gleichverteilten Zufallsgenerator ermittelt. Die detaillierte Vorgehensweise wird nun im anschließenden Kapitel beschrieben.

3.2.2 Trip-Suche

Der Programmteil Trip-Suche ist das Herzstück des Modells. Er sucht nach einer passenden Taxifahrt, die an die vorherige Fahrt anknüpfen soll und wählt diese nach stochastischen Kriterien aus dem gesamten Datensatz aus. Es wird dabei jedoch nicht berücksichtigt, ob eine Fahrt bei einer Trip-Suche schon einmal gefunden und einem Taxi zugewiesen wurde. Dadurch kann es vorkommen, dass eine Fahrt aus dem originalen Datensatz im Modell durch mehrere Taxis absolviert wird. Im folgenden ist der Ablauf der Suche ausführlich beschrieben und in Abbildung 3.5 grafisch dargestellt.

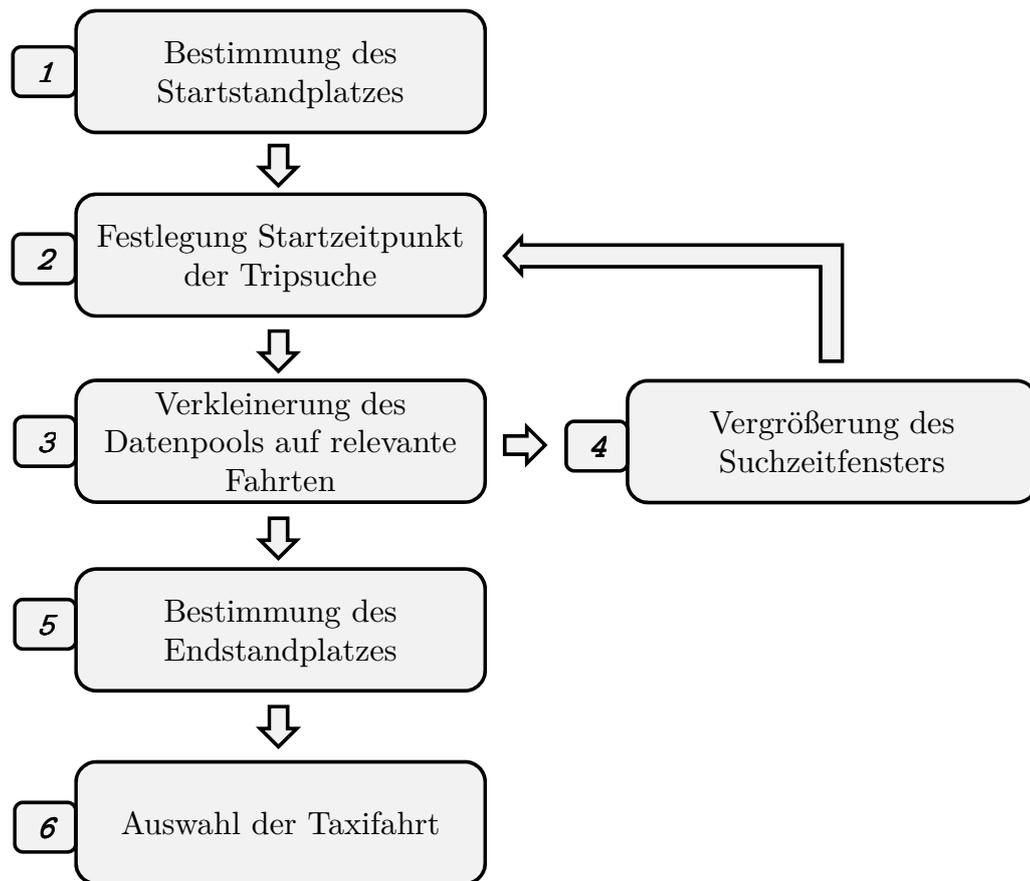


Abbildung 3.5: Ablaufdiagramm zur Suche einer passenden Taxifahrt

Bestimmung des Startstandplatzes (1)

Der Startstandplatz ist jener Standplatz, von dem aus die nächste Fahrt des Taxis starten soll. Ist das Fahrzeug schon länger am System angemeldet, hat also schon mindestens eine Fahrt vorher absolviert, dann ist der Startstandplatz gleich dem Endstandplatz aus der vorigen Fahrt. Meldet sich ein Taxi neu am System an, so wird ein Startstandplatz durch den Zufallsgenerator (siehe Kapitel 3.2.1) ermittelt. Dafür wird die Häufigkeitsverteilung der Startstandplätze über alle Fahrten im gesamten Datensatz herangezogen und darauf basierend ein Standplatz gewählt.

Festlegung des Startzeitpunktes der Tripsuche (2)

Bevor eine neue Fahrt gesucht bzw. ausgewählt werden kann, muss festgelegt werden, zu welchem Zeitpunkt die neue Fahrt beginnen soll. Wurde vorher schon eine Fahrt

getätigt, so ergibt sich der neue Startzeitpunkt durch den Endzeitpunkt und durch die Addition einer eventuell vorhandenen Wartezeit der vorigen Fahrt. Andernfalls wird der Zeitpunkt der Anmeldung am System als neuer Startzeitpunkt herangezogen.

Verkleinerung des Datenpools auf relevante Fahrten (3)

Sind nun Zeitpunkt und Startstandplatz gewählt, wird der gesamte Datensatz durchsucht und es werden jene Fahrten herausgefiltert, bei denen Startzeitpunkt und -standplatz übereinstimmen. Dabei wird die Filterung nach dem Zeitpunkt nur auf den Wochentag und die Uhrzeit beschränkt. Es macht auf jeden Fall Sinn den Wochentag zu berücksichtigen, da die einzelnen Tage teils erhebliche Unterschiede in der Anzahl der angemeldeten Taxis vorweisen und dadurch auch eine unterschiedliche Anzahl von Fahrten absolviert wurde (siehe Abbildung 2.2, Kapitel 2). Das Datum, wann die Fahrt getätigt wurde, wird nicht berücksichtigt. Dies hat den Grund, dass die einzelnen Wochentage über das ganze Jahr gesehen sehr ähnlich sind, wodurch die Abhängigkeit des Datums sehr gering ist. Weiters wird dadurch der mögliche Datenpool größer und somit eine gute Durchmischung unter den Fahrten erreicht.

Im ersten Schritt wird die Filterung mit der sekundengenauen Uhrzeit durchgeführt, wodurch dem Umstand Rechnung getragen wird, dass der Datensatz größtenteils aus Fahrtblöcken (siehe Kapitel 2) besteht. Da diese Blöcke zusammenhängende Fahrten beinhalten, stimmen jeweils Endzeitpunkt der aktuellen und Startzeitpunkt der nächsten Fahrt exakt überein. Dadurch werden, falls solche Fahrtblöcke vorhanden sind, diese als gesamtes übernommen und nicht getrennt. Die sekundengenaue Suche bestärkt auch die Entscheidung, auf die Berücksichtigung des Datums zu verzichten, da dadurch sowieso alle Fahrten, die im Datensatz hintereinander durchgeführt wurden, bei der Filterung bevorzugt behandelt werden. Wird eine Fahrt gefunden, so kann direkt zu Punkt 5, *Bestimmung des Endstartplatzes*, im Ablauf übergegangen werden. Tritt der Fall auf, dass mit diesen Kriterien keine Taxifahrt gefunden werden kann, so wird von der exakten Uhrzeitübereinstimmung Abstand genommen und ein Suchzeitfenster eingeführt. Die Größe des Zeitfensters ist als veränderbarer Parameter ausgeführt und wird in diesem Modell mit fünf Minuten angenommen und bei Bedarf um jeweils weitere fünf Minuten vergrößert. Die Zeitspanne, die durch das Suchzeitfenster entsteht (Differenz Startzeitpunkt aktuell gefundene Fahrt und Endzeitpunkt vorige Fahrt) wird anschließend im Modell als zusätzliche Standzeit berücksichtigt.

Vergrößerung des Suchzeitfensters (4)

Wird zu dem vorgegebenen Zeitfenster und Startstandort keine Fahrt gefunden, wird das definierte Suchzeitfenster weiter vergrößert und die Tripsuche von vorne begonnen. Dies wird so lange durchgeführt, bis eine passende Fahrt gefunden oder die Maximalgröße des Zeitfensters erreicht wird. Die Begrenzung wurde ebenfalls als Parameter implementiert und mit einer Stunde angenommen. Sie soll den Suchvorgang zeitlich begrenzen und zusätzliche Standzeiten von mehreren Stunden verhindern. Bleibt die Suche auch bei einem maximalen Suchzeitfenster erfolglos, wird die Tripsuche abgebrochen und dieser Umstand im Hauptprogramm (siehe Kapitel 3.2.3) weiter behandelt.

Bestimmung des Endstandplatzes (5)

Im vorigen Schritt wurden aus dem gesamten Datensatz jene Fahrten herausgefiltert, die zu dem definierten Zeitpunkt und Startstandplatz getätigt wurden. Der Endstandplatz wird durch erneutes Anwenden des Zufallsgenerators bestimmt, jedoch diesmal basierend auf der Verteilung der Standplätze aus dem reduzierten Datensatz.

Auswahl der Taxifahrt (6)

Schlussendlich bleiben nur noch Fahrten zwischen den zwei ermittelten Standplätzen übrig, die sich lediglich im Datum, wann sie absolviert wurden, unterscheiden. Da das Datum jedoch nicht berücksichtigt wird, sind alle in der Auswahl vorhandenen Fahrten gleichwertig. Die Entscheidung, welche nun gewählt wird, übernimmt ein gleichverteilter Zufallsgenerator, wodurch alle Möglichkeiten gleich behandelt und per Zufall entschieden wird. Mit der ausgewählten Fahrt kann nun in den Hauptteil des Programmes gewechselt werden, wo die Fahrt dem Taxi zugeordnet wird.

3.2.3 Hauptprogramm

Das Hauptprogramm integriert die beiden oben angeführten Programmteile und übernimmt die Verwaltung der einzelnen Taxis. In ihm werden alle benötigten Parameter definiert und die Eingangsgrößen eingelesen. Außerdem führt es An- und Abmeldungen

durch und generiert den neuen Datensatz, der aus zusammenhängenden Mobilitätsdaten der einzelnen Taxis besteht.

Neben dem GPS-Datensatz, der alle Fahrten enthält, muss auch die Flottengröße definiert werden. Sie gibt die Maximalanzahl von Taxis an, die am System registriert und an- oder abgemeldet werden können, an. Eine weitere wichtige Eingangsgröße des Modells ist der zeitliche Verlauf der angemeldeten Taxis, der nachgebildet werden soll. Es handelt sich gewissermaßen um einen vorgegebenen Sollwert, dem das Modell mit einer bestimmten zulässigen Abweichung zu folgen hat. Je kleiner diese Abweichung ausfällt, desto genauer wird die Eingangsgröße nachgebildet und die Qualität des Modells steigt. In diesem Modell wird mit dem zeitlichen Verlauf der angemeldeten Taxis aus dem vorhandenen Datensatz gearbeitet. Grundsätzlich ist aber jeder beliebige zeitliche Verlauf möglich, sodass auf einfache Weise verschiedene Flottengrößen oder Szenarien mit unterschiedlichem Fahrverhalten in anderen Städten modelliert werden können.

Um die Ab- und Anmeldevorgänge der Taxis am System durchführen zu können, sind zwei Zeitspannen ausschlaggebend. Durch den Parameter *Mindestdauer aktiv* wird festgelegt, wie lange eine Taxischicht mindestens dauern muss, bevor das Taxi vom System abgemeldet werden kann. Es wird ein fixer Wert von acht Stunden angenommen und richtet sich somit nach der Normalarbeitszeit eines Taxilenkers, die im Kollektivvertrag für Angestellte im Taxi- und Mietwagengewerbe [8] angegeben ist. Der zweite wichtige Parameter *Mindestdauer inaktiv* gibt jene Zeitdauer an, die ein Taxi mindestens vom System abgemeldet sein muss, um erneut angemeldet zu werden. Da die Unterbrechungen zwischen den einzelnen Taxischichten durch die unterschiedliche Anzahl von Fahrzeugkernern meist unterschiedlich sind, wird der Parameter variabel ausgeführt und der Wert für jedes Fahrzeug und jede Schicht neu gewählt. Um möglichst viele unterschiedliche Szenarien zu erfassen, wird der Wert von *Mindestdauer inaktiv* durch einen gleichverteilten Zufallsgenerator bei jedem Abmeldevorgang neu generiert und kann Werte zwischen einer Stunde und sechzehn Stunden betragen.

Nachdem sämtliche Eingangsgrößen und Parameter bestimmt sind, kann zu dem Teil des Hauptprogrammes übergegangen werden, in dem die einzelnen Taxis simuliert werden. In Abbildung 3.6 ist der Ablauf grafisch dargestellt und wird im folgenden detailliert beschrieben.

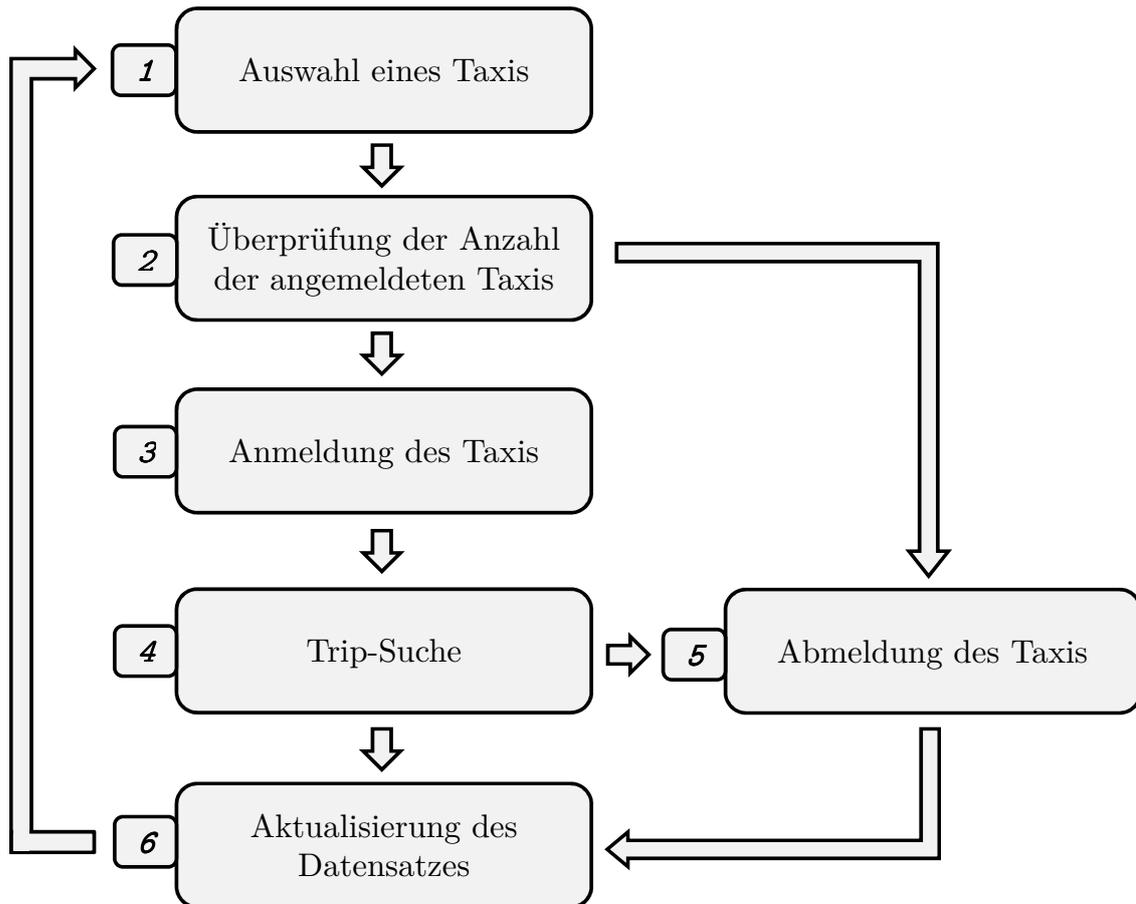


Abbildung 3.6: Ablaufdiagramm des Hauptprogrammes

Auswahl eines Taxis (1)

Bei der Auswahl der einzelnen Taxis wird mit einer Prioritätenliste gearbeitet. In ihr sind jene Zeitpunkte der Taxis gespeichert, bei denen die Fahrzeuge neue Befehle benötigen, wobei es hier nur drei verschiedene Anweisungen zur Auswahl gibt. Diese sind zum einen die Suche nach einer neuen Fahrt, die Anmeldung am System und anschließender Suche nach einer Fahrt sowie die Abmeldung am System. Ist ein Taxi momentan am System angemeldet und absolviert eine Fahrt, so wird der Endzeitpunkt der aktuellen Fahrt gespeichert und erst zu diesem Zeitpunkt das Taxi erneut abgefragt und die Entscheidung getroffen, was es als nächstes machen soll. Wird ein Fahrzeug vom System abgemeldet, so wird die Zeitspanne, wie lange es abgemeldet bleiben soll, ebenfalls gespeichert und nach Ablauf der Zeit das Taxi erneut mit einem neuen Befehl versorgt. Diese Vorgehensweise hat einen geringen Rechenaufwand zur Folge, da nur dann Abfragen getätigt und Befehle erteilt werden, wenn auch welche benötigt werden. Da gewählte

Fahrten nicht zwischendurch unterbrochen werden können, spricht ebenfalls für die Verwendung von einer Zeitpunkt- bzw. Entscheidungsliste. Bei jedem erneuten Durchlauf des Hauptprogrammes wird nun die Prioritätenliste durchsucht und jener Zeitpunkt mit dem dazugehörigen Taxi gewählt, der als nächster in der Zeitachse an der Reihe ist.

Überprüfung der Anzahl der angemeldeten Taxis (2)

Ist das Taxi gefunden, für das die nächste Entscheidung zu treffen ist, kann nun überprüft werden, ob es angemeldet bleiben, neu angemeldet oder abgemeldet werden soll. Dafür wird zum aktuellen Entscheidungszeitpunkt die Differenz aus der Anzahl der am System angemeldeten Fahrzeuge im Modell und jener aus dem vorgegebenen zeitlichen Verlauf aus dem originalen Datensatz gebildet. Da versucht wird, diesen Verlauf bestmöglich nachzubilden, muss bei negativer Abweichung das Taxi angemeldet werden bzw. wenn es schon angemeldet war, weiter angemeldet bleiben. Ist hingegen die Differenz positiv, so ist im Modell eine größere Anzahl an Taxis angemeldet als im vorgegebenen Verlauf und das Fahrzeug muss vom System abgemeldet werden. Tritt der Fall ein, dass zum Abfragezeitpunkt keine Abweichung vorhanden ist, so wird ein Taxi, das schon angemeldet war, weiterhin angemeldet und Fahrzeuge, die nicht angemeldet sind, weiter abgemeldet bleiben.

Anmeldung des Taxis (3)

Soll nun das Taxi angemeldet werden, so wird die Anmeldezeit gespeichert, um in weiterer Folge mit dem Parameter *Minstdauer aktiv* verglichen werden zu können. Dieser Parameter gibt an(wie zuvor erwähnt), wann das Taxi frühestens wieder abgemeldet werden darf. Durch den Anmeldevorgang wird auch eine neue Taxischicht gestartet, die durch mehrere Fahrten, die hintereinander durchgeführt wurden, gekennzeichnet ist. Weiters wird bei jedem neuen Anmeldevorgang am System ein neuer Startstandplatz bestimmt, der durch den in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Zufallsgenerator generiert wird. Nun kann eine Fahrt gesucht und somit zum nächsten Punkt im Ablaufdiagramm übergegangen werden. War das Taxi vor der Überprüfung in Punkt 2 *Überprüfung der Anzahl der angemeldeten Taxis* schon angemeldet, wird der Anmeldeschritt übersprungen und direkt zur *Trip-Suche* übergegangen.

Trip-Suche (4)

Ist das Taxi am System angemeldet, wird eine neue Fahrt gesucht, die an die Letzte angehängt werden kann. Dieser Vorgang wurde in Punkt 3.2.2 ausführlich beschrieben. War die Suche erfolgreich, kann direkt zu Punkt 6, *Aktualisierung des Datensatzes*, übergegangen werden. Wurde hingegen keine passende Taxifahrt gefunden, wird das Taxi in Punkt 5, *Abmeldung des Taxis*, abgemeldet.

Abmeldung des Taxis (5)

Führt der Vergleich der Anzahl der angemeldeten Taxis mit dem vorgegebenen Verlauf zur Entscheidung, das Taxi abzumelden, so endet eine Taxischicht und wird durch eine anschließende inaktive Phase abgelöst. Die Dauer dieser inaktiven Zeitspanne wird durch den Parameter *Minstdauer inaktiv* angegeben, der Wert durch einen Zufallsgenerator generiert und somit der nächste Abfragezeitpunkt festgelegt.

War das Taxi vor der Abfrage schon abgemeldet und muss dies auch weiterhin bleiben, wird der neue Abfragezeitpunkt um fünf Minuten verschoben und nach dieser Zeitspanne erneut überprüft, ob das Taxi angemeldet werden soll oder nicht. Durch die relativ kleine Zeitpunktverschiebung wird vermieden, dass die Zeitdauer, die das Fahrzeug abgemeldet ist, nicht übermäßig verlängert wird und somit jedes Fahrzeug nach Ablauf seiner inaktiven Phase schnellstmöglich wieder als aktives Taxi in das System aufgenommen werden kann.

Ein weiterer Grund, dass ein Taxi abgemeldet werden muss, ist, wenn zum aktuellen Zeitpunkt und Standort keine Fahrt gefunden wurde und auch die Vergrößerung des Suchzeitfensters (beschrieben in Punkt 3.2.2) keinen Erfolg brachte. Dadurch wird vermieden, dass im Modell keine zusätzlichen langen Wartezeiten an den Standplätzen generiert werden. Bei der Abmeldung wird ebenfalls die Zeitdauer *Minstdauer inaktiv* durch einen Zufallsgenerator generiert und nach Ablauf dieser das Taxi bei Bedarf erneut angemeldet.

Aktualisierung des Datensatzes (6)

Nachdem eine Fahrt gefunden wurde, muss der Datensatz anschließend ergänzt werden. Dafür wird jedes Taxi unter einer eigenen Identifikationsnummer geführt und durch diese jede Taxifahrt dem jeweiligen Fahrzeug eindeutig zugeordnet. Wurde bei der Suche

nach einer Fahrt das Suchzeitfenster vergrößert, so wird diese Zeitspanne als zusätzliche Wartezeit am Standplatz gewertet und dem Datensatz ebenfalls hinzugefügt. Ist ein Taxi vom System abgemeldet worden, so wird die aktuelle Schicht beendet und der Datensatz um die Phase, die das Taxi inaktiv ist, ergänzt und diese Zeitspanne abgespeichert.

Mit dem oben beschriebenen Ablauf kann nun eine Simulation basierend auf dem Modell gestartet und die gewünschten Mobilitätsdaten generiert werden. Ist der Simulationdurchlauf beendet, steht ein neuer Datensatz zur Verfügung, in dem jedes Taxi der gesamten Flotte eine gewisse Anzahl an Fahrten absolviert hat. Die einzelnen Wegstrecken, die hintereinander ausgeführt wurden, kennzeichnen Taxischichten. Diese sind wiederum durch Pausen, in denen das Taxi nicht am Verwaltungssystem angemeldet ist, unterbrochen. Wie viele Fahrten oder Pausen jedes einzelne Taxi während der Simulationsdauer getätigt hat ist abhängig vom vorgegebenen Sollwert der Anzahl der angemeldeten Taxis und vom Zeitraum, wie lange die Simulation durchgeführt wurde. Mit dem neu gewonnenen Datensatz kann nun im nächsten Schritt der Umstieg auf Elektrotaxis erfolgen, indem jedem Fahrzeug eine Batterie zugewiesen und der Ladezustandverlauf nachträglich berechnet wird. Die Vorgehensweise der Berechnung ist im folgenden Kapitel detailliert beschrieben.

3.2.4 Berechnung des State of Charge und Laden der Batterien

Unter batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen (BEV) werden jene Fahrzeuge verstanden, bei denen der Antrieb durch einen Elektromotor erfolgt und die dafür benötigte Energie in Akkumulatoren gespeichert und mitgeführt wird. Durch die begrenzte Energiespeicherung ist es sehr wichtig, genaue Kenntnisse über den aktuellen Ladezustand (SOC) zur Verfügung zu haben, um die jeweiligen Wegstrecken ohne ungewollte Unterbrechungen zurücklegen zu können.

Nachdem der neue Datensatz mit den zusammenhängenden Fahrten und Pausen generiert wurde, wird nun der SOC-Verlauf nachträglich für jedes Fahrzeug berechnet. Dafür wird jener Energieverbrauch herangezogen, der vom AIT [2] bestimmt wurde und für jede einzelne Fahrt vorliegt. Steht ein Taxi auf einem Standplatz und wartet, oder ist es gerade vom Verwaltungssystem abgemeldet, so besteht die Möglichkeit, diese Zeit für die Ladung der Batterie zu nutzen. Wie die Ladevorgänge und Berechnungen des SOC im Programm realisiert wurden, wird im Folgenden beschrieben.

Lithium-Ionen-Technologie stellen zum heutigen Zeitpunkt den Batteriestandard für Mobilitätsanwendungen dar. Daher wird in diesem Modell für die gesamte Taxiflotte von diesem Batterietyp ausgegangen. Am Markt stehen verschiedene Ausführungen mit unterschiedlichen Kombinationen von Materialien (Anode, Kathode und Separator) mit diversen Speicherkapazitäten und Spannungen zur Verfügung. Dies kommt durch eine entsprechende Verschaltung mehrere, einzelner Zellen zu Stande. In den folgenden Berechnungen wird die Batterie vereinfacht als eine einzelne Zelle modelliert und deren Speicherkapazität fiktiv mit der nötigen Energiemenge angenommen. Durch das Zusammenwirken der einzelnen Zellen in einem kompletten Batteriepaket kann es durch Interaktionen untereinander zu Abweichungen im Ladezustand und Ladevorgang kommen; dies wird jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt. Außerdem werden auch Temperaturabhängigkeiten, die bei einem Ladevorgang vorhanden sind und Alterungseffekte vernachlässigt, da diese für das Ziel dieser Arbeit keine Relevanz aufweisen und somit ein einfaches Batteriemodell völlig ausreichend ist. Sämtliche Ladevorgänge werden mit der gewählten Maximalleistung nach einer I-U-Kennlinie und somit einer ungesteuerten Ladung durchgeführt. Gerade bei einer großen Durchdringungsrate von Elektrofahrzeugen ist der gleichzeitige ungesteuerte Ladevorgang von mehreren Fahrzeugen mit großen Problemen für das Verteilnetz behaftet. Der Einsatz von gesteuerten Ladeverfahren kann hier Abhilfe schaffen. Die Berücksichtigung dieses Umstandes würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen, weshalb die Ladevorgänge zur Gänze ungesteuert ausgeführt werden.

Ladevorgang einer Lithium-Ionen-Zelle

Um eine Lithium-Ionen-Zelle laden zu können, müssen sämtlich Kenndaten der Zelle bekannt sein. Die Ladeschlussspannung U_{LS} ist die maximale Spannung, mit der die Batterie geladen darf und ist für jede Lithium-Ionen-Batterie gleich. Nachdem die Zelle nicht beliebig tief entladen bzw. hoch geladen werden soll, wird der Ladezustand nach unten und oben durch SOC_{min} und SOC_{max} begrenzt.

Im Modell stehen den Fahrzeugen zwei verschiedene Ladeleistungen zur Verfügung. Auf den Taxistandplätzen kann während den Wartezeiten eine Schnellladung mit 50 kW DC vorgenommen werden. In den inaktiven Phasen, wenn die Taxis abgemeldet sind, wird von einer Langsamladung mit 3,67 kW ausgegangen, die an einem üblichen 1-phasigen und mit 16 A abgesicherten Haushaltsstromanschluss erfolgen kann. Beide Ladeleistungen sind als variable Parameter im Modell ausgeführt und können somit für Analyse-zwecke leicht verändert werden. Der Ladewirkungsgrad η_L gibt an, wie hoch die Verluste

durch den Ladevorgang sind und mit welcher Energiemenge die Batterie letztlich geladen wird. Schlussendlich muss noch die Kapazität der Batterie definiert werden. Hier wird von einem Energieinhalt von 24 kWh ausgegangen (Nennkapazität des Elektroautos Nissan Leaf [7]), wobei dieser Wert für Analysen auch einfach verändert werden kann.

$$\begin{aligned}
 U_N &= 3,6 \text{ V} \\
 U_{LS} &= 4,2 \text{ V} \\
 SOC_{min} &= 5 \% \\
 SOC_{max} &= 95 \% \\
 P_{L_{low}} &= 3,7 \text{ kW} \\
 P_{L_{fast}} &= 50 \text{ kW} \\
 \eta_L &= 0,9 \\
 E_{Batt} &= 24 \text{ kWh}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Geladen werden die Batterien nach dem gängigen I-U-Verfahren, bei dem der Ladevorgang durch zwei unterschiedliche Phasen bestimmt werden, die durch den Ladeumschaltzeitpunkt s (3.5) in % des SOC getrennt sind. In der ersten Phase – der I-Phase – wird mit konstantem Strom geladen, wobei die Zellenspannung während des Ladevorganges leicht bis zum Wert der Ladeschlussspannung ansteigt. Da der Spannungsanstieg nicht sehr groß ist, kann man einen konstanten Spannungswert annehmen, wodurch in der I-Phase bei einem vereinfachten Lademodell mit konstanter Leistung geladen wird. Beim Umschaltzeitpunkt, gekennzeichnet durch das Erreichen der Ladeschlussspannung, wird in die U-Phase übergegangen, bei der die Ladespannung auf die Ladeschlussspannung begrenzt wird. Dabei sinkt der Ladestrom mit fortschreitender Ladedauer annähernd exponentiell ab. Die Ladeleistung folgt, nachdem die Ladespannung konstant ist, dem Ladestrom und hat somit ebenfalls einen exponentiell abklingenden Verlauf (3.6). Um eine Überladung zu vermeiden, wird der Ladevorgang bei Erreichen des Ladeabschaltstromes I_{LS} (3.4) beendet, der in Capacity Rate (C-Rate) angegeben wird. Bei Messungen an realen Ladegeräten im Forschungsprojekt ZENEM wurde ermittelt, dass der Ladeschlussstrom leistungsabhängig und höher als der in der Theorie mit 0,03 C-Rate angegebene Wert ist. Dies wurde mit der Anpassung der Formel (3.4) berücksichtigt. Weiters hat sich in [4] gezeigt, dass der Ladeumschaltzeitpunkt nicht als konstant angenommen werden kann und bei Batterien, die mit großen Leistungen geladen werden, von den gängigen 80 % abweicht. Dies ist auf die hohen Ladestromstärken und

den damit verbundenen internen Spannungsabfall zurückzuführen, der die Klemmenspannung der Batterie früher auf den Wert der Ladeschlussspannung ansteigen lässt. Der Umstand, dass der Umschaltzeitpunkt zu geringeren SOC-Werten verschoben wird und somit auch die Zeitdauer abnimmt, in der mit maximaler Leistung geladen wird, bringt gerade für Taxistandplätze mit mehreren Lademöglichkeiten eine Entlastung des Verteilnetzes mit sich. Um dies berücksichtigen zu können, wurde eine Anpassung des Umschaltpunktes in Abhängigkeit von der Ladeleistung vorgenommen und aus [4, Abbildung 5] grafisch ermittelt (siehe (3.5)). Beim Ansteigen der Ladeleistung wandert somit der Ladeumschaltzeitpunkt zu geringeren SOC-Werten und wird, angegeben durch die Formel, bei Leistungen über 100 kW sogar negativ. Das bedeutet, dass durch die hohen Ströme die Ladeschlussspannung schon zu Beginn des Ladevorganges erreicht ist und auf die U-Phase der Ladung übergegangen werden muss. Hierbei handelt es sich generell um eine Vereinfachung des Batteriemodells und um sehr einfache Ladekurven. Es wird darauf hingewiesen, dass diese von realen Batteriesystemen erheblich abweichen können und messtechnisch ermittelt werden müssten.

$$I_{LS} = 0.006 * P_L + 0.008 \quad \text{nach [2]} \quad (3.4)$$

$$s = -0.008 * P_L + 0.83 \quad \text{nach [4]} \quad (3.5)$$

Die Leistung in der Ladephase mit konstanter Spannung lässt sich mit Formel (3.6) berechnen, wobei der Faktor k_L so gewählt wird, dass das Erreichen des Vollladezustandes mit dem des Ladeabschaltstromes zusammenfällt [9, S.83 -84].

$$P = P_L * e^{\frac{s - SOC}{k_L}} \quad \text{mit} \quad (3.6)$$

$$k_L = \frac{100 - s}{\ln\left(\frac{P_L}{P_{LS}}\right)} \quad \text{und} \quad P_{LS} = \frac{U_{LS}}{U_N} * I_{LS} * E_{Batt} \quad (3.7)$$

Hiermit ergeben sich, abhängig von der Höhe des SOC, die beiden Ladeleistungen wie in den Formeln (3.8) und (3.9) nochmals dargestellt.

$$SOC_{min} \leq SOC \leq s \quad \implies \quad P_{(t)} = P_L \quad (3.8)$$

$$s < SOC < SOC_{max} \quad \implies \quad P_{(t)} = P_L * e^{-\frac{s - SOC_{(t-1)}}{k_L}} \quad (3.9)$$

$$SOC_{(t)} = SOC_{(t-1)} + \frac{P_{(t)} * \Delta t}{E_{BATT}} * \eta_L \quad (3.10)$$

Mit Hilfe der Leistungsaufnahme in jedem Zeitpunkt kann nun rekursiv der jeweilige SOC mit (3.10) berechnet werden. Abbildungen 3.7 und 3.8 stellen den zeitlichen Verlauf des Schnellladevorganges einer 24 kWh Batterie mit einer Ladeleistung von 50 kW dar. Der Ladeumschaltzeitpunkt, der bei ca. 15 Minuten liegt, ist gut erkennbar. Ab diesem Zeitpunkt klingt die Ladeleistung exponentiell ab. Nach 55 Minuten wurde der Ladeabschaltstrom bzw. SOC_{max} erreicht und die Ladung kann beendet werden. Diese Diagramme verdeutlichen auch, dass schon nach weniger als einem Drittel der Gesamtladezeit die Batterie zu 50% geladen werden konnte, bis zum Erreichen des Vollladezustandes jedoch im Vergleich mehr Zeit benötigt wird.

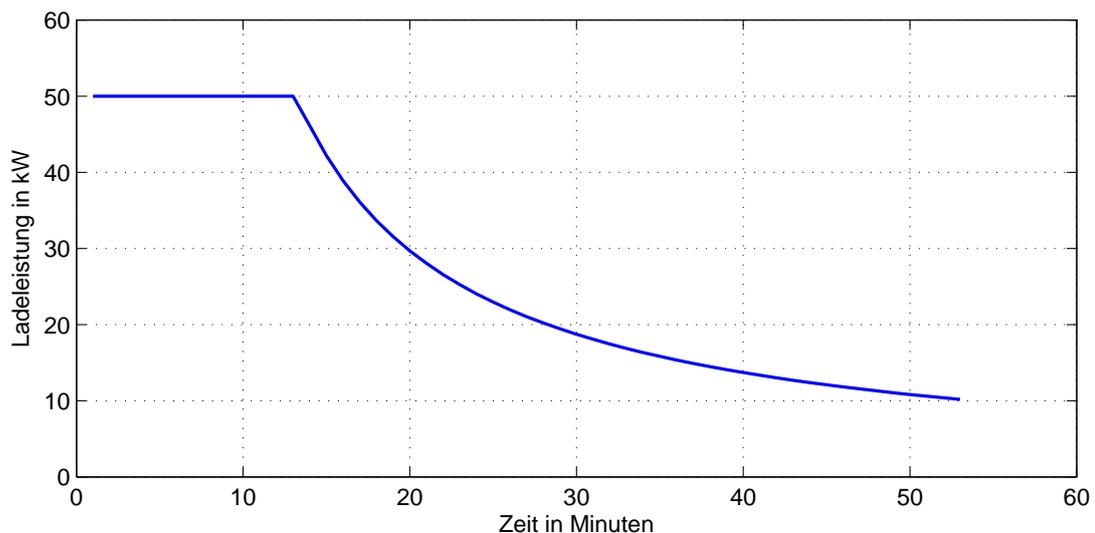


Abbildung 3.7: Zeitverlauf der Ladeleistung einer 24 kWh Batterie beim Ladevorgang mit 50 kW

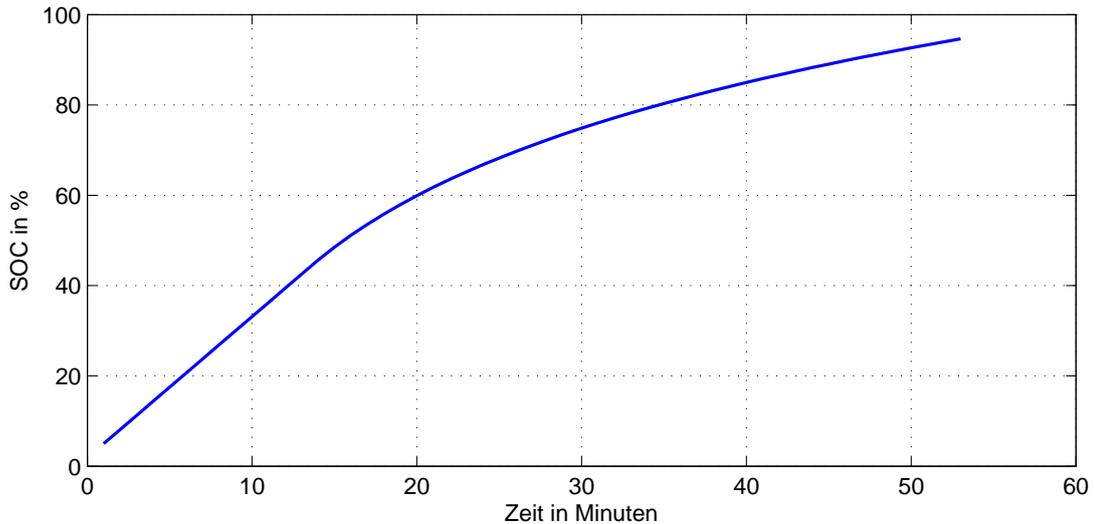


Abbildung 3.8: Zeitverlauf des SOC einer 24 kWh Batterie beim Ladevorgang mit 50 kW

Ermittlung der einzelnen SOC-Werte

Für die Berechnung der SOC-Verläufe der Fahrzeuge werden nun die einzelnen Energieverbrauchswerte der Fahrten und die generierten Ladekurven herangezogen. Eine Taxifahrt wird mit dem Wert $SOC_{Start-Fahrt}$ gestartet und nach Abzug der verbrauchten Energie mit dem Wert $SOC_{Ende-Fahrt}$ beendet. Besteht nun die Möglichkeit, das Fahrzeug zu laden, so wird der Wert $SOC_{Ende-Fahrt}$ auf der y-Achse der Ladekurve (siehe Abbildung 3.9) aufgesucht und durch Bildung des Schnittpunktes mit der Kurve der dazugehörige Zeitwert bestimmt. Mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Ladezeit kann damit jener SOC-Wert gesucht werden, der dem neuen Zeitwert entspricht, welcher um die Ladezeit vergrößert wurde. Dieser Wert $SOC_{Ende-Ladevorgang}$ ist nun der neue Batterieladestand, der nach dem Ladevorgang erreicht wird. Das Kurvenstück, das durch $SOC_{Ende-Fahrt}$ und $SOC_{Ende-Ladevorgang}$ begrenzt wird, ergibt die zeitliche Änderung des SOC durch das Aufladen. Da die Zeitachsen des SOC-Verlaufes und des Leistungsverlaufes gleich sind, kann durch die beiden Zeitwerte das äquivalente Kurvenstück des Leistungsverlaufes ermittelt und somit die benötigte Ladeleistung bzw. deren Verlauf für den Vorgang angegeben werden. Diese Kurvenstücke der Ladeleistung werden für den jeweiligen Standplatz mit Lademöglichkeit gespeichert und alle Ladevorgänge zeitrichtig aufsummiert. Die sich dadurch ergebenden Summenladeprofile der einzelnen Taxistandplätze geben die vom Verteilnetz über die Zeit bereitzustellende Leistung bzw. die Energiemenge an und können für Netzanalysen herangezogen werden. Weiters wird für Analysezwecke die Anzahl der gleichzeitig ladenden Taxis bestimmt, um Auslastungsdaten liefern zu können. Wird das Fahrzeug nicht geladen, so entspricht

der Wert $SOC_{\text{Ende-Ladevorgang}}$ dem von $SOC_{\text{Ende-Fahrt}}$ und es gibt keine Änderung des Wertes.

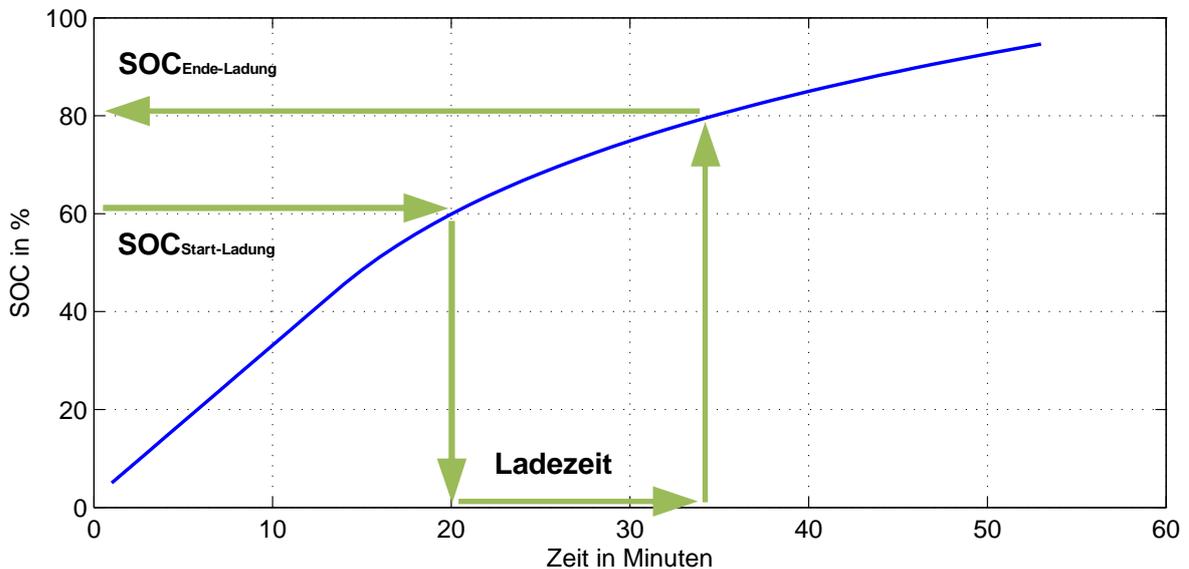


Abbildung 3.9: Berechnung des SOC anhand des Zeitverlaufes aus Abbildung 3.8

Um einen möglichst realitätsnahen Ladevorgang zu Grunde zu legen, wird zusätzlich eine Zeitdauer für den Einsteckvorgang bzw. Absteckvorgang des Ladesteckers von 5 Minuten berücksichtigt und von der Wartezeit am Standplatz abgezogen. Ist die Wartezeit unter 5 Minuten, kann das Fahrzeug somit nicht geladen werden. Dieser Wert ist sehr großzügig angenommen, soll jedoch dadurch bei der Berechnung der Ladezustände den „Worst Case“ berücksichtigen, da generell weniger Ladezeit zur Verfügung steht. Für eine möglichst Gestaltung des Modells, um möglichst viele Szenarien simulieren zu können, sind sowohl die Langsamladung in den inaktiven Phasen, als auch die Schnellladung an den Standplätzen unabhängig voneinander aktivier- oder deaktivierbar. An welchen Standorten eine Lademöglichkeit besteht, kann durch Listen vorgegeben werden, wodurch unterschiedliche Ausbaustufen der Ladeinfrastruktur berücksichtigt werden können.

Da in einer Taxischicht ein Fahrzeug mehrere, teils von sehr kurzen oder gar keinen Pausen unterbrochene, Fahrten hintereinander absolviert, ist es unvermeidlich, dass der SOC bei Fortschreiten der Schicht rechnerisch einen negativen Wert ergeben kann und somit die Batteriekapazität nicht ausreichend ist. Für diese Fälle werden negative Werte des SOC zugelassen und auch etwaige Ladevorgänge werden von diesen Ladezuständen gestartet. Damit wird die Konstantstromladung in der ersten Phase der Ladung im Zeitverlauf des SOC (Abbildung 3.8) zeitlich weiter nach links verschoben, Werte unter Null zugelassen und mit konstanter Leistung geladen. Durch diese Maßnahme ist es möglich,

jenen fehlenden Energiebetrag zu errechnen, der für die erfolgreiche Absolvierung der gesamten Schicht notwendig wäre.

3.3 Validierung des Modells

Im vorigen Kapitel wurden der Modellansatz und die Funktionsweise des Modells ausführlich beschrieben. Um nun eine Aussage über die Leistungsfähigkeit und die Qualität treffen zu können, wird eine Validierung des Modells durchgeführt. Dafür wurde eine Simulation mit einer Dauer von 11 Tagen durchgeführt, wobei aus diesem Zeitraum eine Woche für alle weiteren Analysen extrahiert wurde. Als Eingangsgröße für den zeitlichen Verlauf der angemeldeten Taxis dient der Datensatz vom Taxivermittlungsunternehmen 31300. Da die Verläufe der einzelnen Wochentage über das gesamte Jahr annähernd gleich sind und sich nur geringfügig unterscheiden, wurde jeder Wochentag durch eine Mittelwertbildung über das gesamte Jahr gemittelt. Somit werden die Daten des ganzen Jahres berücksichtigt und die extrahierte Woche kann als repräsentativ erachtet werden. Durch Wiederholung dieser gemittelten Woche sind Simulationen über längere Zeiträume möglich. Die Flottengröße wurde ebenfalls dem Datensatz von 31300 entnommen und durch Mittelwertbildung über das gesamte Jahr mit einem Wert von 825 Taxis festgelegt.

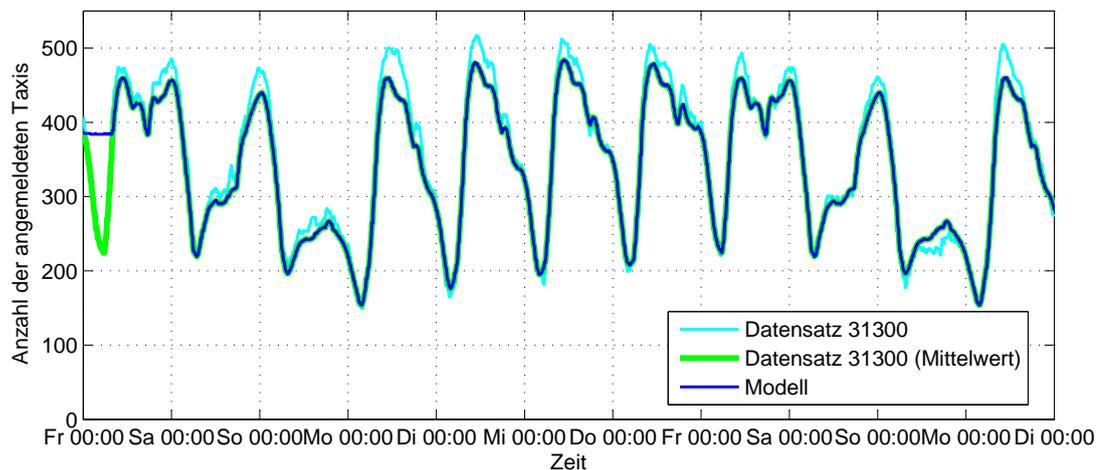


Abbildung 3.10: Vergleich des zeitlichen Verlaufes der am System angemeldeten Taxis, 11 Tage, 13. - 24.05.2011

Das Ergebnis der Simulation kann in Abbildung 3.10 betrachtet werden und stellt den Verlauf der angemeldeten Taxis im Modell mit jenem des Datensatzes von 31300 ge-

genüber. Der Verlauf des Modells stimmt sehr gut mit den gemittelten Werten überein, wobei eine maximale Abweichung von einem Taxi festgestellt werden konnte. Zu Beginn der Simulation erkennt man eine konstante Anzahl an angemeldeten Taxis, die für acht Stunden unverändert bleibt und dem vorgegebenen Verlauf nicht folgt. Dies ist auf den eingeführten Modellparameter *Mindestdauer aktiv* (siehe Kapitel 3.1) zurückzuführen. Beim Start des Simulationsvorgangs wird die benötigte Anzahl an Fahrzeugen angemeldet, wobei aufgrund des Parameters eine Abmeldung vom System erst nach Ablauf von acht Stunden erfolgen kann. Dieser Umstand ist als Einschwingvorgang des Modells zu berücksichtigen. Vergleicht man die realen Zeitverläufe der Wochentage, die doppelt vorkommen (Freitag bis Dienstag, cyanfarbige Linie) aus diesen 11 Tagen, so sind nur geringe Unterschiede in den Werten erkennbar. Das bestärkt die Entscheidung, nachfolgende Analysen der Mobilitätsdaten auf Basis dieser Woche zu stellen.

Aus der 11-tägigen Simulation wurde nun eine ganze Woche extrahiert, um den Einfluss des Einschwingvorganges zu eliminieren. Die so gewonnenen Daten werden für die Analyse der Mobilitätsdaten in Kapitel 4 herangezogen. Der zeitliche Verlauf der angemeldeten Taxis im Vergleich mit den vorgegebenen Sollwerten und den tatsächlichen Werten aus dem Datensatz ist in Abbildung 3.11 dargestellt. Vergleicht man den gemittelten mit dem tatsächlichen Verlauf so, ist eine gute Übereinstimmung erkennbar. Bei den Werten der Tagesminima, den Anstiegen in den Morgenstunden sowie dem Absinken der Anzahl der angemeldeten Taxis treten keine nennenswerten Unterschiede auf. Lediglich bei den Tagesmaxima gibt es Abweichungen, wobei die größten am Montag und Sonntag auftreten.

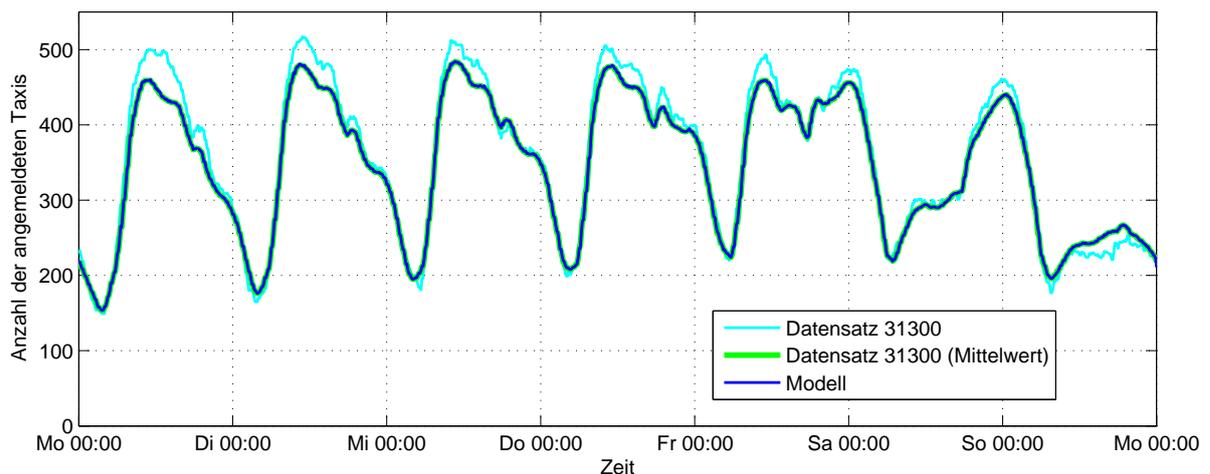


Abbildung 3.11: Vergleich des zeitlichen Verlaufes der am System angemeldeten Taxis, 7 Tage, Kalenderwoche 21 des Jahres 2011

Abbildung 3.12 zeigt die Aufteilung der angemeldeten Taxis in fahrende und wartende Fahrzeuge. Während in den Nachtstunden der Anteil der wartenden Taxis bei einem Drittel liegt, steigt dieser in den Tagesstunden auf die Hälfte an. Es stehen also zu jedem Zeitpunkt mehrere Taxis für Ladezwecke zur Verfügung, wobei an einigen innerstädtischen Taxistandplätzen mit höherem Fahrzeugaufkommen zu rechnen ist.

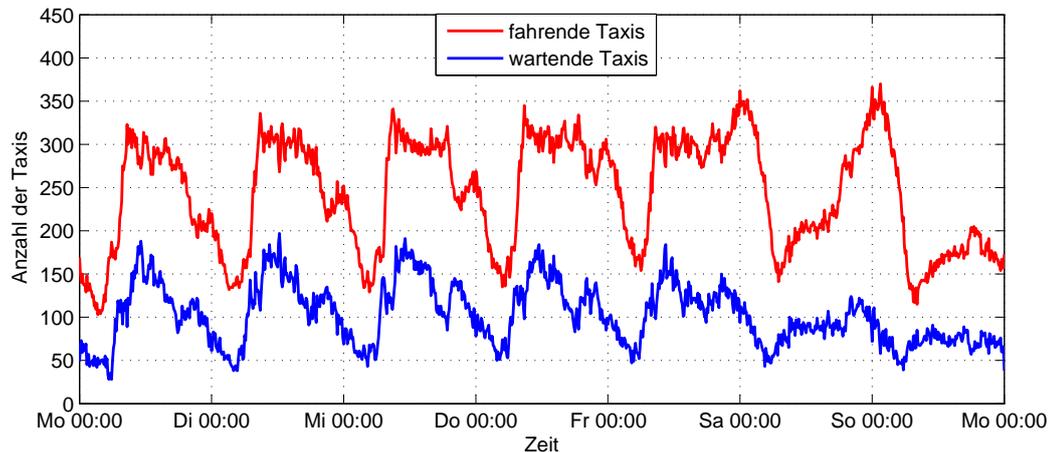


Abbildung 3.12: zeitlicher Verlauf der fahrenden und wartenden Taxis ,
7 Tage, Kalenderwoche 21 des Jahres 2011

Ein weiterer wichtiger Punkt zur Überprüfung des Modells ist die Häufigkeit, wie oft eine bestimmte Fahrt gewählt wurde (Abbildung 3.13). Da in der Modellierung diesbezüglich keine Einschränkung getroffen wurde, können einzelne Taxifahrten mehrmals oder von unterschiedlichen Fahrzeugen gewählt werden. Es zeigt sich, dass 91 % der Fahrten aus dem neuen Datensatz nur ein Mal verwendet worden sind. Einige Mehrfachauswahlen wurden getroffen, wobei die Werte mit 8 % bzw. unter 1 % vernachlässigt werden können.

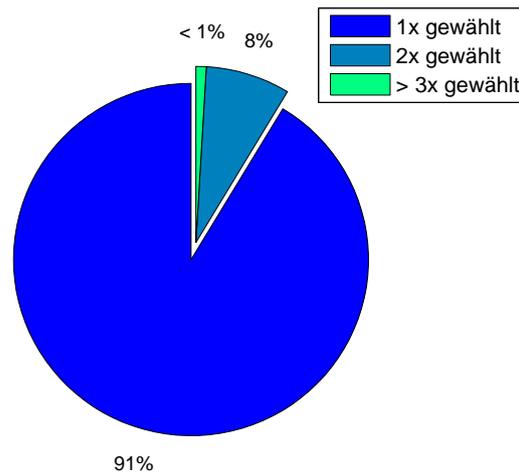


Abbildung 3.13: Anteil, wie oft eine Fahrt gewählt wurde

Das Übereinstimmen des Sollverlaufes (Mittelwert) mit dem Verlauf der Simulation bestätigt eine gute Funktionsweise der Ab- und Anmeldevorgänge. Auch der geringe Anteil an mehrfach ausgewählten Fahrten spricht für eine erfolgreiche Modellierung. Es ist jedoch noch nicht sichergestellt, dass die einzelnen Fahrten richtig aneinander gereiht oder jene Fahrten ausgewählt worden sind, die tatsächlich in diesem Zeitraum absolviert wurden. Um das zu überprüfen, werden die Häufigkeitsverteilungen einzelner Fahrtparameter des Modells mit jenen des zugrundeliegenden Datensatzes verglichen.

In den Abbildungen 3.14 und 3.15 sind die Häufigkeitsverteilungen der zwei wichtigsten Parameter für den Umstieg auf eine Elektrotaxiflotte gegenübergestellt. Bei der Wartezeit, die das Verweilen an einem Standplatz angibt, ist die größte Abweichung zwischen dem Modell und dem Datensatz bei einer Wartezeit zwischen fünf und 14 Minuten gegeben und beträgt 3%. Es zeigt sich, dass hier generell nur minimale Unterschiede auftreten. Dies ist ein Zeichen dafür, dass die Auswahl der Fahrten im neuen Datensatz gut getroffen und Fahrten gewählt wurden, die tatsächlich in dieser Woche absolviert worden sind oder ähnliche Fahrteigenschaften aufweisen.

Der Vergleich des Energieverbrauches zeigt ebenfalls sehr geringe Abweichungen zwischen den zwei Datensätzen von unter einem Prozent. Sowohl für die Wartezeit am Standplatz, als auch für den Energieverbrauch liegt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem originalen Datensatz und jenem, der durch das Modell generiert wurde, vor. Da diese beiden Fahrtparameter essentiell für Elektrofahrzeuge sind, kann von einer optimalen Basis für die Berechnung des Ladezustandes und dessen Verlauf ausgegangen werden.

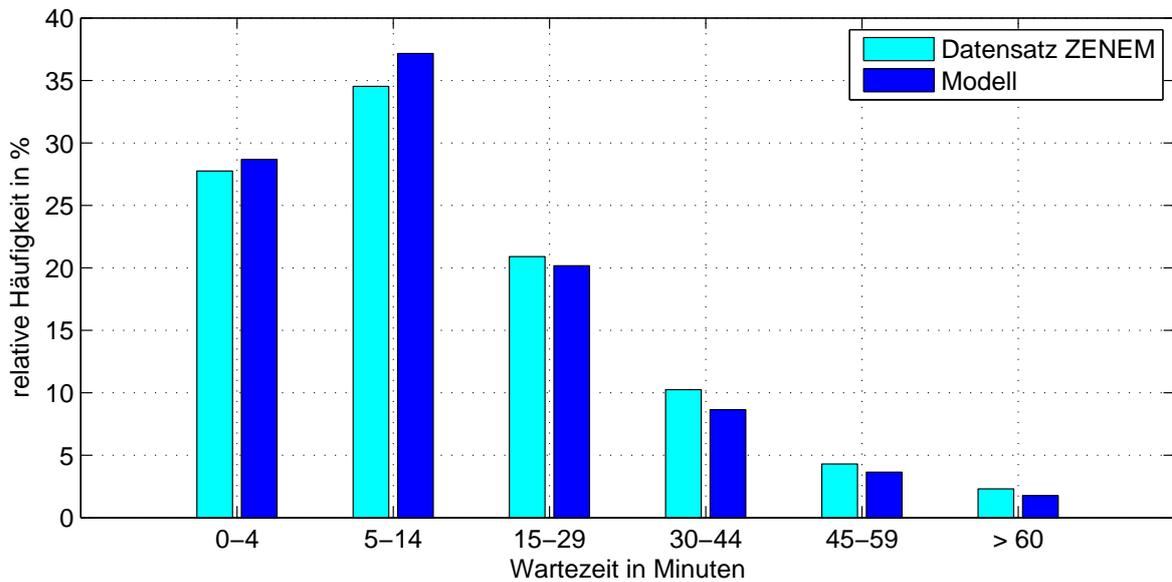


Abbildung 3.14: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Wartezeit je Fahrt zwischen Datensatz und Modell

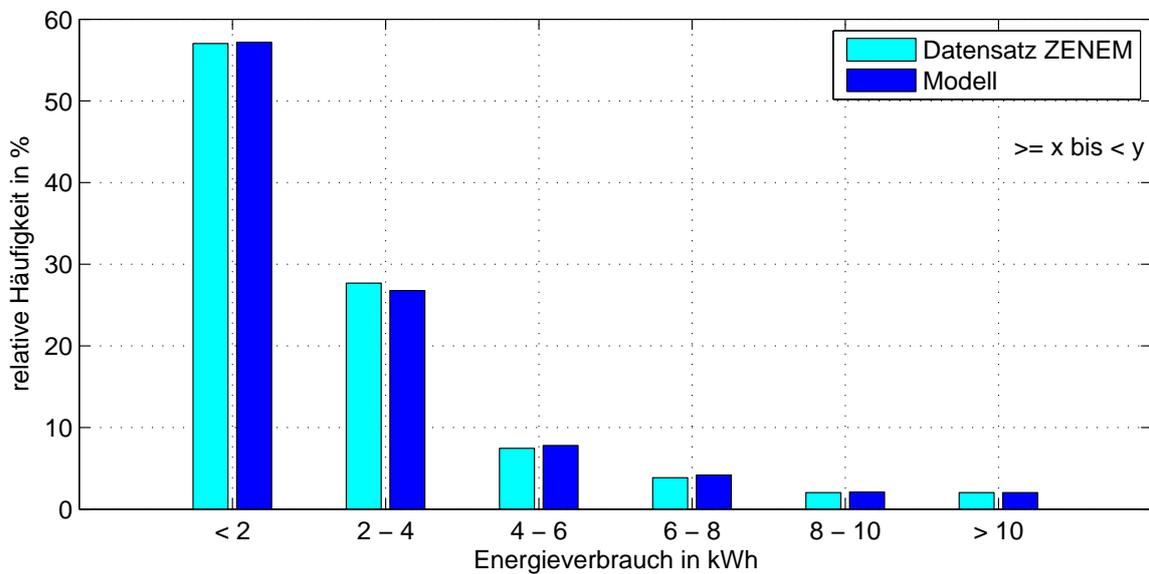


Abbildung 3.15: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen des Energieverbrauches je Fahrt zwischen Datensatz und Modell

3.3.1 Analyse des Fahrverhaltens der Taxis

Für den Umstieg von konventionellen Taxis auf Elektrotaxis ist es wichtig zu wissen, wie das Fahrverhalten der Fahrzeuge aussieht. In der Modellbildung wurden die Taxis unabhängig von ihren Fahrern modelliert. Wird ein Auto von mehreren Lenkern benutzt, so wird unterstellt, dass die Fahrerwechsel während der Standzeiten auf den Taxistandplätzen vollzogen werden. Bei der Analyse des Fahrverhaltens stellt sich die Frage, wie oft ein Fahrzeug in der Simulationswoche fährt und ob man daraus auf die Anzahl der Taxifahrer schließen kann.

Es zeigt sich, dass 79 Autos der Flotte (ca. 10%) in dieser Woche nie aktiv sind und keine Fahrten absolvieren. Eine Interpretation dieses Umstandes lässt auf Taxifahrer schließen, die Urlaub machen und das Auto in dieser Zeit nicht benutzen, oder Fahrzeuge, die sich in der Werkstatt befinden. Außerdem sind zu Spitzenzeiten nur etwas mehr als 500 Fahrzeuge am System angemeldet, der Rest der Flotte pausiert hier ohnehin.

Die 746 aktiven Taxis führen in der Simulation 2119 Taxischichten durch. Jede Schicht ist durch eine anschließende inaktive Phase, die durchschnittlich mehrere Stunden dauert, gekennzeichnet. Betrachtet man die Dauer einer Schicht (siehe Abbildung 3.16), so stellt sich heraus, dass sehr viele Fahrten der Taxis durchgehend aneinander gereiht wurden und somit hohe Zeitspannen vorliegen, bevor das Fahrzeug vom System abgemeldet wird. Dies unterstreicht die Annahme, dass ein Auto nicht nur von einem Lenker benutzt wird. Geht man von einer Normalarbeitszeit von acht Stunden aus, so würden sich durchschnittlich drei Fahrer ergeben. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Annahme, dass sich die Arbeitszeit eines Taxifahrers auf 12 Stunden verlängert. Dadurch kann ein Taxi abwechselnd von zwei Taxilenker genutzt werden und ist durchgehend am System angemeldet. Die Fahrzeuge sind somit die meiste Zeit im Einsatz, wodurch sich auch Investitionskosten schneller amortisieren. 5% der Schichten haben eine Dauer von unter acht Stunden. Da die Daten einer Woche aus einer 11-tägigen Simulation extrahiert worden sind, wurden einige Taxischichten abgeschnitten und nur ein Teil in den neuen Datensatz übernommen.

Einen Überblick, wie viele Schichten von einem Fahrzeug absolviert werden, gibt Abbildung 3.17. Etwas mehr als die Hälfte der Fahrzeuge kann mindestens drei Taxischichten vorweisen, wobei die Dauer jeder einzelnen Schicht teilweise mehrere Stunden bis zu mehreren Tagen beträgt. Bei der Durchführung von mehreren Simulationen mit unterschiedlichen Werten für die Parameter *Mindestdauer aktiv* und *Mindestdauer inaktiv*, hat sich gezeigt, dass deren Einfluss auf die Anzahl der Schichten und ihrer Dauer nicht

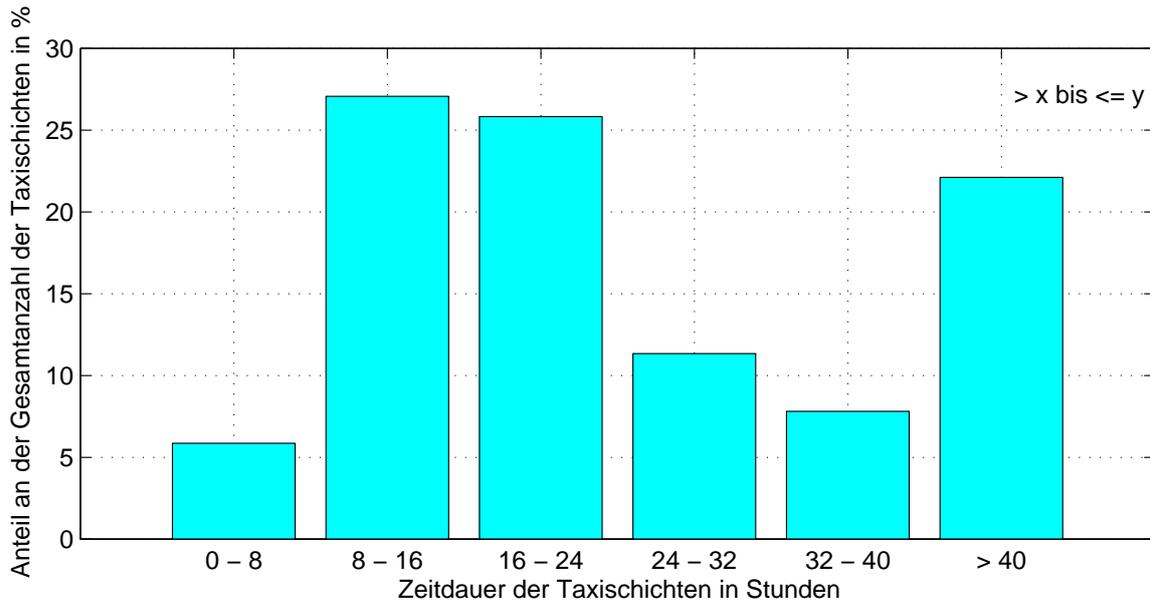


Abbildung 3.16: Zeitdauer der Taxischichten aller aktiven Fahrzeuge

sehr groß ist. In dem Modell ist der zeitliche Verlauf der am System angemeldeten Taxis jene Größe, die nachgebildet werden soll. Daher werden auch die Fahrzeuge primär nach diesen Sollwerten an- oder abgemeldet. Nachdem aus dem originalen Datensatz keine weiteren Informationen vorlagen, wie Taxischichten in der Realität absolviert werden, wird die Anzahl und Dauer nur bedingt berücksichtigt. Für Elektrofahrzeuge ist der Umstand mehrerer Fahrten ohne längere Unterbrechungen eine große Hürde, da sonst nur auf den Standplätzen geladen werden kann und diese Zeitspannen eher kurz sind. Aus dieser Sicht bildet der neu Datensatz durch die langen Wegketten eine anspruchsvolle Ausgangssituation für Elektrofahrzeuge.

Abschließend kann behauptet werden, dass die Modellierung ein gutes Ergebnis erzielt und sämtliche Häufigkeitsverteilungen mit jene des ursprünglichen Datensatzes sehr gut übereinstimmen. Lediglich bei der Anzahl der Taxischichten und deren Dauer liegen keine optimalen Ergebnisse vor, wobei der Vergleich mit der Realität nur auf Basis von Vermutungen getätigt werden kann. Nachdem bei einem Modellierungsprozess die Realität nie exakt abgebildet werden kann und von einem gewissen Fehlermaß ausgegangen wird, sind die auftretenden Ungenauigkeiten akzeptabel. Ob durch das Modell die einzelnen Fahrten in der Reihenfolge aneinander gereiht wurden, in der sie tatsächlich durchgeführt worden sind und auch die Zuordnung zu einem Taxi stimmt, kann nicht überprüft und damit beantwortet werden. Die Gegenüberstellung der einzelnen Parameter zeigt jedoch, dass die gesamte Taxiflotte gut nachgebildet wurde und darauf

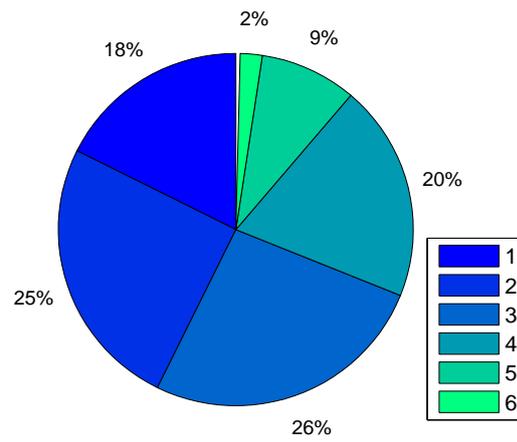


Abbildung 3.17: Häufigkeitsverteilung der Taxischichten, bezogen auf die aktive Flotte aufbauend die Erfüllbarkeit der Mobilität bei einem Umstieg auf Elektroautos analysiert werden kann.

4 Analyse der Mobilitätsdaten - Umstieg auf Elektroautos

In diesem Abschnitt wird anhand des neu generierten Datensatzes ein Umstieg auf batteriebetriebene Elektroautos geprüft und genauer analysiert. Durch das entwickelte Modell werden die einzelnen Taxifahrten neu geordnet und abhängig von statistischen Parametern aneinander gereiht. Der Vergleich zwischen dem Modell und der Datengrundlage des Taxivermittlungsunternehmens 31300 bestätigt eine gute Übereinstimmung zwischen den zeitlichen Verläufen der am System angemeldeten Taxis und den Fahrtparametern. Es kann also von einer guten Datenbasis ausgegangen und mit realitätsnahen Aussagen über die Erfüllung der Mobilität gerechnet werden.

Ausgangsbasis für die Untersuchung des Umstiegs auf Elektrotaxis bildet der Datensatz mit den Fahrtdaten von einer gesamten Woche (siehe Kapitel 3.3), auf dessen Basis alle Berechnungen des SOC durchgeführt werden. Die einzelnen Batterieladestände vor und nach den einzelnen Taxifahrten bzw. nach den Ladephasen werden nach dem in Kapitel 3.2.4, Ermittlung der einzelnen SOC-Werte, beschriebenen Vorgang berechnet. Dabei können die Ladeparameter (Ladeleistung, Anzahl der Standplätze mit Lademöglichkeit) sowie die Größe der Batteriekapazität variiert werden, um den Einfluss auf die Taxis beziehungsweise auf deren SOC zu untersuchen.

Die Aussage, in welchem Ausmaß die Mobilität durch die Elektrotaxis erfüllt wird, gibt die Mobilitätserfüllbarkeitsrate an. Absolviert ein Taxi alle Wegstrecken in der Simulationsdauer, ohne die SOC-Grenze von $SOC_{min} = 5\%$ zu unterschreiten, so wird die Mobilität als erfüllt gewertet. Die Summe dieser Fahrzeuge, bezogen auf die gesamte Taxiflotte, ergibt die Erfüllbarkeitsrate der Taxis. Bei längeren Einzelfahrten kann es vorkommen, dass die Batteriekapazität nicht ausreicht, um sie absolvieren zu können. Damit ist das Taxi als „nicht erfüllt“ zu werten, obwohl dies vielleicht die einzige Fahrt ist, die nicht absolviert werden kann. Um diesen Umstand zu berücksichtigen, werden die einzelnen Taxischichten ebenfalls auf Erfüllbarkeit geprüft und die Erfüllbarkeitsrate

der Taxischichten berechnet. Dafür werden alle „erfüllten“ Taxischichten der gesamten Flotte summiert und auf die Gesamtzahl aller Taxischichten bezogen. Der Heranziehung der einzelnen Schichten als Indikator, ob die Mobilität erfüllt wird oder nicht, ist auf jeden Fall mehr Bedeutung zuzurechnen als der Erfüllbarkeit ganzer Taxis. Aufgrund der Aneinanderkettung mehrere Fahrten und den teilweise großen Distanzen zwischen den Standplätzen ist die Wahrscheinlichkeit sehr hoch, dass einzelne Fahrten nicht erfolgreich absolviert werden können oder Wegketten „unglücklich“ gebildet wurden. Daher ist die Erfüllbarkeitsrate der Taxis ein sehr strenges Maß und wird im Allgemeinen nicht außerordentlich hoch ausfallen. Dies heißt jedoch nicht, dass die Mobilität generell nicht gut erfüllt werden kann.

Zu Beginn der Analyse werden Ladeparametervariationen durchgeführt, um die Sensitivität und die Auswirkungen einzelner Parameter auf die Erfüllbarkeit der Mobilität zu ermitteln. Aus den gewonnenen Erkenntnissen werden 3 Szenarien definiert, die den Umstieg auf eine Elektrotaxiflotte und die Integration von Ladestationen an den Taxistandplätzen detaillierter untersuchen. Abschließend werden die Schlussfolgerungen aufgezeigt, die aus den einzelnen Parametervariationen und den Szenarien gezogen werden können. Die in der Zielsetzung, Kapitel 1.2, gestellten Fragen können schließlich dadurch beantwortet werden.

4.1 Parametervariationen

Im Folgenden werden verschiedene Parametervariationen durchgeführt, wobei jeweils ein bestimmter Ladeparameter variiert und dessen Auswirkungen auf die Erfüllbarkeitsraten aufgezeigt wird. Da die einzelnen Parameter eine sehr starke Abhängigkeit untereinander aufweisen und sich gegenseitig beeinflussen, werden pro Variation zwei Szenarien gegenübergestellt. Dies soll einen besseren Überblick über die Einflüsse der Berechnungsparameter geben und jene Parameterkombinationen ermitteln, die hohe Erfüllbarkeitsraten ergeben.

Folgende Parameter und deren Auswirkungen werden untersucht:

- Batteriekapazität
- Anzahl der Standplätze mit Lademöglichkeit
- Ladeleistung an den Standplätzen
- Ladeleistung in der inaktiven Phase

Bei der Auswahl der Werte für die unterschiedlichen Parameter wurde keine Rücksicht auf wirtschaftliche und finanzielle Aspekte genommen. Auch die technische Machbarkeit ist nur bei den Werten der Parameter selbst berücksichtigt. Die Integration der Ladeleistungen und Batteriekapazitäten in ihr Umfeld (Einbindung in das Verteilnetz, Einbau der Batterie in das Fahrzeug) wird vernachlässigt. Es soll lediglich aufgezeigt werden, welche Erfüllbarkeitsraten mit den verschiedenen Parameterkombinationen möglich sind.

4.1.1 Variation der Batteriekapazität

Bei dieser Parametervariation werden die Auswirkungen der Batteriekapazität analysiert. Ausgehend von einer Batterie mit einem Energieinhalt von 24 kWh, die im Automodell Nissan Leaf eingebaut ist¹, wird die Kapazität schrittweise bis 85 kWh erhöht. Tesla Motors bietet sein Automodell Model S mit Batteriekapazitäten von 60 kWh und 85 kWh an², womit auch die hohen Kapazitätswerte nach dem heutigen Stand der Technik serienreif verfügbar sind. Bei den zwei Varianten wird zusätzlich die Ladeleistung an den Standplätzen variiert und mit 3,67 kW und 50 kW angenommen.

Variante A - Normalladung

- Variable Batteriekapazität (24 - 85 kWh)
- Lademöglichkeit an allen Taxistandplätzen
- Ladeleistung an den Standplätzen 3,67 kW
- Ladeleistung in den inaktiven Phasen 3,67 kW

¹für nähere Informationen siehe [7]

²für nähere Informationen siehe [6]

Variante B - Schnellladung

- Variable Batteriekapazität (24 - 85 kWh)
- Lademöglichkeit an allen Taxistandplätzen
- Ladeleistung an den Standplätzen 50 kW
- Ladeleistung in den inaktiven Phasen 3,67 kW

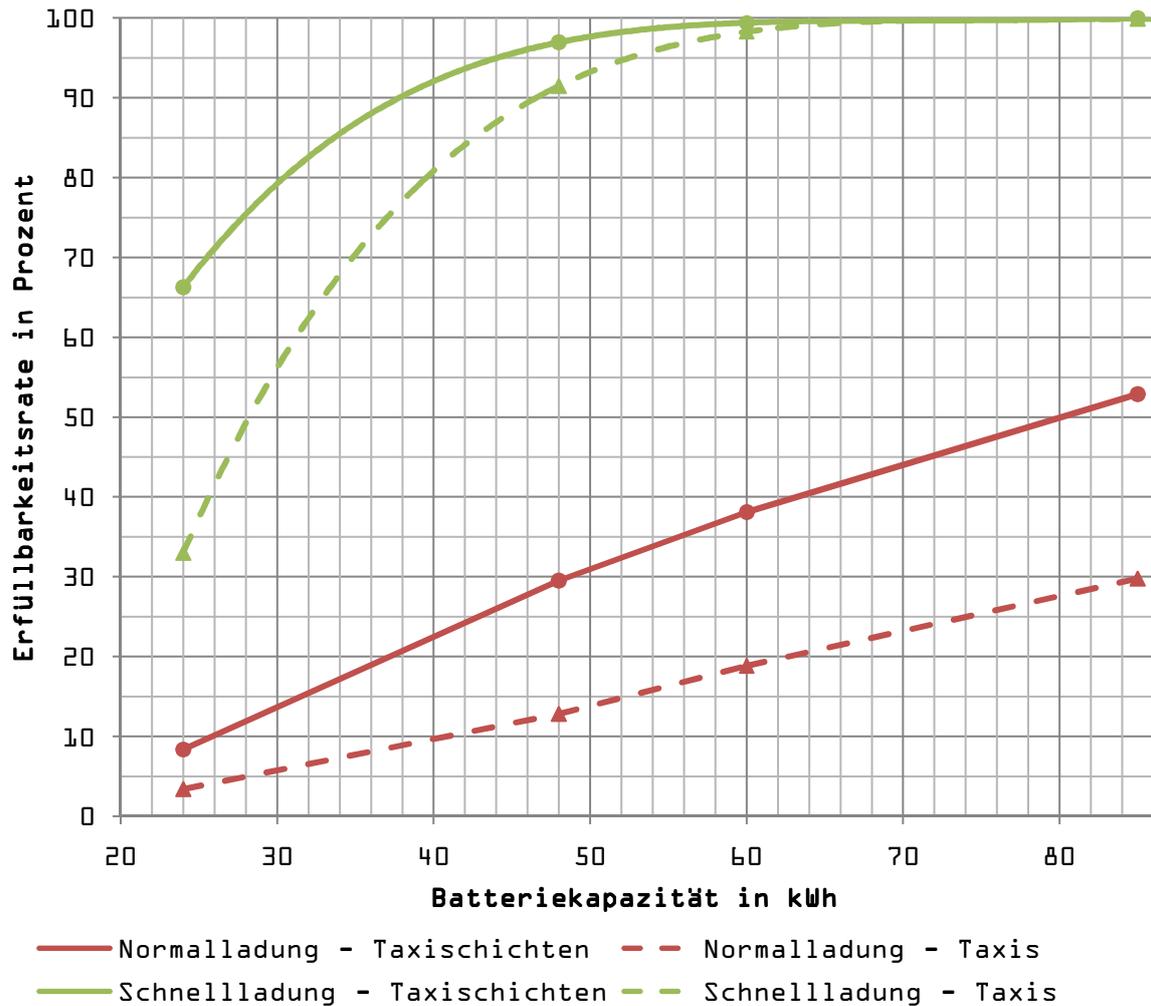


Abbildung 4.1: Erfüllbarkeitsraten der Mobilität in Abhängigkeit von der Batteriekapazität

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abbildung 4.1 mit der Gegenüberstellung der beiden Szenarien dargestellt. Betrachtet man Variante A (Normalladung) mit der geringen Ladeleistung an den Standplätzen, zeigt sich ein annähernd linearer Anstieg der Erfüllbarkeitsraten, wobei die Steigung bei größeren Batteriekapazitäten etwas abnimmt. Durch Verdoppelung der Kapazität im unteren Bereich (von 24 kWh auf 48 kWh) wird

eine Verdreifachung der „erfüllten“ Taxischichten erreicht, da nun auch längere Taxifahrten erfolgreich absolviert werden können. Es zeigt sich jedoch, dass hohe Batteriekapazitäten nur dann Vorteile bringen, wenn eine entsprechend hohe Ladeleistung zur Verfügung gestellt wird. Trotz eines sehr großen Energiespeichers von 85 kWh kann die Erfüllbarkeitsrate der Taxischichten nur auf etwas mehr als 50 Prozent gesteigert werden. Vergleicht man die Ergebnisse von Variante A (Normalladung) mit jenen von Variante B (Schnellladung), so lässt sich das volle Potential der unterschiedlichen Batteriekapazitäten erkennen. Auch bei der kleinsten Kapazität von 24 kWh können circa 65 Prozent der Taxischichten erfolgreich absolviert werden, was einem sehr guten Wert entspricht. Durch Erhöhung der speicherbaren Energie kann die Erfüllbarkeitsrate auf 100 Prozent gebracht werden und jedes Taxi kann somit alle seine Fahrten mit Elektroantrieb durchführen. Für die vorgegebene Ladeleistung von 50 kW haben beide Erfüllbarkeitsraten bei einer Batteriekapazität von 60 kWh die 100 Prozent Marke fast erreicht. Eine weitere Vergrößerung des Batteriespeichers entfällt somit und bringt keine Verbesserung. Werden anfallende Investitionskosten berücksichtigt, wäre eine Batteriegröße von 48 kWh vorzuziehen, da die Kosten wesentlich gesenkt werden könnten und die Erfüllbarkeitsraten trotzdem noch einen ausreichend hohen Wert aufweisen würden. Fasst man die Ergebnisse dieser Parametervariation zusammen, so zeigt sich, dass ausreichend hohe Batteriekapazitäten die Basis für einen Umstieg auf Elektrofahrzeuge bilden. Zusätzlich muss jedoch auch eine gute Ladeinfrastruktur mit höheren Ladeleistungen zur Verfügung stehen, um das volle Potential ausschöpfen zu können.

4.1.2 Variation der Anzahl der Taxistandplätze mit Ladestationen

Der Ausbaugrad der Ladeinfrastruktur ist ein wichtiger Einflussfaktor auf die Erfüllbarkeit der Mobilität und wird in diesem Kapitel näher untersucht. In Variante C (TSP) wird die Anzahl der Taxistandplätze mit Lademöglichkeit kontinuierlich erhöht. Alle Standplätze sind nach ihrer Anfahrhäufigkeit sortiert und werden beginnend mit dem meist angefahrenen Platz ausgewählt. Da die Installation von Ladestationen ein sehr kostenintensives Vorhaben ist, muss ein möglichst effektiver Ausbau stattfinden. Es wird angestrebt, die Anzahl der umzurüstenden Standplätze aus Kostengründen möglichst gering zu halten, die Erfüllbarkeitsraten jedoch zu maximieren.

In den inneren Wiener Gemeindebezirken existieren viele Taxistandplätze, die nahe beieinander liegen. Es liegt daher auf der Hand, diese Standplätze zusammenzufassen, um somit den Ausbau kosteneffektiver realisieren zu können. Zu diesem Zweck wurde im

Projekt ZENEM eine Clusterung³ nahe beisammen liegender Standplätze durchgeführt. Dafür wurde die Straßenkarte in wabenförmige Cluster von einem Kilometer Durchmesser unterteilt und alle Taxistandplätze, die sich in einem Cluster befinden, zusammengefasst. Anschließend reihte ein Ranking die definierten Cluster nach ihrer Wichtigkeit. Aufgrund der Zusammenfassung mehrerer Standplätze ergeben sich zusätzliche Wegstrecken, die sich jedoch im Mittel aufheben und somit vernachlässigt werden können. Da die durchgeführte Clusterung und das Ranking auf den Wegketten des originalen Datensatzes von 31300 basieren, können Abweichungen in der Reihung der Cluster vorhanden sein. Da sich die Anfahrtshäufigkeit eines Taxistandplatzes (TSP) über das gesamte Jahr gesehen nicht stark ändern sollte und die Simulationswoche als repräsentativ erachtet wurde, wird davon ausgegangen, dass das Ranking seine Gültigkeit beibehält und keinen nennenswerten Einfluss auf die Erfüllbarkeitsraten hat. Die Clusterung wurde somit von ZENEM übernommen, in Variante D berücksichtigt und die Ergebnisse Variante C gegenübergestellt.

Variante C - TSP

- Variable Anzahl an Taxistandplätzen mit Ladestationen (0 - 256)
- Batteriekapazität 24 kWh
- Ladeleistung an den Standplätzen 50 kW
- Ladeleistung in den inaktiven Phasen 3,67 kW

Variante D - TSP-Clusterung

- Variable Anzahl an Clustern mit Ladestationen (0 - 139)
- Batteriekapazität 24 kWh
- Ladeleistung an den Standplätzen 50 kW
- Ladeleistung in den inaktiven Phasen 3,67 kW

Der Vergleich der beiden Varianten ist in Abbildung 4.2 zu sehen. Es zeigt sich, dass auch ohne Lademöglichkeit an den Standplätzen ein geringer Prozentsatz der Taxis ihre Wegketten erfolgreich absolvieren können. Das sind jene Fahrzeuge, die während der Simulationsdauer nur einige wenige Fahrten getätigt haben und somit eine Batterieladung ausreichend ist. Wie erwartet, steigen mit Zunahme der Taxistandplätze die Erfüllbarkeitsraten an, wobei die Kurven in Sättigung gehen, da die Anzahl an Stand-

³Die genaue Vorgehensweise kann in [2, Seite 28-29] nachgeschlagen werden.

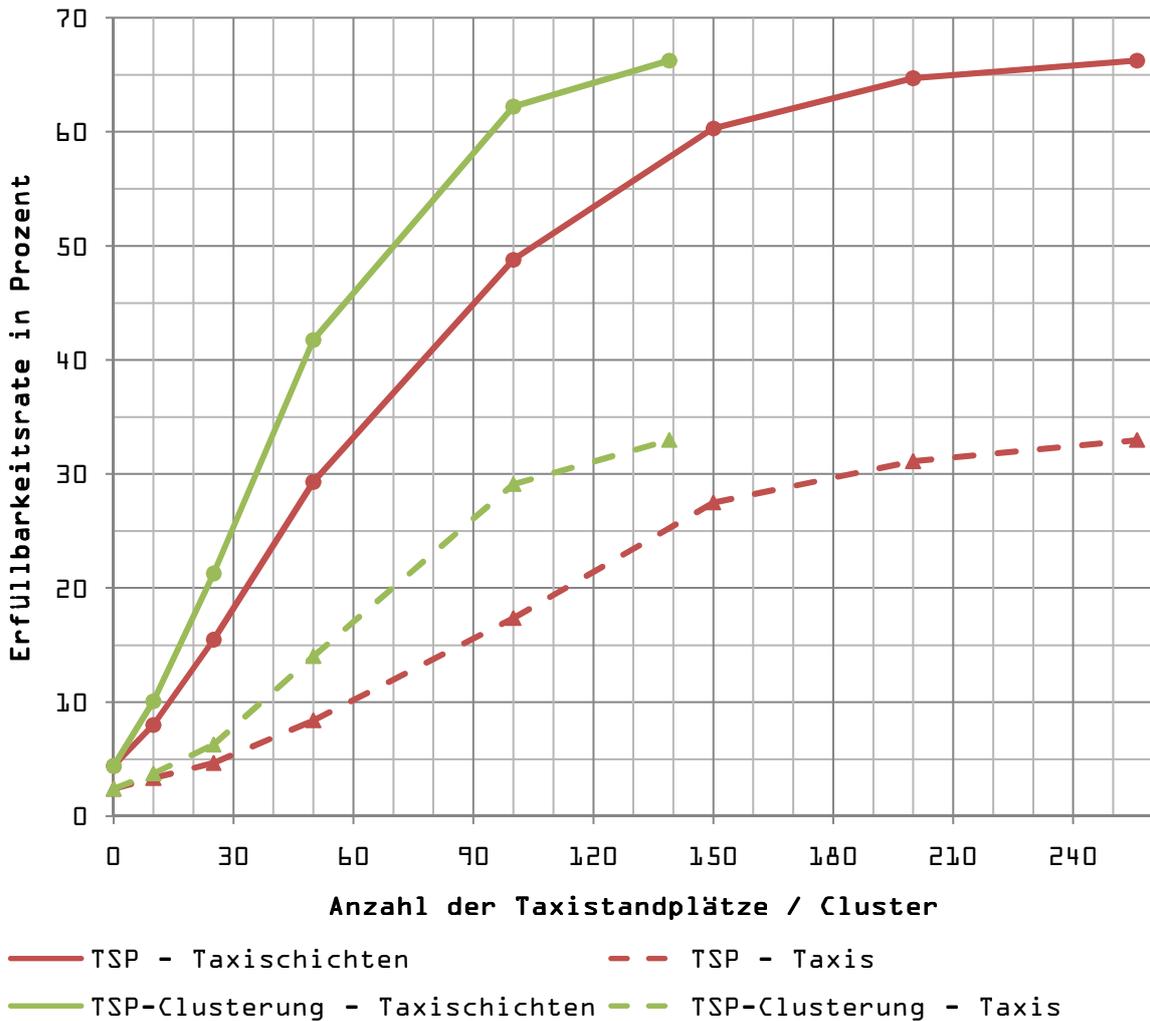


Abbildung 4.2: Erfüllbarkeitsraten der Mobilität in Abhängigkeit von der Anzahl der Standplätze mit Lademöglichkeit

plätzen begrenzt ist. Will man die Erfüllbarkeitsraten über den Maximalwert von 66 % beziehungsweise 33 % erhöhen, so kann dies nur mit der Veränderung der verbleibenden Ladeparameter geschehen. Durch die Erhöhung der Anzahl an Lademöglichkeiten können immer mehr Taxischichten erfolgreich absolviert werden. Die Erfüllbarkeitsrate der Taxis selbst steigt nur sehr langsam. Hier zeigt sich, dass die verwendete Batteriekapazität völlig ausgeschöpft wird und begrenzend wirkt.

Die Auswirkungen der Clusterung beieinander liegender Standplätze werden in Variante D (TSP-Clusterung) untersucht und durch die grünen Kurven repräsentiert. Hier zeigt sich, dass bei gleicher Anzahl generell höhere Erfüllbarkeitsraten erreicht werden können. Die Unterschiede sind bei geringem Infrastrukturausbau bei wenigen Prozent und vergrößern sich zwischen 50 und 100 Lademöglichkeiten auf fast 15 %. Da aufgrund der Abnahme der Standplatzdichten in den äußeren Bezirken nicht alle Taxistandplätze

einem Cluster mit mehreren Standplätzen zugeordnet werden können, flachen die Erfüllungsraten ab, da hier nur noch einzelne Plätze mit Ladestationen ausgerüstet werden können. Bei 139 Clustern ist die maximale Standplatzanzahl von 256 erreicht und somit auch die Grenzen der Erfüllbarkeit durch die Variation der Taxistandplätze mit Ladeinfrastruktur.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist ein Infrastrukturausbau aller Standplätze nicht empfehlenswert, da die Zuwächse mit steigender Anzahl der Taxistandplätze immer geringer ausfallen. Eine Umrüstung von mehr als 150 Ladestationen in Variante C (TSP) ist somit nicht anzustreben. Die Berücksichtigung der Clusterung hat auf jeden Fall einen großen Vorteil, da mit weniger umgerüsteten Standplätzen die gleichen Erfüllungsraten erzielt werden können. Bezogen auf die erreichbaren Raten würde ein sinnvoller Maximalausbau, wie in Abbildung 4.2 ersichtlich, auf 100 geclusterte Standplätze begrenzt sein und reduziert die Anzahl aus Variante C (TSP) um ein Drittel. In dem vorliegenden Modell und den Berechnungen werden an jedem Standplatz ausreichend Lademöglichkeiten vorausgesetzt. Für die Zusammenlegung von mehreren Standplätzen muss jedoch sichergestellt sein, dass das erhöhte Aufkommen an Taxis auch bewältigt werden kann. Die Sicherstellung dieser Forderung lässt sich prinzipiell durch die Vermittlungsgesellschaften erreichen. So können die Fahrzeuge an jene Plätze verwiesen werden, an denen es momentan keine Platzprobleme gibt und freie Ladestationen zur Verfügung stehen.

Die vorliegende Parametervariation zeigt, dass für den Umstieg auf Elektrotaxis eine gut ausgebaute Ladeinfrastruktur vorhanden sein muss. Um akzeptable Erfüllungsraten der Taxischichten von mindestens 50 % zu erreichen, ist die Umrüstung von 100 Taxistandplätzen unumgänglich. Durch Zusammenlegung von nahe beieinander liegenden Standplätzen lässt sich bei diesem Ausbaugrad die Erfüllungsrate auf 63 % erhöhen (Variante D (TSP-Clusterung)) oder bei gleichbleibender Erfüllungsrate die Standplatzanzahl auf 70 reduzieren. Aufgrund von langen Fahrtstrecken und ungünstiger Aneinanderreihung längerer Fahrten ist die Anzahl jener Taxis gering, die alle Fahrten erfolgreich absolvieren. Hier kann auch mit einem Vollausbau aller Standplätze nicht mehr als 33 % erreicht werden.

4.1.3 Variation der maximalen Ladeleistung an den Taxistandplätzen

Die Ladeleistung ist ein weiterer wichtiger Parameter, der die Erfüllbarkeit der Mobilität beeinflusst. Deren Auswirkung wird in zwei verschiedenen Szenarien mit unterschiedlichen Batteriekapazitäten analysiert, wobei auf jedem Taxistandplatz das Fahrzeug geladen werden kann. In den inaktiven Phasen stehen den Taxis Lademöglichkeiten mit 3,67 kW zur Verfügung.

Ausgehend von einer einphasigen Ladeleistung von 3,67 kW wird die Leistung bis zu einem Wert von 120 kW erhöht. Dieser Grenzwert wurde bewusst gewählt, da dieser Leistungswert heute technisch möglich ist und auch Ladestationen mit dieser Ladeleistung existieren⁴. Es ist jedoch zu erwähnen, dass durch die hohen Leistungen sehr komplexe Vorgänge in den Batterien ablaufen und für die hier durchgeführten Berechnungen der Batterieladezustände ein sehr einfaches Batteriemodell mit I-U-Ladung zu Grunde liegt (siehe Kapitel 3.2.4). Etwaige Probleme mit der Wärmeabgabe aufgrund der Ladeverlustleistung oder Änderungen bei den chemischen Vorgängen bleiben somit unberücksichtigt.

Variante E - 24 kWh

- Variable Ladeleistung an den Taxistandplätzen (3,67 - 120 kW)
- Batteriekapazität 24 kWh
- Lademöglichkeit an allen Taxistandplätzen
- Ladeleistung in den inaktiven Phasen 3,67 kW

Variante F - 48 kWh

- Variable Ladeleistung an den Taxistandplätzen (3,67 - 120 kW)
- Batteriekapazität 48 kWh
- Lademöglichkeit an allen Taxistandplätzen
- Ladeleistung in den inaktiven Phasen 3,67 kW

Die Gegenüberstellung der beiden Varianten mit der variablen Ladeleistung ist in Abbildung 4.3 zu sehen. Es zeigt sich ein sehr deutlicher Unterschied in den Erfüllbarkeitsraten

⁴Die amerikanische Firma Tesla Motors betreibt in Nordamerika ein Netz an Hochleistungsladestationen, das in naher Zukunft landesweit ausgebaut wird [6].

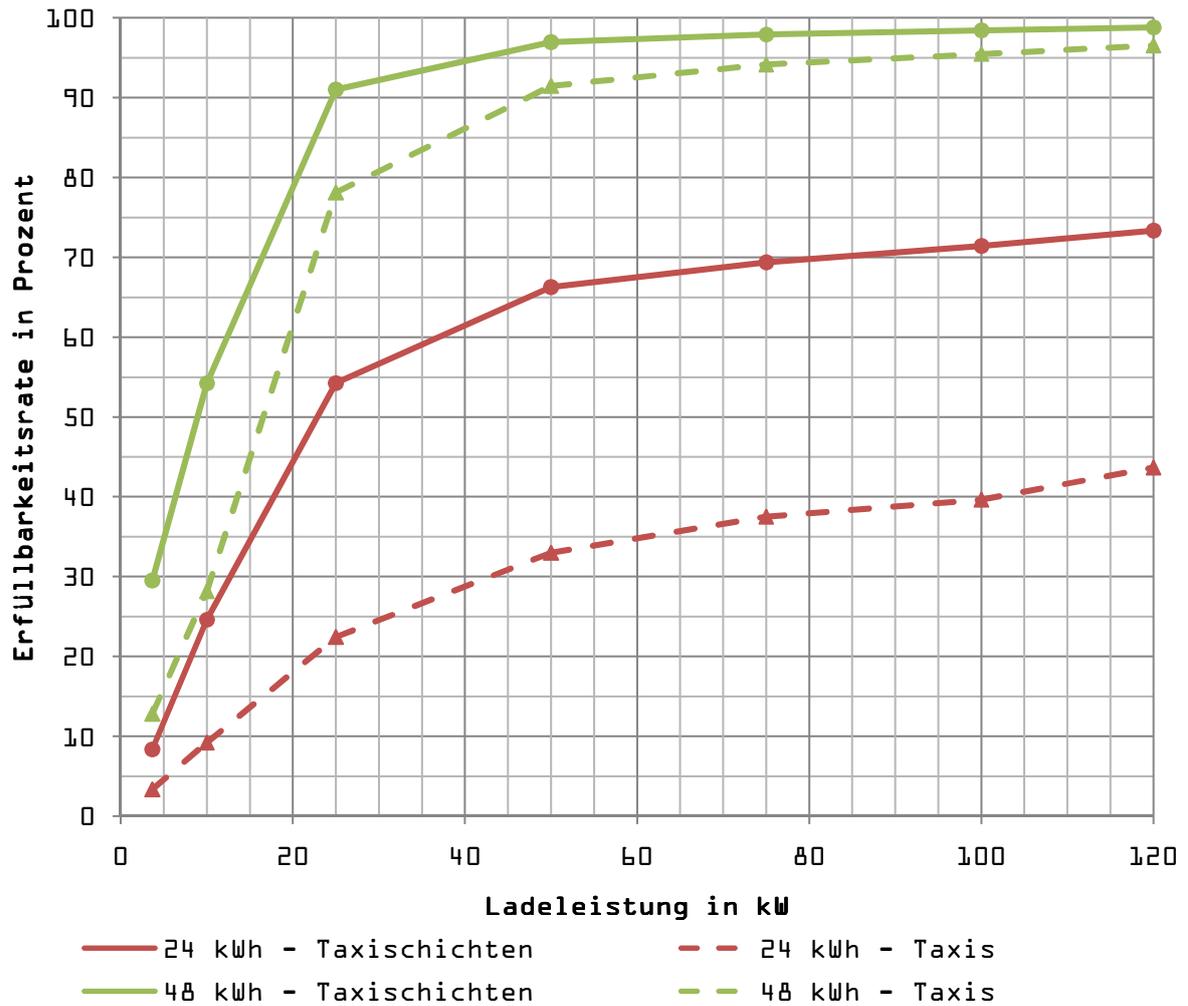


Abbildung 4.3: Erfüllbarkeitsraten der Mobilität in Abhängigkeit von der maximalen Ladeleistung an den Standplätzen

aufgrund der unterschiedlichen Batteriekapazitäten. Während durch die Verdopplung des Energiespeichers zwischen 20 und 30 Prozent mehr Taxischichten „erfüllt“ werden können, ist der Unterschied beim Erfüllungsgrad der Taxis mit fast 60% bei höheren Ladeleistungen sehr beachtlich. Dies ist auf die geringe Batteriekapazität von 24 kWh und der Anforderung zurückzuführen, alle Fahrten erfüllen zu müssen.

Betrachtet man den Verlauf der Kurven, so kann man einen steilen Anstieg bei geringen Ladeleistungen erkennen, wodurch ein Umstieg auf ein Schnellladesystem mit ausreichender Leistung auf jeden Fall angestrebt werden sollte. Allerdings werden die Zuwächse bei den Erfüllbarkeitsraten immer geringer und machen eine weitere Erhöhung der Leistung überflüssig. Werden Fahrzeuge mit einer Batteriekapazität von 24 kWh eingesetzt, wäre eine Ladeleistung von 50 kW völlig ausreichend, um fast 70% aller Taxischichten erfolgreich absolvieren zu können.

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass in Variante F (48 kWh) bei einer Leistung von 25 kW der Prozentsatz an erfüllten Taxischichten über 90 % liegt und somit zufriedenstellend ist. Durch Vergrößerung der Leistung steigt die Erfüllbarkeitsrate noch etwas an; 100 % können trotzdem nicht erreicht werden. Dies ist auf einige wenige sehr lange Fahrtstrecken zurückzuführen, die einen Energieverbrauch von mehr als 48 kWh aufweisen.

Zusammenfassend lässt sich aus der Variation der Ladeleistung feststellen, dass durch deren Erhöhung die Erfüllbarkeitsraten signifikant erhöht werden können. Es zeigt sich jedoch auch, dass bei sehr großen Ladeleistungen der Zuwachs an erfolgreich absolvierten Taxischichten beziehungsweise Taxis immer geringer wird und daher aus wirtschaftlicher Sichtweise solche Ladestationen nicht zielführend sind. Durch Vergrößerung der Energiespeicher in den Fahrzeugen kann die Ladeleistung reduziert werden, um dieselbe Erfüllbarkeit der Mobilität zu erreichen. Allerdings muss bedacht werden, dass bei beiden Varianten jeder Taxistandplatz mit Ladestationen ausgerüstet ist. Somit verteilt sich die benötigte Ladeenergie- und -leistung auf mehrere Standorte. Wird die Anzahl verringert, können an Plätzen mit hoher Fahrzeugfluktuation durch die größeren Batteriekapazitäten große Leistungsspitzen auftreten, die das Verteilnetz belasten. Um dies zu verhindern, können die Ladevorgänge gesteuert ausgeführt und Spitzen in der Leistungsbereitstellung gezielt vermieden werden.

4.1.4 Variation der maximalen Ladeleistung in der inaktiven Phase

Sind die Taxis nicht am Vermittlungssystem angemeldet, so befinden sie sich in einer inaktiven Phase und tätigen keine Kundenfahrten. Diese Zeitspanne bietet sich daher optimal für die Ladung der Batterie an. In dieser Parametervariation wird der Einfluss der maximalen Ladeleistung auf die Erfüllbarkeitsraten untersucht, wobei zwei Szenarien mit unterschiedlichen Batteriekapazitäten gegenübergestellt werden. Um das Ergebnis durch Wechselwirkungen mit den Ladestationen auf den Taxistandplätzen nicht zu verfälschen, werden diese Lademöglichkeiten deaktiviert und ausschließlich ein Laden in den inaktiven Phasen ermöglicht.

Variante G - 24 kWh

- Variable Ladeleistung in der inaktiven Phase (0 - 25 kW)
- Batteriekapazität 24 kWh
- keine Lademöglichkeit an den Taxistandplätzen

Variante H - 48 kWh

- Variable Ladeleistung in der inaktiven Phase (0 - 25 kW)
- Batteriekapazität 48 kWh
- kein Lademöglichkeit an den Taxistandplätzen

Das Ergebnis der Analyse ist in Abbildung 4.4 zu sehen. Es zeigt sich sehr deutlich, dass in Variante G (24 kWh) bei einer Batteriekapazität von 24 kWh die Erfüllbarkeitsraten annähernd konstant sind und durch Erhöhung der maximalen Ladeleistung nicht nennenswert beeinflusst werden können. Durch die Dauer der inaktiven Phase von durchschnittlich mehreren Stunden, kann die Batterie auch mit der geringen Ladeleistung von 3,67 kW vollständig geladen werden. Es wird dadurch jede neue Taxischicht mit einem maximal aufgeladenen Energiespeicher begonnen und die Erfüllbarkeit kann nur durch Lademöglichkeiten an den Taxistandplätzen erhöht werden. Betrachtet man die Erfüllbarkeitsraten bei dem Punkt, wo auch in den inaktiven Phasen keine Ladung vollzogen wird (Ladeleistung ist Null), lassen sich die gleichen Werte wie bei steigender Ladeleistung feststellen. Das bedeutet jedoch nicht, dass das Aufladen der Batterie überflüssig ist. Für die Erfüllbarkeitsraten ist es nicht relevant, zu welchem Zeitpunkt in den Wegketten ein Unterschreiten der SOC-Grenze stattfindet. Sobald der Ladezustand der Batterie nicht mehr für die weiteren Fahrten ausreicht, wird das Taxi beziehungsweise die Taxischicht als nicht erfüllt gewertet, egal ob die verursachende Fahrt am Anfang oder am Ende der gesamten Wegkette auftritt. Werden die Energiespeicher überhaupt nicht geladen, so tritt eine Unterschreitung der SOC-Grenze eher zu Beginn auf. Wird hingegen eine Aufladung durchgeführt, verschiebt sich die Grenzwertverletzung weiter nach hinten, hat jedoch keinen Einfluss auf die Erfüllbarkeitsraten.

Die Auswirkungen der Parametervariation auf Fahrzeuge mit einer Batteriekapazität von 48 kWh ist in Variante H (48 kWh) zu sehen. Durch den größeren Energiespeicher kann auch ohne Ladung ein größerer Prozentsatz an Taxischichten erfolgreich absolviert werden. Stehen in den inaktiven Phasen Lademöglichkeiten mit 3,67 kW zu Verfügung, so kann die Erfüllbarkeitsrate der Taxischichten um ca. 5 % erhöht werden. Da bei dieser Leistung und der verwendeten großen Batteriekapazität von 48 kWh nicht alle Batteri-

en vollständig geladen werden können, kann durch Vergrößerung der Ladeleistung auf 10 kW ein weiterer Anstieg des Prozentsatzes erzielt werden. Ab diesem Leistungswert können nun annähernd alle Energiespeicher vor Beginn einer Schicht vollständig geladen werden und die Erfüllbarkeitsrate sättigt.

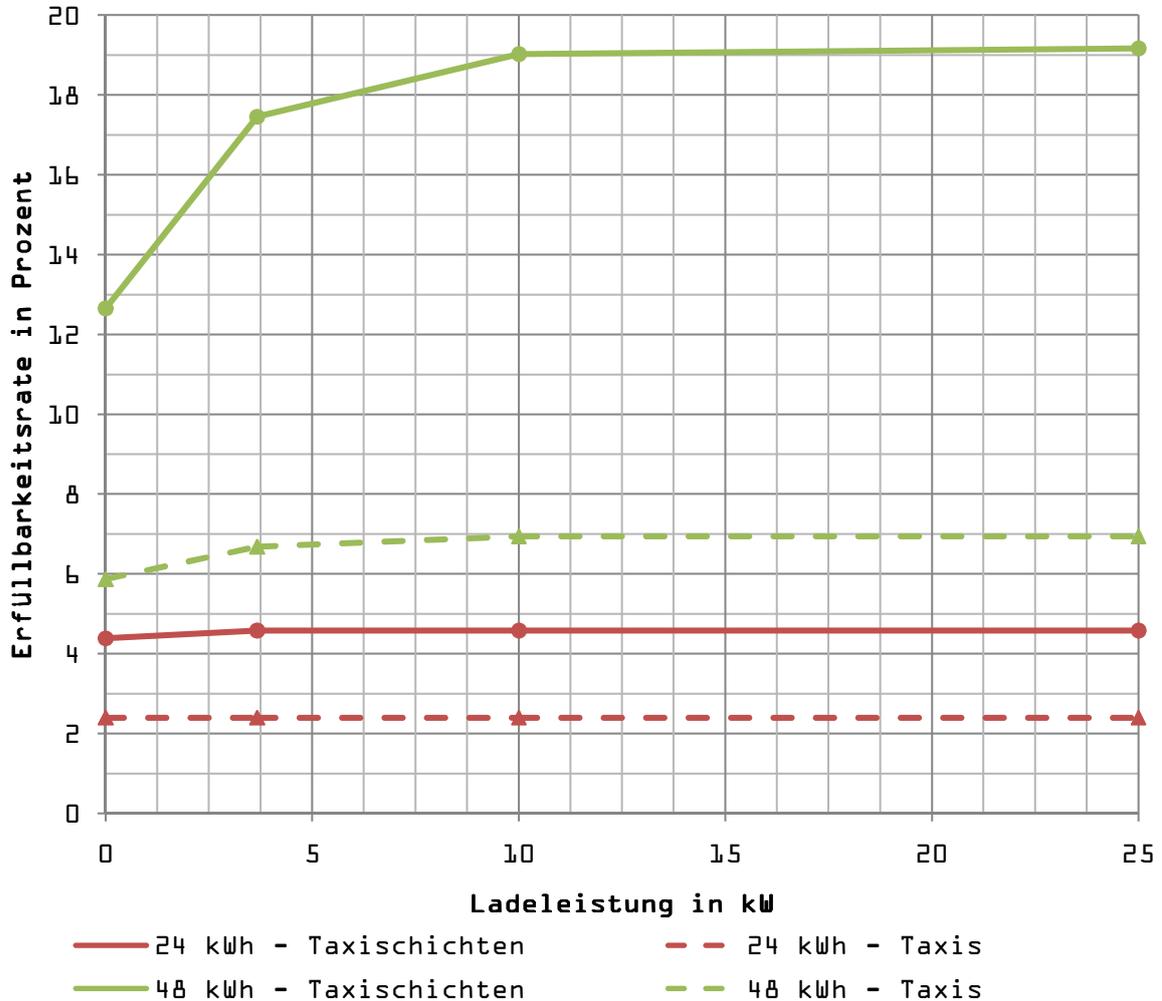


Abbildung 4.4: Erfüllungsrate der Mobilität in Abhängigkeit von der maximalen Ladeleistung in den inaktiven Phasen

Lademöglichkeiten in den inaktiven Phasen sind eine wichtige, aber keine essentielle Voraussetzung, um eine Taxiflotte auf Elektrofahrzeuge umstellen zu können. Die Priorität liegt hier klar bei der Ladeinfrastruktur an den Taxistandplätzen, da hier größere Leistungen installiert werden können und somit das volle Potential der Schnellladung ausgeschöpft wird. Da eine Ladeleistung von 3,67 kW auch für größere Batteriekapazitäten als ausreichend anzusehen ist und die Integration der Ladegeräte in das normale Haushaltsstromnetz erfolgen kann, wird trotzdem ein sehr einfacher und kostengünstiger Beitrag zur Erfüllung der Mobilität geleistet.

4.2 Szenarien

Mit den gewonnen Erkenntnissen aus den Parametervariationen werden in diesem Kapitel drei Szenarien definiert und detailliert auf die Erfüllbarkeitsraten, die Ladeprofile der Taxistandplätze und auf die fehlende Energiemenge, die zur vollständigen Erfüllung der Mobilität benötigt wird, eingegangen. Szenario 1 repräsentiert einen Grundinfrastrukturausbau, der mit der am Markt zur Verfügung stehenden Technik realisiert werden kann. In Szenario 2 wird anschließend von einer erhöhten Batteriekapazität und einem Anstieg an Lademöglichkeiten auf Taxistandplätzen ausgegangen. Im letzten Szenario wird der Einfluss einer verlängerten Ladezeit untersucht, um grundlegende Aussagen über die Anpassung des Fahrverhaltens geben zu können.

Bei jedem Szenario werden folgende Fragen beantwortet:

- Wie viele Taxis schaffen die Simulationswoche?
- Wie viele Taxischichten werden erfolgreich absolviert?
- Wie viel Energie fehlt jedem Taxi, um die ganze Woche zu erfolgreich zu absolvieren?
- Wie viel Energie fehlt pro Taxischicht?
- Wie sieht das Ladeprofil eines stark frequentierten Standplatzes aus?
- Wie sieht der zeitliche Verlauf der Anzahl an ladenden Taxis am Standplatz aus?

4.2.1 Szenario 1 - Minimalausbau

In diesem Szenario werden die einzelnen Parameter so ausgewählt, dass der Ausbau der Infrastruktur und der Umstieg auf Elektrotaxis möglichst einfach und kostengünstig vollzogen werden kann. Dafür wird eine Batteriegröße von 24kWh angenommen, die in gängigen Serienfahrzeugen, wie z.B. im Nissan Leaf [7], verbaut ist. Die spezifischen Kosten⁵ pro Jahr entsprechen ungefähr jenen eines günstigen konventionellen Fahrzeuges, wodurch auch unter Berücksichtigung der Kosten eine Substitution ermöglicht wird

⁵Ein Vergleich der Kosten und deren Berechnung ist in [2, Seite 48] zu finden.

und auch realistisch einzuschätzen ist. Die Anzahl der umzurüstenden Taxistandplätze ist mit 25 Stück gering gewählt, aufgrund der hohen Installationskosten für eine erste Ausbaustufe jedoch ausreichend. Wie sich in Kapitel 4.1.2 gezeigt hat, können durch Anwendung einer Clusterung höhere Erfüllbarkeitsraten bei gleichbleibender Anzahl der Standplätze erreicht werden, wodurch es auf der Hand liegt, dies in diesem Szenario zu berücksichtigen. Durch die Clusterung ist es möglich, einige Taxistandplätze zusammenzufassen, wodurch 64 Standplätze auf 25 Stück reduziert werden können. Die Ladeleistung an den Taxistandplätzen wurde mit 50 kW ausreichend hoch gewählt und die entsprechende Ladetechnik ist am Markt gut verfügbar und ausgereift.

Parameter Szenario 1 - Minimalausbau:

- Batteriekapazität 24 kWh
- 25 Ladestationen mit 50 kW maximaler Ladeleistung (Clusterung)
- Lademöglichkeit in den inaktiven Phasen mit 3,67 kW

Die allgemeinen Erfüllbarkeitsraten der Taxis und der einzelnen Taxischichten ergeben folgende Werte:

- Erfüllbarkeitsrate der Taxis: **6,28 %**
- Erfüllbarkeitsrate der Taxischichten: **21,28 %**

6,28 % Fahrzeuge der gesamten Taxiflotte können in der analysierten Simulationszeit von einer Woche ihre Fahrten vollständig absolvieren, ohne die Batterie zu einem Zeitpunkt zur Gänze zu entladen. Dieser Prozentsatz ist sehr gering, zeigt jedoch prinzipiell auf, dass es möglich ist, mit einem Minimalausbau der Ladeinfrastruktur und ohne spezielle Verhaltensänderungen herkömmliche Fahrzeuge durch Elektrofahrzeuge zu ersetzen. Geht man von einer Anpassung des Fahrverhaltens aufgrund der Benutzung eines Elektroautos aus, könnte die Erfüllbarkeitsrate weiter gesteigert werden. Durch die Aneinanderreihung von Fahrten unterschiedlicher Länge und unterschiedlicher Standzeiten dazwischen ist es natürlich nicht allen Fahrzeugen möglich, mit der vorhandenen Batteriekapazität und den installierten Ladestationen ihre Wegketten erfolgreich zu bestreiten.

Betrachtet man die Erfüllbarkeitsrate der Taxischichten mit 21,28 %, so liegt der Wert klar über dem der Taxis. Es zeigt sich also, dass ungefähr jede fünfte Taxischicht ohne SOC-Grenzwertverletzung durchgeführt werden kann. Will man, ausgehend von diesem Szenario, den Einsatz von Elektrotaxis optimieren, so wäre es nicht zielführend alle

Taxis durch Elektrofahrzeuge zu ersetzen. Vielmehr müssen durch ein leistungsstarkes Vermittlungsmanagement die Fahrten hinsichtlich der zur Verfügung stehenden Reichweite an die entsprechenden Fahrzeuge vergeben werden.

Abbildung 4.5 gibt die Verteilung der Erfüllbarkeitsrate der Taxischichten an. Dafür wurden für jedes Fahrzeug die erfolgreich absolvierten Taxischichten auf die Gesamtzahl der in der Simulationszeit durchgeführten Schichten bezogen. Somit zeigt sich, wie hoch die Unterschiede in den Erfüllbarkeitsraten der einzelnen Taxis sind und es lassen sich detaillierte Aussagen treffen. Da jedes Taxi eine diskrete Anzahl an Schichten vorweisen kann, ist der Erfüllungsgrad auf der x-Achse des Diagrammes ebenfalls durch diskrete Werte gekennzeichnet. Mehr als 55 % der Fahrzeuge in der gesamten Flotte können keine einzige Schicht erfolgreich absolvieren. Zu lange Einzelfahrten oder ungünstig kombinierte Wegketten sind für dieses Ergebnis verantwortlich. Der restliche Prozentsatz an Taxis kann zumindest eine Schicht erfüllen.

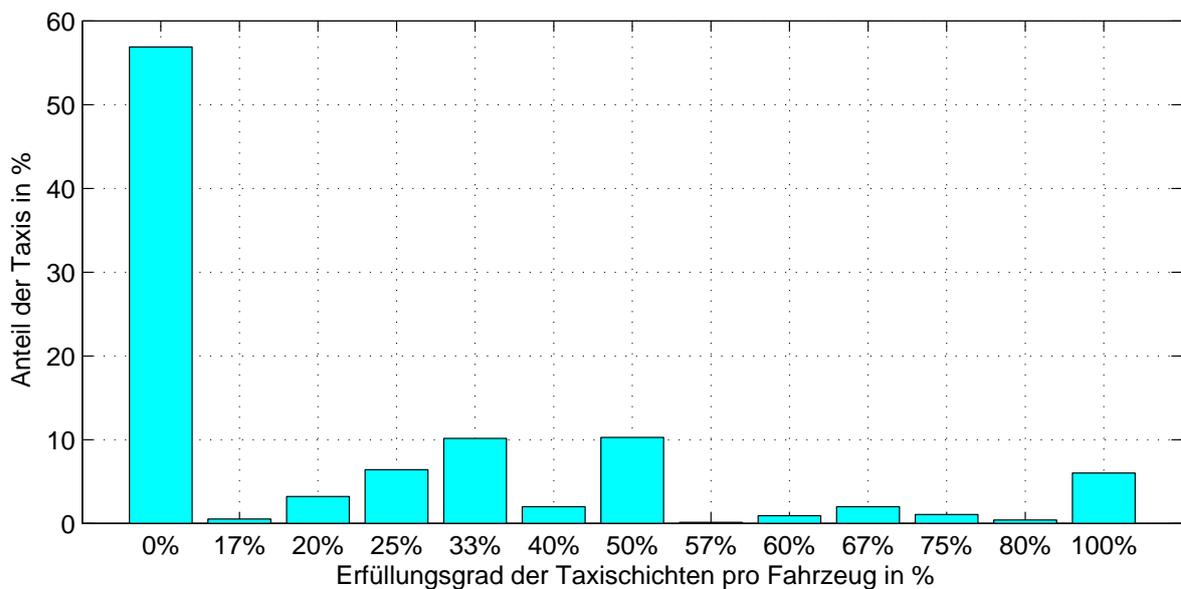


Abbildung 4.5: Erfüllungsgrad der Taxischichten der aktiven Fahrzeugflotte; Szenario 1

Um eine Aussage zu treffen, unter welchen Umständen die Erfüllbarkeit der Mobilität verbessert werden kann, wurde für jede Taxischicht der fehlende Energiebetrag (siehe Kapitel 3.2.4, Ermittlung der einzelnen SOC-Werte) ermittelt. Abbildung 4.6 zeigt die Gegenüberstellung der einzelnen Taxischichten und der Taxis selber. Im linken Boxplot liegt der Median, bei dem 50 % der Werte darunter und 50 % der Werte darüber liegen, bei 26 kWh. Bei der Hälfte der unerfüllten Taxischichten fehlt somit ein Energiebetrag, der der gesamten Batteriekapazität entspricht. Die Annahme, dass eine Verdopplung der Kapazität die Erfüllbarkeitsrate um diese 50 % erhöhen würde, kann jedoch nicht

bestätigt werden. Bei den fehlenden Energiewerten handelt es sich um die Summe über die gesamte Schicht. Nachdem die Batterien nicht überladen werden können, wirkt sich ein Fehlen an zusätzlicher Batteriekapazität am Anfang der Schicht anders, als am Ende aus. Es lässt sich somit keine allgemeine Aussage treffen, sondern lediglich der Trend der Auswirkungen infolge der Änderung der Ladeparameter. Betrachtet man die Verteilung der fehlenden Energie für die Taxis selber, so zeigt sich, dass ein erheblicher Betrag für die vollständige Erfüllung der Mobilität fehlt. Der Median liegt bei 79 Kilowattstunden und ist mehr als dreimal so groß wie die eigentliche Batteriekapazität. Die mittleren 50 % der Werte, jene in der Box, überstreichen einen großen Wertebereich von 87 WkWh; die Taxis unterscheiden sich somit hinsichtlich der fehlenden Energie erheblich. Bei 25 % der Taxis wird der fehlende Energiebetrag sogar auf über 127 kWh ermittelt.

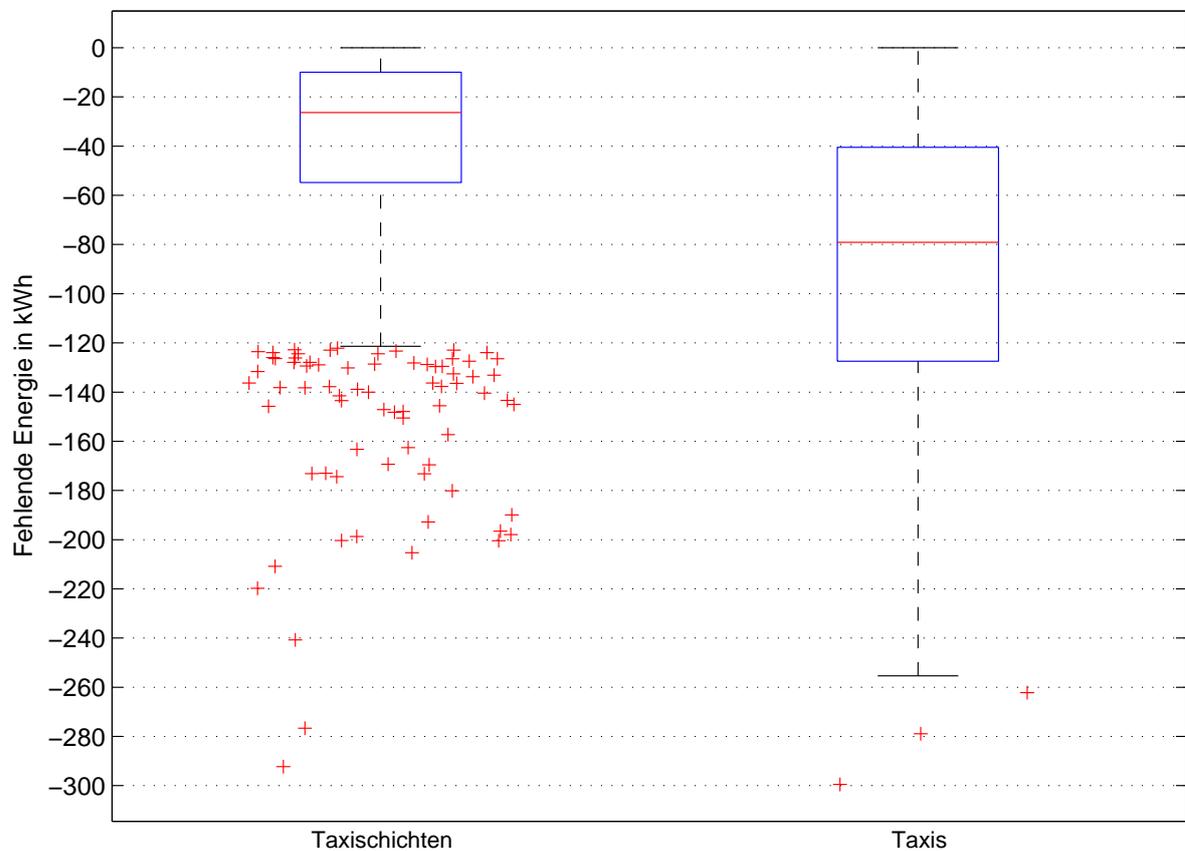


Abbildung 4.6: Fehlende Energiemenge, um die Mobilität zu erfüllen; Szenario 1

Für die Dimensionierung der Ladestationen an den Taxistandplätzen ist es wichtig zu wissen, wie viel Leistung insgesamt zur Verfügung gestellt werden muss. Einen Überblick über das Summenladeprofil eines stark frequentierten Standplatzes ist in Abbildung 4.7 zu sehen. Es wurde der Dienstag aus der Simulationswoche herausgenommen, da an diesem Tag einige hohe Leistungsspitzen auftreten und er den größten Tagesenergie-

bedarf aufweist. Grundsätzlich lässt sich kein Zusammenhang zwischen den Leistungsspitzen und der Tageszeit feststellen, da sie bei allen Standplätzen zu unterschiedlichen Uhrzeiten auftreten. Befinden sich mehrere Taxis gleichzeitig auf einem Standplatz, so summieren sich alle Ladeleistungen und es treten Spitzen mit bis zu 300 kW an diesem Wochentag auf, wobei der Maximalwert der benötigten Leistung auf diesem Standplatz bei 330 kW liegt. Leistungsspitzen von diesem Ausmaß müssen kritisch hinterfragt werden, da dadurch eventuell Netztransformatoren oder Zuleitungen thermisch belastet werden können.

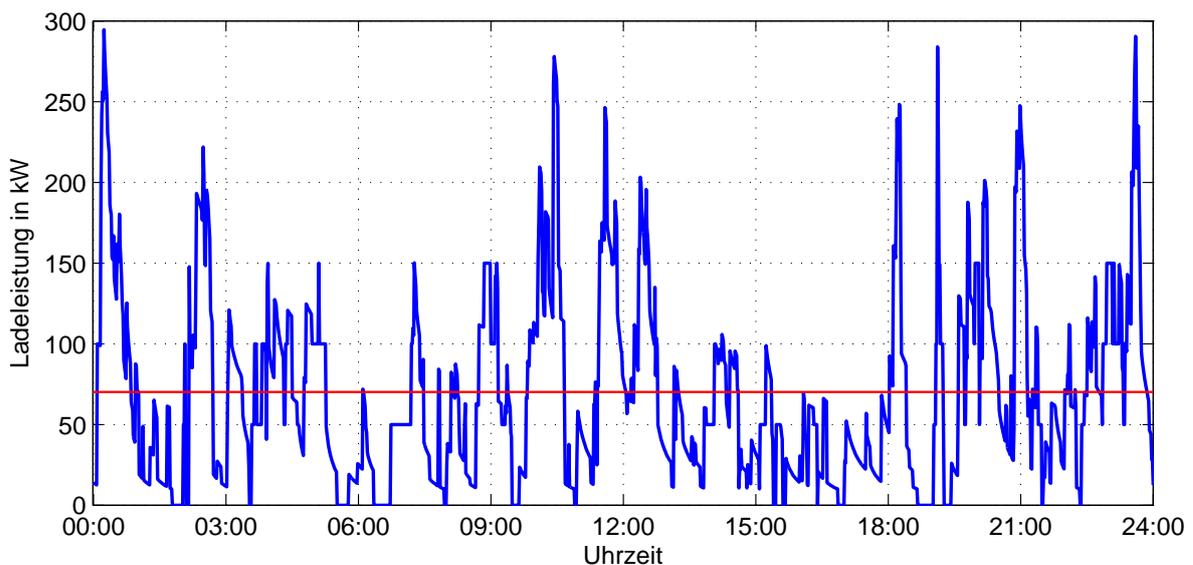


Abbildung 4.7: Summenladeprofil eines Taxistandplatzes in Szenario 1; die rote Linie gibt den Mittelwert an

Vergleicht man das Summenladeprofil mit dem Belegungsverlauf des Standplatzes in Abbildung 4.8, so zeigt sich, dass die Leistungsspitzen durch die Anzahl an gleichzeitig ladenden Taxis verursacht werden. Durch die Clusterung der Taxistandplätze befinden sich zeitweise bis zu zehn Fahrzeuge gleichzeitig vor Ort, wodurch es durchaus zu Platzproblemen kommen kann. Im Durchschnitt stehen zwei bis drei Taxis am dem Standort, wodurch die durchschnittliche Ladeleistung mit 70 kW weit unter jener in den Spitzenzeiten liegt. Obwohl die Dauer der benötigten Spitzenleistungen gering ist, müssen die elektrischen Betriebsmittel auf diese Belastung ausgelegt werden. Durch den Einsatz einer Ladesteuerung kann die Maximalleistung am Standplatz reduziert und dadurch eine Überdimensionierung der Betriebsmittel vermieden werden. Mit Hilfe des Ladeprofils ist es möglich, den gesamten Energiebedarf des Taxistandplatzes zu ermitteln. Er liegt für den gezeigten Wochentag bei 1,7 MWh und beträgt für die gesamte Simulationswoche 9,2 MWh.

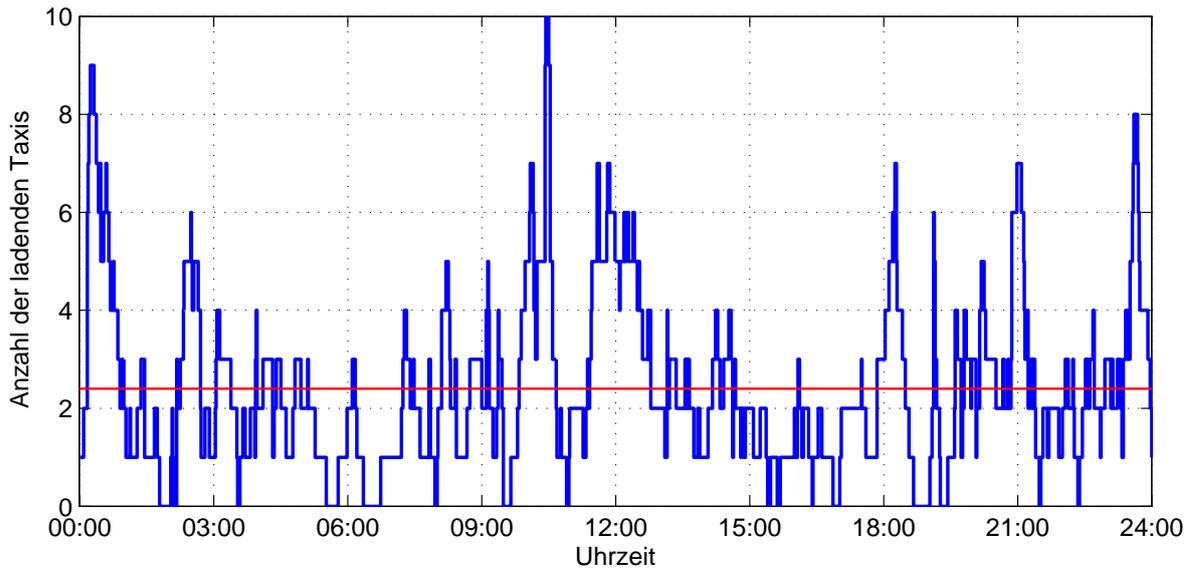


Abbildung 4.8: Anzahl der am Standplatz ladenden Fahrzeuge in Szenario 1; die rote Linie gibt den Mittelwert an

4.2.2 Szenario 2 - Erweiterter Ausbau

Szenario 2 (Erweiterter Ausbau) zeigt die Möglichkeit eines ambitionierteren Infrastrukturausbaus auf. Um eine größere Anzahl an Wegketten erfolgreich absolvieren zu können, wird die Batteriekapazität auf 48 kWh verdoppelt. Am Markt sind momentan keine Großserienfahrzeuge mit dieser Batteriegröße erhältlich, dass die Technik aber durchaus realisierbar ist, zeigt die Firma Tesla Motors mit dem Model S, bei dem Batteriegrößen von 60 kWh und 85 kWh erhältlich sind⁶. Die Ladeinfrastruktur wird ebenfalls verbessert und insgesamt 50 Taxistandplätze mit Lademöglichkeiten ausgestattet, wobei die schon im vorigen Szenario verwendete Clusterung berücksichtigt wird.

Parameter Szenario 2 - Erweiterter Ausbau:

- Batteriekapazität 48 kWh
- 50 Ladestationen mit 50 kW maximaler Ladeleistung (Clusterung)
- Lademöglichkeit in den inaktiven Phasen mit 3,67 kW

⁶Für nähere Informationen siehe [6]. Bei dem genannten Fahrzeug handelt es sich um ein Oberklassenmodell, das mittlerweile auch in Europa ausgeliefert wird.

Mit diesen Parametern ergeben sich folgende allgemeine Erfüllbarkeitsraten der Taxis und der einzelnen Taxischichten:

- Erfüllbarkeitsrate der Taxis: **65,29 %**
- Erfüllbarkeitsrate der Taxischichten: **84,76 %**

Vergleicht man diese Werte mit jenen aus Szenario 1 (Minimalausbau), zeigt sich deutlich, dass die Erhöhung der Batteriekapazität und die Erweiterung der Lademöglichkeiten einen deutlichen Zuwachs bei den Erfüllbarkeitsraten zur Folge hat. In diesem Szenario können 65,29 % der Taxis alle ihre Fahrten der gesamten betrachteten Woche vollständig absolvieren, im Vergleich zu 6,28 % in Szenario 1 (Minimalausbau). Das ist zum einen auf die größere Batterie zurückzuführen, mit der es möglich ist, auch Wegketten mit größeren Distanzen oder geringeren Standzeiten zwischen den Fahrten zu bewältigen. Durch die Erhöhung der Anzahl an Taxistandplätzen mit Lademöglichkeiten kann der Ladezustand der Batterien auf einem höheren Niveau gehalten werden, was sich ebenfalls signifikant auf den Erfüllbarkeitsgrad auswirkt. In Abbildung 4.9 ist die Verteilung des Erfüllbarkeitsgrades aller Taxis dargestellt. Man sieht sehr deutlich, dass die Mehrheit der Fahrzeuge einen Teil ihrer Schichten mit dem zur Verfügung stehenden Ladezustand meistern. Lediglich 5,3 % Prozent der Taxis können keine einzige ihrer Schichten positiv absolvieren. Dieser Anteil an der gesamten Fahrzeugflotte ist äußerst gering und für einen erfolgreichen Umstieg auf Elektrotaxis nicht unbedingt von Bedeutung. Über 90 % der Taxis können zumindest die Hälfte der geforderten Schichten bewältigen, was ein sehr beeindruckendes Ergebnis darstellt, da das zu Grunde liegende Modell ohne Verhaltensänderung modelliert wurde und somit noch ein großes Optimierungspotential für weitere Steigerungen der Erfüllbarkeit der Mobilität vorhanden ist.

Die Verteilung der fehlende Energiemenge, die für die Erfüllung der 323 verbleibenden Taxischichten mit negativ abgeschlossenen Ladezuständen und für jedes Fahrzeug benötigt wird, ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Für beide Plots ergibt sich in etwa derselbe Wertebereich, in den die Hälfte der Daten fallen. Er liegt ungefähr im Bereich der halben Batteriekapazität und wird durch die beiden Boxen grafisch dargestellt. Beide Verteilungen weisen eine Linkssymmetrie hin zu kleineren Energiefehlbeträgen auf. Im Vergleich zu Szenario 1 (Minimalausbau) fand eine Annäherung des Wertebereiches der fehlenden Energiebeträge zueinander statt. Das zeigt, dass großteils nur noch einzelne Taxischichten pro Fahrzeug vorhanden sind, die negative Energiewerte aufweisen und für die Nichterfüllung der Mobilität der einzelnen Taxis verantwortlich sind. Die roten Kreuze stellen Ausreißer dar und sind Werte, die über dem 1,5-fachen der Höhe der

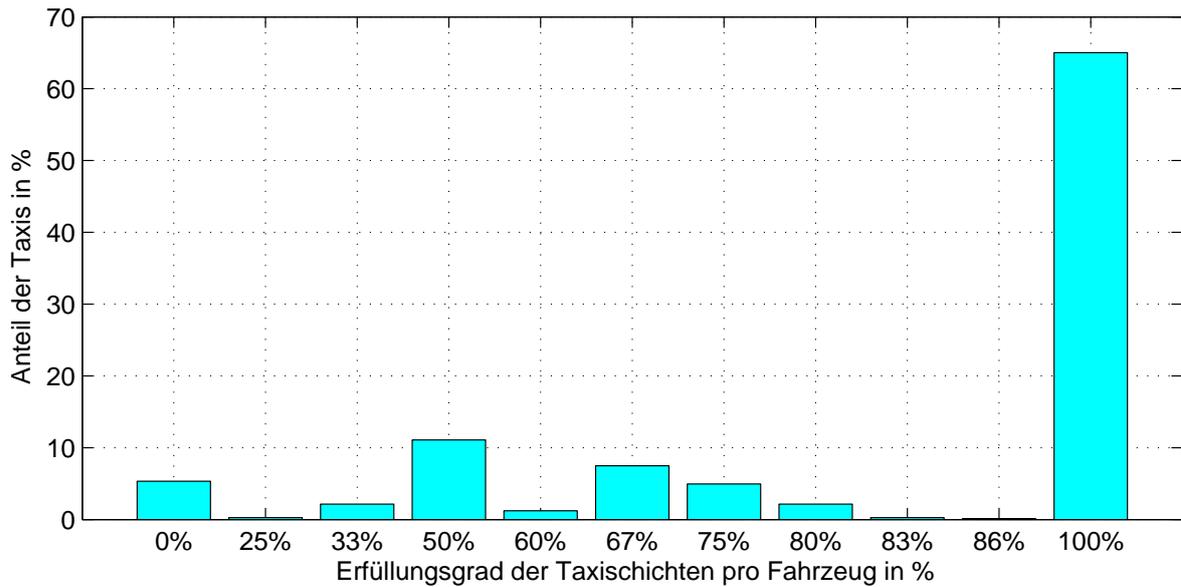


Abbildung 4.9: Erfüllungsgrad der Taxischichten der aktiven Fahrzeugflotte; Szenario 2

Box liegen (60 kWh bzw. 67 kWh). Etwaige Ausreißer, die über 100 kWh liegen, befinden sich zwischen den beiden grauen Linien, wobei der Unterschied der Werte verhältnismäßig dargestellt ist. Nachdem diese Energiebeträge zahlenmäßig in der Minderheit sind und sie durch ihre hohen Werte kaum durch sinnvolle Änderung der Ladeparameter vermieden werden können, sind sie zu vernachlässigen.

In Abbildung 4.11 ist das Ladeprofil des schon in Szenario 1 (Minimalausbau) analysierten Standplatzes zu sehen. Es zeigen sich auch hier wieder Leistungsspitzen, die zu den gleichen Zeitpunkten auftreten wie im vorigen Szenario. Allerdings haben sich die Maximalwerte teilweise um bis zu 80 kW verringert. Generell zeigt sich ein reduzierter Verlauf des Leistungsbedarfes, der einen Rückgang des Mittelwertes auf 53 kW zur Folge hat. Die Ursache hierfür liegt in der höheren Anzahl an Ladestationen, wie in [2, Seite 33, Tabelle 4] gezeigt werden konnte. Da schon zu früheren Zeitpunkten in der Wegkette geladen werden kann, haben die Ladezustände der Batterien generell höhere Werte und der mittlere Leistungsbedarf sinkt.

Für die Dimensionierung und die Einbindung in das Verteilnetz ist der reduzierte Leistungsbedarf ein großer Vorteil, da die Betriebsmittel auf eine geringere Maximalleistung ausgelegt werden müssen. Außerdem sinkt der gesamte Tagesenergiebedarf auf 1,27 MWh und die benötigte Energiemenge für die gesamte Simulationswoche auf 7,2 MWh. Durch die höhere Anzahl an Taxistandplätzen mit Ladestationen erfolgt eine Umverteilung der Energie und der Leistung, da sie auf mehrere Standorte aufgeteilt werden. Die Gesamtenergiemenge, die von allen Standplätzen benötigt wird, erhöht sich von

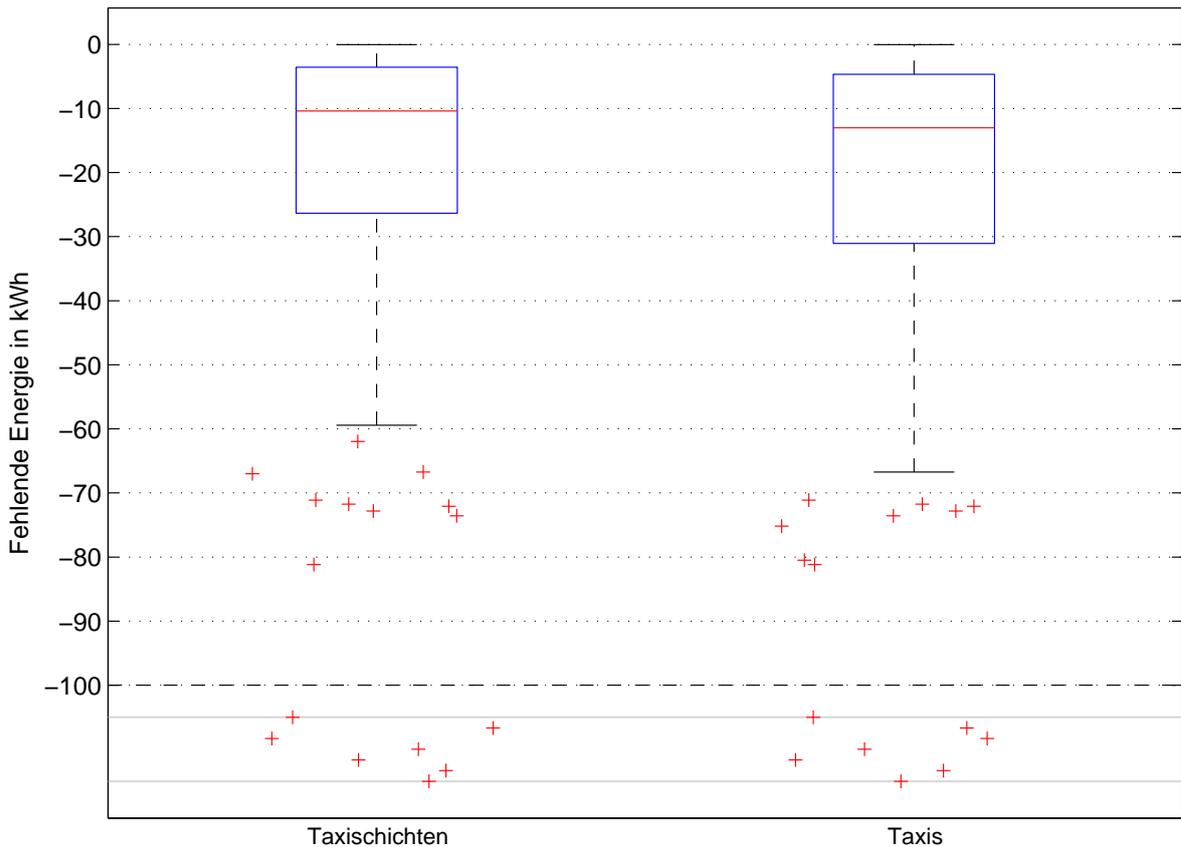


Abbildung 4.10: Fehlende Energiemenge, um die Mobilität in zu erfüllen; Szenario 2

131 MWh auf 173 MWh, da ein größerer Energiespeicher vorhanden ist und somit mehr Energie auf den Plätzen nachgeladen werden kann.

Die Veränderung der beiden Ladeparameter hat auch positive Auswirkungen auf den Platzbedarf an den Standplätzen. In den Spitzenzeiten verringert sich die Anzahl der ladenden Taxis um 1 bis 2 Fahrzeuge, sodass hier eventuell vorhandene Engpässe vermieden werden können. Der Vergleich mit Abbildung 4.8 von Szenario 1 (Minimalausbau) zeigt auch, dass nun öfter die Ladestationen unbenutzt sind. Wurde die Ladeinfrastruktur im vorigen Szenario noch 34 Stunden nicht benutzt, so sind es in Abbildung 4.12 44 Stunden. Das zeigt deutlich, dass ein guter Ladeinfrastrukturausbau eine gute Verteilung der Fahrzeuge auf den Standplätzen bewirkt und Überlastungen der Plätze verringert werden können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Vergrößerung der Batteriekapazitäten und ein Ausbau der Ladestationen eine deutliche Steigerung der Mobilitätsraten zulässt. Es ergeben sich akzeptable Werte, die für einen Umstieg auf Elektrotaxis sprechen und auch

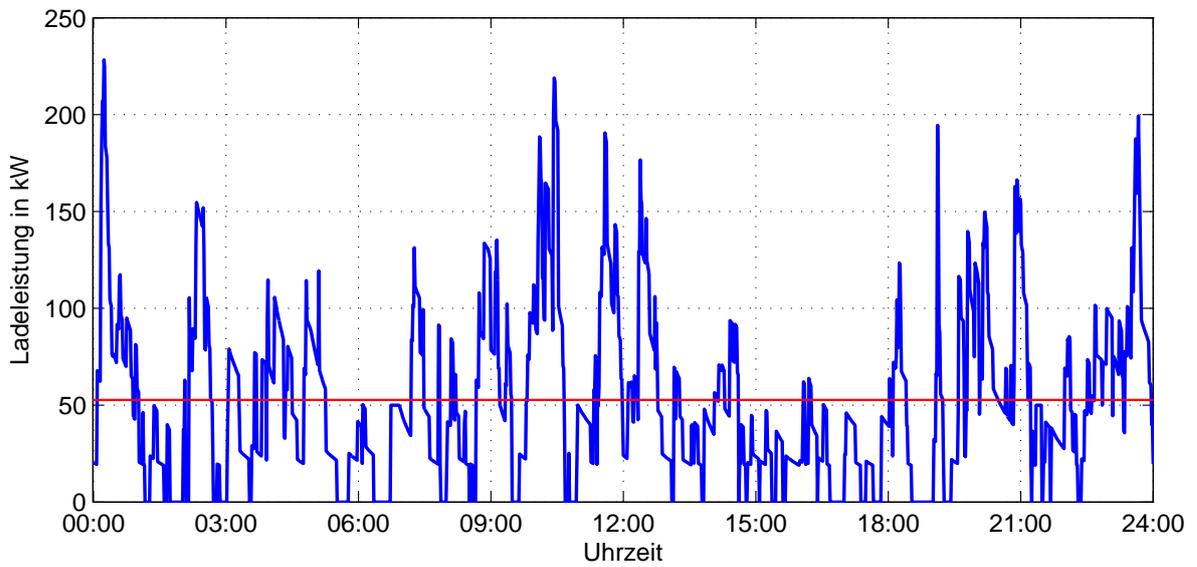


Abbildung 4.11: Summenladeprofil eines Taxistandplatzes in Szenario 2;
die rote Linie gibt den Mittelwert an

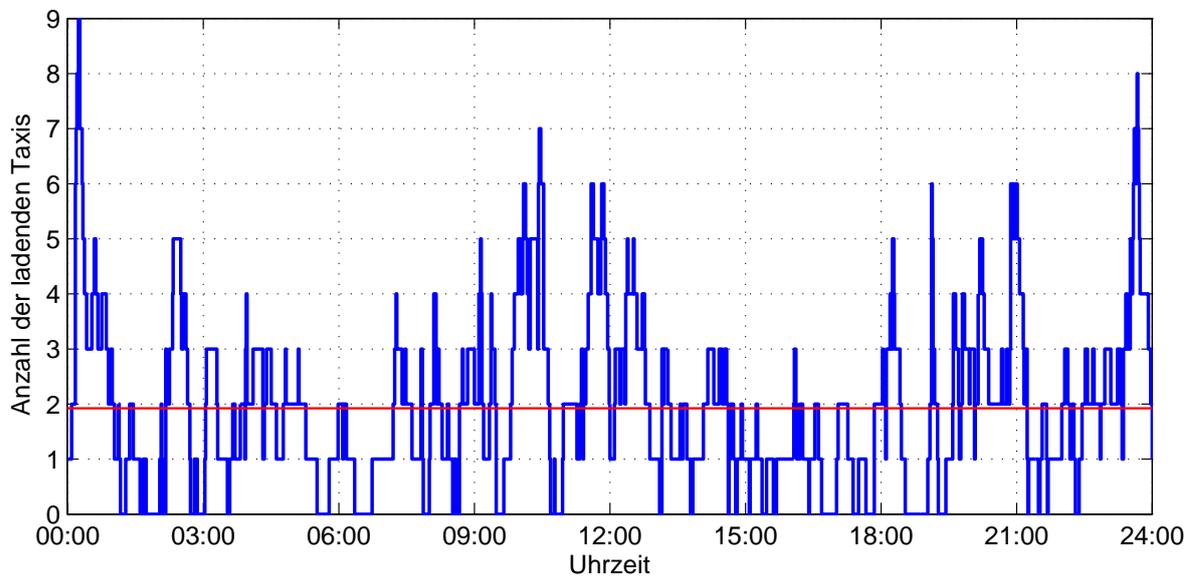


Abbildung 4.12: Anzahl der am Standplatz ladenden Fahrzeuge in Szenario 2;
die rote Linie gibt den Mittelwert an

ohne Berücksichtigung von Verhaltensänderungen der Taxifahrer oder bei der Vermittlung von Fahrten erreicht werden können. Weiters lässt sich die Ladeenergie auf mehrere Standplätze verteilen und Leistungsspitzen können erheblich reduziert werden.

4.2.3 Szenario 3 - Ladezeitverlängerung

Die Verweildauer der Taxis auf den Standplätzen hat große Bedeutung für die Erfüllbarkeit der Mobilität, da dadurch die Batterien wieder aufgeladen und weitere Fahrten absolviert werden können. In den vorigen Szenarien wurden bei jeder Ankunft eines Fahrzeuges auf einem Standplatz mit Lademöglichkeit fünf Minuten der Standzeit abgezogen (siehe Kapitel 3.2.4), um den Einsteckvorgang des Ladesteckers am Auto und die Initialisierung des Ladeprozesses zu berücksichtigen. Dieser Wert ist sehr großzügig bemessen, sodass jeder Fahrer ohne Hektik den Ladevorgang starten kann.

In diesem Szenario wird dieser Zeitwert auf zwei Minuten reduziert und somit die Zeitspanne für das Laden der Batterien verlängert. In der Praxis ist dieser Wert wahrscheinlich in einigen Fällen nicht einzuhalten, großteils sollte es jedoch möglich sein, in dieser Zeit den Ladevorgang beginnen zu können. Die Auswirkungen dieser Anpassung auf die Erfüllbarkeitsraten zeigt dieses Szenario auf, wobei die restlichen Parameter von Szenario 2 übernommen werden.

Parameter Szenario 3 - Ladezeitverlängerung:

- Batteriekapazität 48 kWh
- 50 Ladestationen mit 50 kW maximaler Ladeleistung (Clusterung)
- Lademöglichkeit in den inaktiven Phasen mit 3,67 kW
- Verlängerung des Ladevorganges um drei Minuten

Mit den oben angeführten Parametern ergeben sich folgende allgemeine Erfüllbarkeitsraten der Taxis und der einzelnen Taxischichten:

- Erfüllbarkeitsrate der Taxis: **77,97 %**
- Erfüllbarkeitsrate der Taxischichten: **91,08 %**

Das Ergebnis zeigt, dass durch die längeren Ladezeiten ein höherer Prozentsatz an Fahrzeugen die Simulationswoche erfolgreich absolvieren kann. Die Anzahl der erfüllten Schichten kann noch etwas gesteigert werden; der Unterschied zu Szenario 2 (Erweiterter

Ausbau, die Erfüllbarkeitsrate der Taxischichten liegt bei 65,29 %) fällt jedoch geringer aus als bei den Taxis. Das zeigt, dass Taxischichten mit ungünstigen Wegketten und langen Distanzen existieren, die sehr schwer zu erfüllen sind. Dagegen reichen nun bei mehreren Taxis die Ladezustände aus, um auch die letzten Fahrten ihrer Schichten positiv zu erledigen.

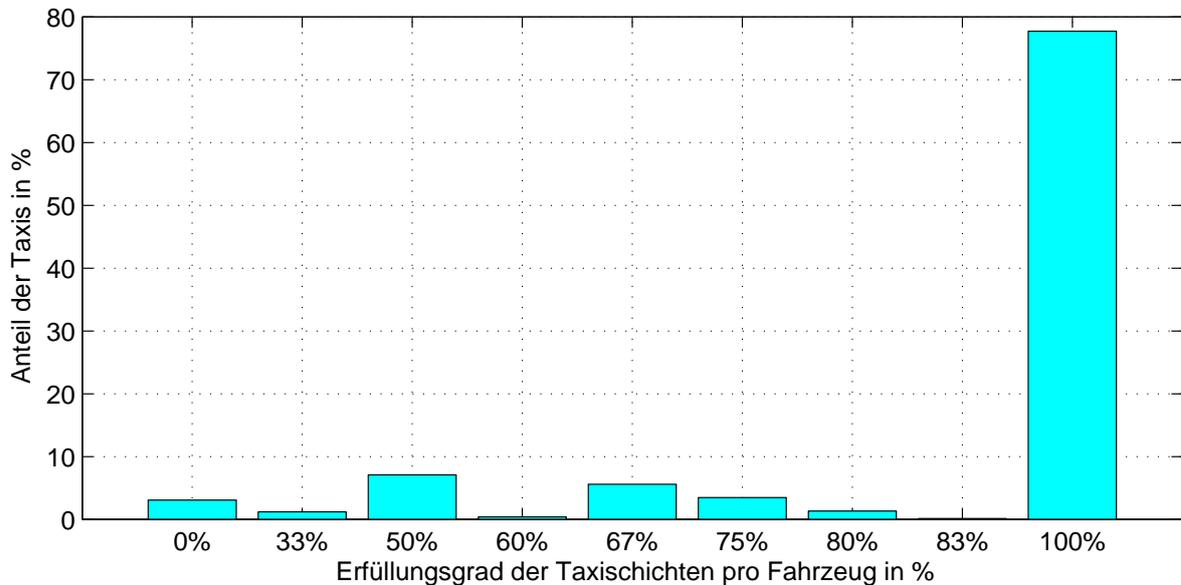


Abbildung 4.13: Erfüllungsgrad der Taxischichten der aktiven Fahrzeugflotte; Szenario 3

In Abbildung 4.13 ist zu sehen, in welchem Ausmaß die Taxischichten pro Fahrzeug erfüllt werden können. Etwas mehr als drei Viertel der Fahrzeuge können alle ihre Schichten mit der angenommenen Batteriekapazität von 48 kWh und den zur Verfügung stehenden Ladestationen meistern. Die Verteilung sieht jener in Szenario 2 (Erweiterter Ausbau) sehr ähnlich. Die Anzahl von Fahrzeugen, die keine einzige Schicht erfolgreich absolviert haben, ist deutlich gesunken. Es bleiben jene Taxis über, die sehr lange durchgehende Wegketten aufweisen. Bei diesen ist die Wahrscheinlichkeit, dass für eine einzelne Fahrt der Ladestand nicht ausreicht, am größten. Anhand dieser Verteilung kann behauptet werden, dass fast jedes aktive Fahrzeug in der Flotte durch ein batteriebetriebenes Elektroauto substituiert werden kann. Allerdings sind bei einigen Taxis bzw. Taxischichten die Ladeinfrastruktur und die Batteriekapazitäten nicht alleine ausreichend, um den Umstieg von konventionellen Autos zu bewerkstelligen. Hier kann nur durch Änderung des Fahrverhaltens Abhilfe geschaffen werden.

Durch die Erhöhung der verfügbaren Ladezeit an den Standplätzen kann mehr Energie in den Batterien gespeichert werden. Dies macht sich auch in Abbildung 4.14 bemerkbar, in

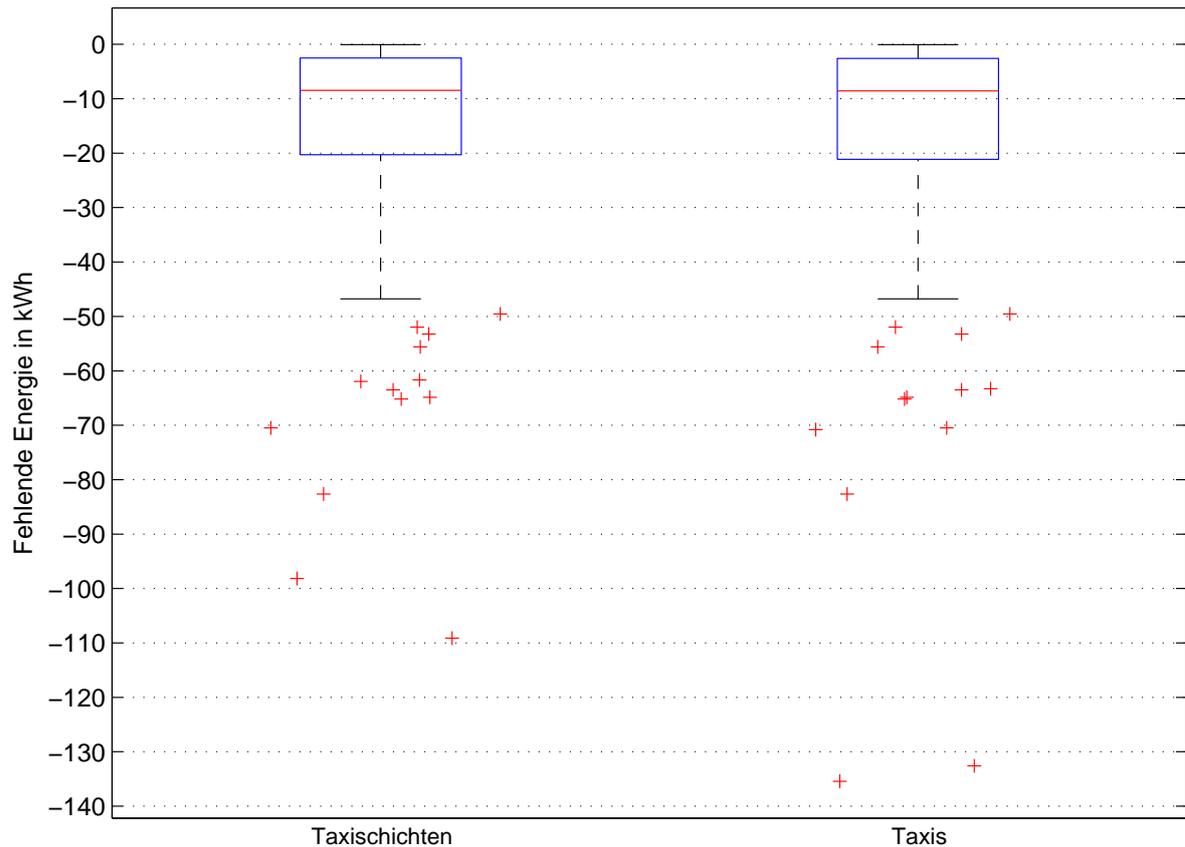


Abbildung 4.14: Fehlende Energiemenge, um die Mobilität zu erfüllen; Szenario 3

denen die fehlenden Energiemengen für die Taxischichten und Taxis grafisch dargestellt sind. Die Höhe der Werte konnte weiter reduziert werden, wobei hier die Summe aus den Fehlbeträgen einzelner Fahrten dargestellt wird und sich die Gesamtenergie auf mehrere Fahrten aufteilt. Der Vergleich der beiden Boxplots lässt erkennen, dass sowohl der Wertebereich der mittleren 50% der Daten (Größe der Box) als auch der Median bei beiden fast ident ist. Es zeigt, dass für die Erfüllung der Mobilität der einzelnen Taxis nur noch eine unerfüllte Schicht vorhanden ist. Die Ausreißer treten weiterhin in der gleichen Quantität auf wie in dem Szenario davor; ihre Werte haben sich jedoch um einige Kilowattstunden verringert.

In der Grafik in Abbildung 4.14 ergibt sich die fehlende Energiemenge aus der Summe einzelner Fahrten. Dadurch lässt sich aber keine Aussagen treffen, wo in der Wegkette wie viel Energie fehlt. Um diese Taxischichten auch erfolgreich absolvieren zu können, ist es nötig zu wissen, wann Energie nachgeladen werden kann und in welchem Ausmaß dies notwendig ist. Dafür wurde in einem weiteren Boxplot die fehlende Energiemenge pro Fahrt grafisch ausgewertet. Sie ist in Abbildung 4.15 zu sehen. Der Median der Ver-

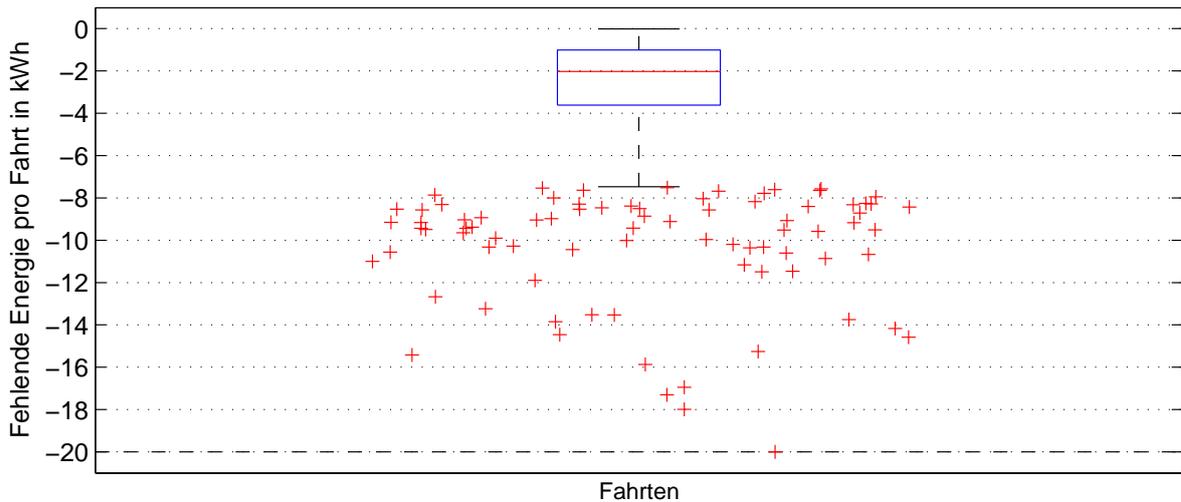


Abbildung 4.15: Fehlende Energiemenge einzelner Fahrten um die Mobilität zu erfüllen; Szenario 3

teilung liegt bei 2 kWh und ist somit nur ein Bruchteil der gesamten Batteriekapazität. Für den Großteil der Wege (75 %) fehlen maximal 4 kWh, wobei auch einige Fahrten mit stark erhöhtem Fehlbetrag (Ausreißer) vorkommen. Bei den Berechnungen hat sich gezeigt, dass in den vorigen Szenarien die fehlenden Energiebeträge der einzelnen Fahrten in demselben Bereich liegen und somit generell geringe Energiemengen zur Absolvierung der Wege zusätzlich benötigt werden.

Nachdem die Batterien bei diesen Fahrten komplett leer sind, könnte bei einer Ladeleistung von 50 kW die Energiemenge in 5 Minuten vollständig nachgeladen werden. Bei der Hälfte der Taxifahrten verringert sich die Zeitdauer sogar auf zweieinhalb Minuten. Würde nun nach jeder der betreffenden Fahrten eine kurze Pause von wenigen Minuten gemacht werden, ließen sich die Batterien etwas aufladen und nachfolgende Wegstrecken könnten ohne Probleme absolviert werden. Nachdem die benötigten Pausen sehr kurz sind, bestehen auch für die Fahrer selbst keine nennenswerten Einschränkungen. Einzige Voraussetzung für die Umsetzung ist das Vorhandensein von Ladestationen an den benötigten Plätzen. Das unterstreicht erneut die Wichtigkeit einer gut ausgebauten Ladeinfrastruktur.

Die zusätzliche Ladezeit von drei Minuten hat nur geringe Auswirkungen auf das Ladeleistungsprofil. Während dieser Dauer kann der SOC durch Ladung maximal um 5 % erhöht werden. Da die Ladeleistung vom Batterieladzustand abhängig ist, ergeben sich auch im Verlauf keine größeren Veränderungen. Bei der Leistungsspitze kurz nach Mitternacht, brachte die neue Ladesituation eine Reduktion um ca. 20 kW. Im Gegenzug entstand eine neue Spitze um 20 Uhr.

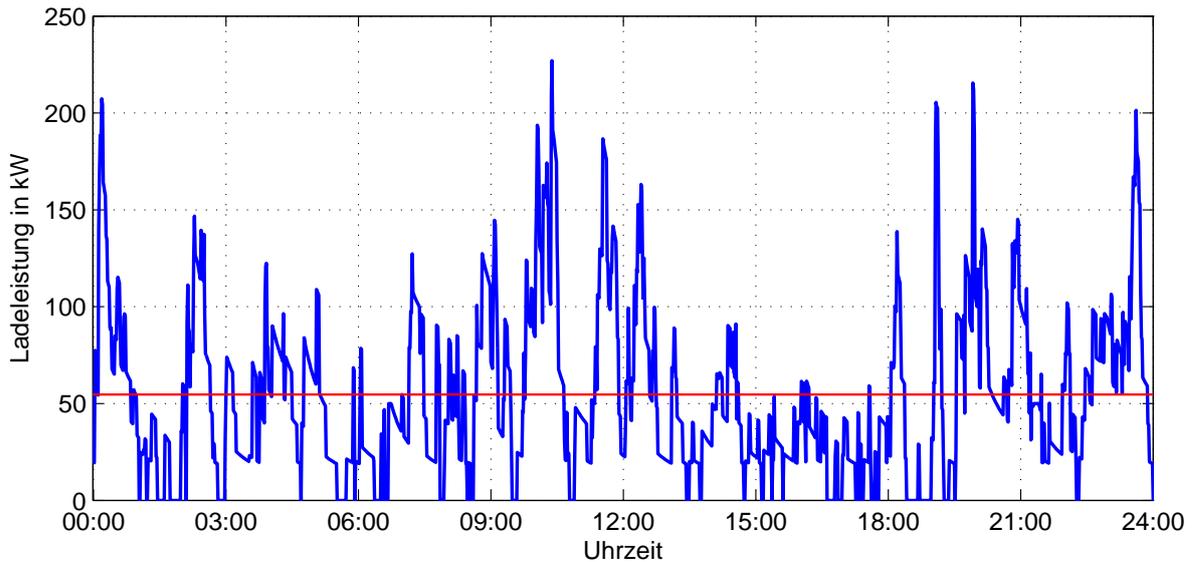


Abbildung 4.16: Summenladeprofil eines Taxistandplatzes in Szenario 3; die rote Linie gibt den Mittelwert an

Eine Erhöhung der Ladedauer bewirkt natürlich auch einen höheren Energieverbrauch des Standplatzes, der auf 1,31 MWh leicht ansteigt. Der Wochenenergiebedarf steigt um 300 kWh auf 7,5 MWh; der Gesamtenergiebedarf für die Flotte beträgt 182 MWh.

Eine Veränderung der Dauer der Standzeiten in diesem Ausmaß hat prinzipiell nur sehr geringe Auswirkungen auf die Auslastung der Standplätze. Bei manchen Fahrzeugen reicht nun die vorhandene Standzeit, die ja um die Dauer des Initialisierungsvorganges der Ladung verringert wird, aus, um die Batterie zu laden. Somit kommen einige neue Fahrzeuge an den Standorten hinzu, wodurch auch die Stundenanzahl, in denen die Ladeinfrastruktur nicht verwendet wird, wieder auf 38 Stunden sinkt. Für den in Abbildung 4.17 gezeigten Standplatz steigt die Anzahl an gleichzeitig ladenden Taxis um maximal ein Fahrzeug. Eine höhere Maximalauslastung ergibt sich aufgrund des veränderten Parameters jedoch nicht.

Die Ergebnisse dieses Szenarios zeigen auf, dass geringe Erhöhungen der Verweildauer an den Standplätzen die Erfüllbarkeitsraten signifikant beeinflussen können. Auch wenn es sich um wenige Minuten handelt, sie sind in vielen Fällen entscheidend, ob eine Taxischicht mit ihren Wegketten geschafft werden kann oder nicht. Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Ladezeit an den Standplätzen zu erhöhen. Einerseits kann der Einsteckvorgang des Ladesteckers optimiert und der komplette Startprozess der Ladung einfach und bedienerfreundlich gestaltet werden. Andererseits können geringe Verhal-

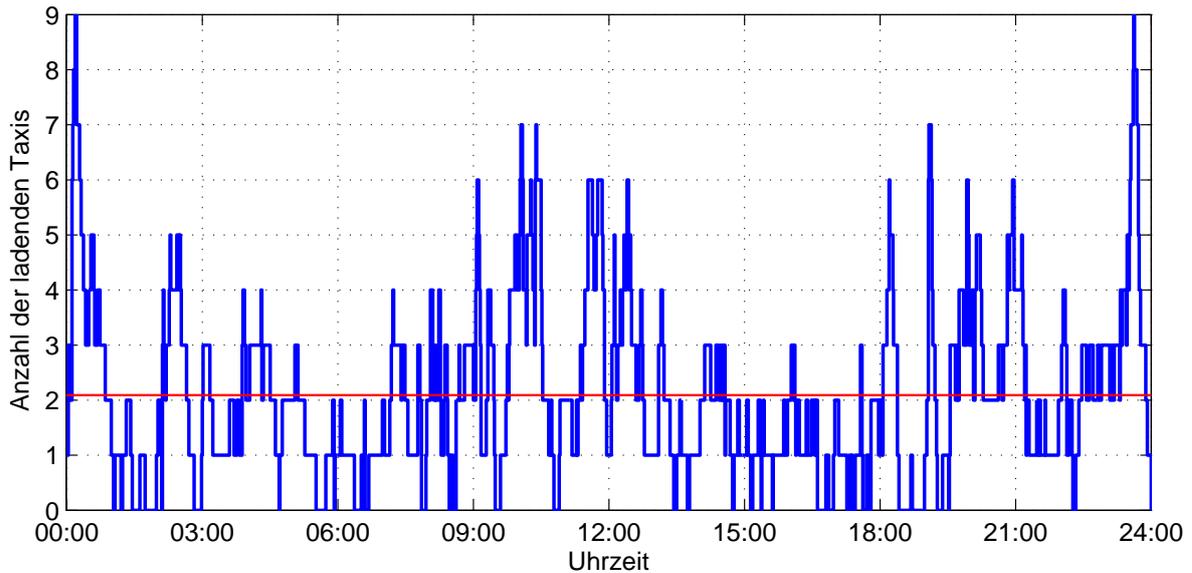


Abbildung 4.17: Anzahl der am Standort ladenden Fahrzeuge in Szenario 3; die rote Linie gibt den Mittelwert an

tensänderungen der Fahrer, die ihre Standzeit unter Umständen um einige Minuten verlängern, ebenso zu einer besseren Erfüllung der Mobilität beitragen.

4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

In diesem Abschnitt werden die gewonnenen Erkenntnisse aus der Analyse der Mobilitätsdaten zusammengefasst. Die Auswirkungen auf die Erfüllbarkeit bei Veränderung einzelner Ladeparameter wurden untersucht und drei Szenarien näher betrachtet. Mit diesen Ergebnissen können nun jene Fragen beantwortet werden, die in der Zielsetzung in Kapitel 1.1 definiert wurden.

Bei der Berechnung der Erfüllbarkeitsraten wurde zwischen den Taxischichten und den Taxis selbst unterschieden. Damit die Mobilität eines Fahrzeuges als vollständig erfüllt betrachtet werden kann, müssen alle Fahrten, die es in der vorgegebenen Zeit durchgeführt hat, ohne Unterschreitung des minimalen Ladezustandes von 5% der Nennkapazität getätigt werden. Je nachdem wie viele Fahrten hintereinander durchgeführt worden sind, ist diese Bedingung leichter oder schwerer zu erfüllen. Werden sehr viele lange Fahrten mit nur geringen Standzeiten dazwischen absolviert, ist die Wahrschein-

lichkeit einer Verletzung der Ladezustandsgrenze dementsprechend hoch. Dadurch hat die Erfüllbarkeitsrate der Taxis, die aufgrund dieser Tatsache immer geringer als die Rate der erfüllten Taxischichten ausfällt, große Bedeutung. Es werden jene Fahrzeuge hervorgehoben, die ohne Veränderung der Fahrtparameter Distanz, Dauer und Standzeit ihre Wegketten auch mit einem batteriebetriebenen Elektroantrieb tätigen können. Da eine hundertprozentige Erfüllbarkeit nur in wenigen Fällen eintritt, konnte mit der Erfüllbarkeitsrate der Taxischichten gezeigt werden, dass zumindest ein Teil der zusammenhängenden Fahrtwege durchgeführt werden kann. Grundsätzlich gibt es oft nur wenige Einzelfahrten, die mit dem zur Verfügung stehenden Ladezustand der Batterien nicht absolviert werden können. Durch die Aneinanderreihung und der sich damit ergebenden fixen Abfolge ist es nicht möglich, einzelne Wege für eine Nichterfüllung der Mobilität verantwortlich zu machen, da eine Abhängigkeit untereinander besteht und der zeitliche Ablauf der Fahrten vorgegeben ist.

In den Parametervariationen konnten die Auswirkungen ihrer Veränderungen auf die Erfüllbarkeitsraten festgestellt werden. Es lassen sich bestimmte Parameter und optimale Kombinationen feststellen, mit denen die Erfüllbarkeit der Mobilität hohe Werte annimmt.

Die Größe der Batteriekapazität hat großen Einfluss, auf die Anzahl an erfolgreich absolvierten Fahrten. Je größer die verbaute Kapazität ist, um so höher wird die Zahl der durchführbaren Wegketten. Begrenzende Faktoren sind zum einem die Baugröße der Batterien und zum anderen die aktuell sehr hohen Investitionskosten. Das volle Potential eines großen Energiespeichers lässt sich allerdings nur mit der Möglichkeit einer raschen Ladung ausschöpfen. Werden Elektroautos als Taxis eingesetzt, stehen nur einige Minuten Ladezeit zwischen den Kundenfahrten zur Verfügung, in denen die Batterie möglichst voll geladen werden soll. Eine hohe Ladeleistung ist somit eine notwendige Voraussetzung für die Verwendung von großen Batteriekapazitäten in Taxis und deren effizienter Nutzung. Für den Umstieg auf Elektrotaxis ist die Verwendung von Serienfahrzeugen aus Massenproduktion eine kostengünstige und reale Möglichkeit. Es stehen einige Fahrzeuge am Markt zur Verfügung. Ihre Batteriekapazitäten liegen momentan jedoch nur bei maximal 24 kWh. Dieser Wert ist ausreichend, um einen kleinen Teil der Taxis zu ersetzen oder gezielt einige Fahrten, die durch geringe Distanzen gekennzeichnet sind, von mehreren Taxis zusammenzufassen. Für eine hohe Erfüllbarkeit der Mobilität ohne nennenswerte Fahrverhaltensänderungen sind Batteriekapazitäten im Bereich von 48 kWh notwendig und ermöglichen Flexibilität im Verhalten und beim Ladeinfrastrukturausbau.

Die Installation von Ladestationen auf den Taxistandplätzen und deren effiziente Vertei-

lung sind wichtige Voraussetzungen, um eine Taxiflotte auf Elektroautos umzustellen. Sind genug Lademöglichkeiten vorhanden, können die durch das Warten auf Kunden generierten Standzeiten zum Aufladen der Batterie verwendet werden. Die Ausstattung aller Taxistandplätze in Wien mit Ladegeräten wäre eine optimale Basis für die Nutzung von Elektrotaxis. Aufgrund von hohen Investitionskosten und der schwierigen Integration in das Verteilnetz wird ein Vollausbau wirtschaftlich nicht möglich sein. Dennoch muss ein hoher Ausbaugrad angestrebt werden, um flächendeckend Elektrotaxis einsetzen zu können. Wie der Vergleich der Variante C (TSP) und D (TSP-Clusterung) in Kapitel 4.1.2 gezeigt hat, können durch Zusammenfassen mehrerer nahe beisammen liegender Standplätze (wabenförmige Cluster mit einem Kilometer Durchmesser) mit einer geringeren Anzahl die gleichen Erfüllbarkeitsraten erreicht werden. Die zusätzlichen Wege für die Anfahrt sind mit maximal einem Kilometer sehr gering und es wird angenommen, dass sie sich im Mittel aufheben und vernachlässigbar sind. Die Clusterung ist somit ein effektives Instrument, um den Ausbau der Ladestationen optimal zu gestalten. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass es durch das Zusammenlegen zu Platzproblemen an den Standplätzen kommen kann. Es ist mit einem erhöhtem Fahrzeugaufkommen zu rechnen und muss für die Gestaltung der Plätze einbezogen werden. Nachdem die Verweilzeiten an den Taxiplätzen durchschnittlich nur einige Minuten betragen und in dieser Zeit die Batterie möglichst lange geladen werden soll, ist es von großer Bedeutung, den Ablauf des Ladevorgangs so effektiv wie möglich zu gestalten. Einfache Verifizierungssysteme für die Taxilenker und eine optimale Platzierung der Ladesteckdosen entscheiden über einen reibungslosen Ablauf. Für die Integration der Ladestationen in das Verteilnetz wirkt sich eine hohe Anzahl an Lademöglichkeiten an verschiedenen Standorten positiv aus. Die aufgenommene Energiemenge kann so großflächig verteilt und eine konzentrierte Belastung von einzelnen Netzsträngen verhindert werden.

Über eine erfolgreiche Integration von Elektrofahrzeugen in den Verkehr entscheidet neben dem Ausbaugrad der Ladestationen und der Batteriekapazität auch die Möglichkeit, die Energiespeicher schnell wieder zu füllen. Dies gelingt mit hohen Ladeleistungen, die bei leeren Batterien ihren Maximalwert erreichen und mit Anstieg des Ladezustandes nach einer konstanten Zeitdauer exponentiell abfallen. Je höher die zur Verfügung gestellte Maximalleistung ist, desto besser können die Standzeiten an den Standplätzen genutzt und die anschließenden Fahrten mit höherem Ladezustand begonnen werden. In der Parametervariation in Kapitel 4.1.3 stellte sich heraus, dass beide Erfüllbarkeitsraten mit zunehmendem Anstieg der Ladeleistung abflachen und die Zuwächse an erfolgreich absolvierten Taxischichten und Taxis geringer werden. Dadurch ergibt sich die Erkenntnis, dass Ladestationen mit 50 kW ausreichend sind und bei einer Batte-

riekapazität von 48 kWh sich die Leistung bei gleichbleibender Erfüllbarkeit auf 22 kW senken lässt. Befinden sich mehrere Taxis gleichzeitig am Standplatz und laden ihre Batterien, summieren sich die Ladeleistungen der einzelnen Ladegeräte, wodurch große Leistungsspitzen entstehen. Diese belasten das Verteilnetz, wodurch es zu Problemen in der Spannungsstabilität kommen kann. Außerdem müssen Kabel und Netztransformatoren auf diese Werte ausgelegt werden, obwohl die Spitzenwerte nicht permanent auftreten. Eine Abhilfe kann durch die Steuerung der Ladevorgänge erreicht werden. Dabei werden die Maximalleistungen der Ladegeräte, abhängig von der Auslastung des Standplatzes, gesenkt und somit ein ausgeglichenes Ladeleistungsprofil erzeugt. Für die Fahrzeuge bedeutet diese Veränderung einen langsameren Energietransfer in die Batterien beziehungsweise eine Verlängerung der Standzeiten, um den gleichen Ladezustand zu erreichen.

In den inaktiven Phasen hat sich gezeigt, dass durch eine Ladeleistung von 3,67 kW gute Ergebnisse erzielt werden können. In dem entwickelten Modell sind die Taxischichten, die die durchgängige Benutzung der Fahrzeuge von einem oder mehreren Fahrern kennzeichnen, durch Pausen von durchschnittlich mehreren Stunden getrennt. Diese Zeitspanne reicht aus, um Batterien mit 24 kWh ausreichend aufzuladen. Ein großer Vorteil der Ladegeräte mit geringer Leistung liegt in der einfachen Installation in den Haushaltsnetzen, womit ein großes Angebot an leicht integrierbaren Lademöglichkeiten vorliegt. Werden größere Batteriekapazitäten eingesetzt, so verlängern sich die Ladezeiten erheblich, und die Dauer der inaktiven Phasen reicht für eine Vollladung nicht mehr aus. Dieser Umstand tritt auch durch Erhöhung des Ausnutzungsgrades der Taxis auf, da dadurch die Dauer der inaktiven Phasen deutlich verkürzt wird. Um dem entgegenzuwirken, besteht die Notwendigkeit, auf Ladestationen mit höheren Maximalleistungen auszuweichen.

Basierend auf den in den Parametervariationen gewonnenen Erkenntnissen wurden zwei Szenarien definiert, die durch unterschiedliche Ausbaustufen der Ladeinfrastruktur und die Verwendung von zwei verschiedenen Batteriekapazitäten gekennzeichnet sind. In einem weiteren Szenario wurden die Auswirkungen einer geringen Verlängerung der Ladezeiten untersucht.

Bei einem Minimalausbau an Ladestationen von 25 Stück und Fahrzeugen mit einer Batteriekapazität von 24 kWh (Szenario 1 - Minimalausbau) zeigt sich deutlich, dass der Großteil an Taxis die Gesamtheit ihrer Fahrten nicht positiv erfüllen kann und nur jede fünfte Taxischicht vollständig mit einem Elektrotaxi durchführbar ist. Diese Tatsache wird durch die Verteilung der fehlenden Energiemengen unterstrichen. Es sind teilweise Energiebeträge in der Höhe der Batteriekapazität ausständig, wobei für die Fahrzeuge als Gesamtes ein Vielfaches davon nötig wäre, um mit positiven Ladezustän-

den ihre Fahrten abschließen zu können. Eine gesamte Taxiflotte durch Elektrofahrzeuge zu ersetzen, ist mit den angenommenen Ladeparametern und den daraus folgenden Ergebnissen nicht zu bewerkstelligen. Es wird aber sehr wohl aufgezeigt, dass ein Teil der Autos ersetzt werden kann und sich einige zusammenhängende Wegketten durchführen lassen.

Werden die Anzahl der Ladestationen und die Batteriekapazität verdoppelt (Szenario 2 - Erweiterter Ausbau), können die Erfüllbarkeitsraten deutlich gesteigert werden. Die Anzahl an Taxischichten, die mit elektrischem Antrieb nicht bewältigbar sind, hat sich auf ein Viertel reduziert und mehr als die Hälfte der Taxis sind vollständig substituierbar. Außergewöhnlich lange Einzelfahrten mit erhöhtem Energieverbrauch sind weiterhin nicht durchführbar. Durch die größere Batteriekapazität und die zusätzlichen Standplätze mit Ladestationen bleibt der Ladezustand auf einem höheren Niveau und die geladene Energiemenge wird auf mehrere Plätze aufgeteilt. Obwohl insgesamt mehr Energie an den Taxistandplätzen zur Verfügung gestellt werden muss, kann eine Reduzierung der Leistungsspitzen sowie eine gleichmäßigere Belastung des Verteilnetzes festgestellt werden.

Für einen erfolgreichen Umstieg auf BEV ist aufgrund der begrenzten Reichweiten der Fahrzeuge die Anpassung des Fahrverhaltens eine weitere Möglichkeit, die Erfüllbarkeit zu steigern. In Szenario 3 (Ladezeitverlängerung) sind die Auswirkungen einer Anpassung durch Verlängerung der Ladezeiten an den Standplätzen untersucht worden. Dafür wurde die Dauer des Initialisierungsvorganges um drei Minuten gekürzt und somit die Dauer für das Aufladen der Batterien verlängert. Es zeigt sich, dass mit dieser unscheinbaren Veränderung eine Steigerung der Erfüllbarkeitsraten um 12 % bzw. 6 % erreicht werden konnte. Eine mögliche Verlängerung der Standzeitzeiten auf den Taxiplätzen ist somit eine effektive Methode, die Reichweite der Fahrzeuge etwas zu erhöhen. Da es sich nur um wenige Minuten handelt, werden die Fahrer nicht allzu sehr in ihrer Flexibilität eingeschränkt.

5 Zusammenfassung

Der Fokus dieser Arbeit lag in der Untersuchung und Bewertung des Umstieges von einer Taxiflotte mit konventionellen Taxis auf eine Flotte mit batteriebetriebenen Elektroautos. Dafür wurde basierend auf einem vorhandenen anonymisierten GPS-Datensatz der Taxivermittlungsgesellschaft 31300 die Modellierung einer Taxiflotte durchgeführt. Der Datensatz wurde durch das AIT aufbereitet und anhand eines Fahrzeugmodells um den Energieverbrauch der Wegstrecken erweitert. Eine Analyse der Daten ergab das Vorhandensein von Standzeiten mit der Dauer von einigen Minuten zwischen den Kundenfahrten und somit eine Grundvoraussetzung für die Anwendung von Ladestationen auf Taxistandplätzen. Der mittlere Energiebedarf der einzelnen Fahrtstrecken liegt im Bereich von 1,75 kWh, womit auch mit einer geringen Batteriekapazität mehrere Fahrten nacheinander durchgeführt werden können. Ein kleiner Prozentsatz des Datensatzes weist jedoch überdurchschnittlich lange Wegstrecken zwischen den Standplätzen auf, wodurch auch eine beachtliche Menge an elektrischer Energie notwendig ist und für die Erfüllbarkeit der Mobilität eine große Hürde darstellt.

Ziel der Modellierung war, durchgängige und einem Fahrzeug zuordenbare Mobilitätsdaten zu generieren, um die Simulation einer gesamten Taxiflotte durchführen zu können. Beruhend auf den statistischen Verteilungen der Fahrtparameter konnte mit der Software MATLAB ein Modell entwickelt werden, mit Hilfe dessen bei jedem Taxi die Fahrten aneinandergereiht werden und durch An- und Abmeldevorgänge am Vermittlungssystem der vorgegebene zeitliche Verlauf an angemeldeten Fahrzeuge nachgebildet wird. Die Berechnung des Ladezustandes der Batterien ermöglichte abschließend den Übergang von einer Flotte mit konventionellen Taxis auf eine Elektrotaxiflotte mit batteriebetriebenen Fahrzeugen. Als Ausgangsbasis für die Bewertung, in welchem Ausmaß die Substitution der Fahrzeuge erfolgreich durchgeführt werden kann, diente die Simulation einer Kalenderwoche. Durch den Vergleich des vorgegebenen Sollverlaufes mit jenem Verlauf der Simulation konnte eine zufriedenstellende Funktionsweise des Modells aufgezeigt und durch ähnliche Werte der Verteilungen der Fahrtparameter bestätigt werden.

Anhand der Mobilitätsdaten der verwendeten Simulationswoche und des gewählten Batterie- bzw. Lademodells wurden die einzelnen Batterieladezustände ermittelt und zwei Erfüllbarkeitsraten definiert. Eine Unterscheidung zwischen der Erfüllbarkeit einzelner Taxis und Taxischichten ermöglichte eine detaillierte und aussagekräftige Analyse. Die Durchführung einer Parametervariation zeigte die optimalen Werte der einzelnen Ladeparameter auf, um hohe Erfüllbarkeitsraten zu erhalten. Daraus ergibt sich die Forderung, Batterien mit möglichst hoher Kapazität zu verbauen, wobei hier Kapazitäten von 48 kWh als ausreichend anzunehmen sind. Um die Batterien effektiv laden zu können, müssen Ladestationen mit ausreichend hohen Ladeleistungen bereitzustellen werden. Hier zeigte sich, dass eine maximale Ladeleistung von 50 kW angestrebt werden sollte, um in den Standzeiten die Batterien schnell wieder aufladen zu können. Eine flächendeckende Ladeinfrastruktur beugt Platzproblemen bei mehreren gleichzeitig landenden Autos vor und entlastet durch Energieverteilung das Verteilnetz. Je höher die Anzahl an Ladestationen ist, desto höher sind die Werte der Erfüllbarkeitsraten. Bei der maximalen Ladeleistung in den inaktiven Phasen konnte gezeigt werden, dass hier aufgrund längerer Pausen einphasige Ladegeräte mit einer Leistung von 3,67 kW ausreichend sind, um die Batterien vor Beginn einer neuen Taxischicht vollständig zu laden. In drei definierten Szenarien sind anschließend fehlende Energiebeträge und Ladeprofile detailliert analysiert worden. Durch einen Minimalausbau der Ladeinfrastruktur mit 25 umgerüsteten Standplätzen und Verwendung von Batterien mit 24 kWh Kapazität ist es möglich, etwas mehr als 6% der Taxis der Flotte durch Elektrotaxis zu ersetzen. Fahrzeuge, die die gesamte Simulationswoche nicht erfolgreich absolvieren, können zumindest einzelne Taxischichten durchführen. Durch Verdopplung der Batteriekapazität und Erhöhung des Ausbaugrades auf 50 Standplätze mit Lademöglichkeit kann die Erfüllbarkeit der Mobilität deutlich gesteigert werden. 65% der Fahrzeuge sind vollständig substituierbar und fünf von sechs Taxischichten können erfolgreich mit Elektrotaxis absolviert werden. Einige Einzelfahrten, für die aufgrund der langen Distanzen die Energiespeicher zu klein dimensioniert sind, sind weiterhin vorhanden. Eine Verlängerung der zur Verfügung stehenden Ladezeit um drei Minuten bewirkt einen Anstieg der Erfüllbarkeitsraten um 12 bzw. sechs Prozent. Es zeigt, dass durch geringfügige Änderungen der Zeitspannen ein wichtiger Beitrag für ausreichende Ladezustände geleistet wird. Somit sind neben Infrastruktur und technischer Ausstattung auch das Fahrverhalten der Fahrzeuglenker und die Vermittlung der Fahrten durch die Vermittlungsgesellschaft bedeutend für den Einsatz von Elektrofahrzeugen.

Das Bestreben, die Fahrzeuge einer herkömmlichen Taxiflotte durch Elektrofahrzeuge zu ersetzen, ist durch seine Komplexität eine anspruchsvolle Herausforderung. Der Aus-

baugrad der Ladeinfrastruktur, die Größe der Batteriekapazitäten und die angebotenen Ladeleistungen tragen maßgeblich zur erfolgreichen Erfüllung der Mobilität bei und beeinflussen diese abhängig von deren Kombination. Für die Durchführung der Taxischichten wird eine bestimmte Menge an Energie benötigt. Sie kann entweder zu Beginn einer Schicht durch sehr große Batteriekapazitäten, durch zwischenzeitliches Aufladen an den Standplätzen oder aus einer Kombination von beiden zur Verfügung gestellt werden. Welche Option hauptsächlich Anwendung finden soll, wird durch die Bereitschaft zur Veränderung des Mobilitätsverhaltens und auch durch die Höhe der anfallenden Investitionskosten bestimmt.

Ausblick

Eine Anpassung des Fahrverhaltens kann einen entscheidenden Beitrag zur Verwendung von BEV liefern. Je nach Bedarf lassen sich zusätzliche Ladestopps und Verlängerungen der Ladezeiten in die Schichtabläufe integrieren, um dadurch ausreichend hohe Ladezustände zu Verfügung zu haben. Entscheidend für die effektive Umsetzung ist ein gutes Vermittlungsmanagement und eine zuverlässige Ermittlung der verbleibenden Reichweite der Taxis. Dadurch können Fahrten optimal geplant und die einzelnen Fahrzeuge abhängig von deren verfügbarer Reichweite gezielt eingesetzt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Michael ANDERL u. a. *Klimaschutzbericht 2012*. Umweltbundesamt, 2012.
- [2] Wolfgang GAWLIK u. a. *ZENEM – Zukünftige Energienetze mit Elektromobilität Endbericht*. Techn. Ber. Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, 2013.
- [3] Frank HAÜBER und Yury LUCHKO. *Mathematische Modellierung mit MATLAB®*. Spektrum Akademischer Verlag, 2011.
- [4] Shinya KITANO u. a. *Development of Large-sized Lithium-ion Cell “LEV50” and its Battery Module “LEV50-4” for Electric Vehicle*. Techn. Ber. GS Yuasa Corporation, 2008.
- [5] THE MATHWORKS. *Support*. zuletzt besucht am 07.08.2013. URL: <http://www.mathworks.de/de/help/index.html>.
- [6] TESLA MOTORS. *Tesla Motors*. zuletzt besucht am 22.08.2013. URL: <http://www.teslamotors.com/>.
- [7] NISSAN. *Nissan Leaf*. zuletzt besucht am 07.08.2013. URL: <http://www.nissan.at/AT/de/vehicle/electric-vehicles/leaf.html>.
- [8] WIRTSCHAFTSKAMMER ÖSTERREICH. *Kollektivvertrag für Angestellte im Taxi- und Mietwagengewerbe*. zuletzt besucht am 22.08.2013. URL: http://portal.wko.at/wk/format_detail.wk?angid=1&stid=646148&dstid=2638.
- [9] Andreas SCHUSTER. »Batterie- bzw. Wasserstoffspeicher bei elektrischen Fahrzeugen«. Diplomarbeit. TU Wien, September 2008.
- [10] Mark STEYVERS. *Computational Statistics with Matlab*. Mai 2011.

Abbildungsverzeichnis

2.1	kumulierte Häufigkeitsverteilung des Qualitätsfaktors, basierend auf den Daten von [2]	7
2.2	Verlauf der Anzahl der angemeldeten Taxis der KW 21 des Jahres 2011, basierend auf den Daten von [2]	8
2.3	Häufigkeitsverteilung der Wartezeiten am Standplatz je Fahrt, basierend auf den Daten von [2]	9
2.4	Häufigkeitsverteilung des Energieverbrauches je Fahrt, basierend auf den Daten von [2]	9
3.1	Überblick des Modells	11
3.2	Übergangsgraph zur Aneinanderreihung von Fahrten	14
3.3	Häufigkeitsverteilung der Standplätze im 1. Bezirk, ausgehend vom Ta- xistand mit der Kennnummer 101	15
3.4	Prinzip der Inversionsmethode ($X = 6$ bei einer Zufallszahl $U = 0,8$), nach [10]	17
3.5	Ablaufdiagramm zur Suche einer passenden Taxifahrt	18
3.6	Ablaufdiagramm des Hauptprogrammes	22
3.7	Zeitverlauf der Ladeleistung einer 24 kWh Batterie beim Ladevorgang mit 50 kW	29
3.8	Zeitverlauf des SOC einer 24 kWh Batterie beim Ladevorgang mit 50 kW	30
3.9	Berechnung des SOC anhand des Zeitverlaufes aus Abbildung 3.8	31
3.10	Vergleich des zeitlichen Verlaufes der am System angemeldeten Taxis, 11 Tage, 13. - 24.05.2011	32
3.11	Vergleich des zeitlichen Verlaufes der am System angemeldeten Taxis, 7 Tage, Kalenderwoche 21 des Jahres 2011	33
3.12	zeitlicher Verlauf der fahrenden und wartenden Taxis , 7 Tage, Kalenderwoche 21 des Jahres 2011	34
3.13	Anteil, wie oft eine Fahrt gewählt wurde	35

3.14	Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Wartezeit je Fahrt zwischen Datensatz und Modell	36
3.15	Vergleich der Häufigkeitsverteilungen des Energieverbrauches je Fahrt zwischen Datensatz und Modell	36
3.16	Zeitdauer der Taxischichten aller aktiven Fahrzeuge	38
3.17	Häufigkeitsverteilung der Taxischichten, bezogen auf die aktive Flotte . .	39
4.1	Erfüllbarkeitsraten der Mobilität in Abhängigkeit von der Batteriekapazität	43
4.2	Erfüllbarkeitsraten der Mobilität in Abhängigkeit von der Anzahl der Standplätze mit Lademöglichkeit	46
4.3	Erfüllbarkeitsraten der Mobilität in Abhängigkeit von der maximalen Ladeleistung an den Standplätzen	49
4.4	Erfüllungsraten der Mobilität in Abhängigkeit von der maximalen Ladeleistung in den inaktiven Phasen	52
4.5	Erfüllungsgrad der Taxischichten der aktiven Fahrzeugflotte; Szenario 1 .	55
4.6	Fehlende Energiemenge, um die Mobilität zu erfüllen; Szenario 1	56
4.7	Summenladeprofil eines Taxistandplatzes in Szenario 1; die rote Linie gibt den Mittelwert an	57
4.8	Anzahl der am Standplatz ladenden Fahrzeuge in Szenario 1; die rote Linie gibt den Mittelwert an	58
4.9	Erfüllungsgrad der Taxischichten der aktiven Fahrzeugflotte; Szenario 2 .	60
4.10	Fehlende Energiemenge, um die Mobilität in zu erfüllen; Szenario 2	61
4.11	Summenladeprofil eines Taxistandplatzes in Szenario 2; die rote Linie gibt den Mittelwert an	62
4.12	Anzahl der am Standplatz ladenden Fahrzeuge in Szenario 2; die rote Linie gibt den Mittelwert an	62
4.13	Erfüllungsgrad der Taxischichten der aktiven Fahrzeugflotte; Szenario 3 .	64
4.14	Fehlende Energiemenge, um die Mobilität zu erfüllen; Szenario 3	65
4.15	Fehlende Energiemenge einzelner Fahrten um die Mobilität zu erfüllen; Szenario 3	66
4.16	Summenladeprofil eines Taxistandplatzes in Szenario 3; die rote Linie gibt den Mittelwert an	67
4.17	Anzahl der am Standplatz ladenden Fahrzeuge in Szenario 3; die rote Linie gibt den Mittelwert an	68

Abkürzungsverzeichnis

AIT *Austrian Institute of Technology*

BEV *Battery-Powered Electric Vehicle*

C-Rate *Capacity Rate*

SOC *State Of Charge*

TSP *Taxi**s**tand**p**latz*

ZENEM *Zukünftige **E**nergienetze mit **E**lektromobilität*