

Fakultät für Maschinenwesen

Evaluation von emissionsoptimaler Mobilität im ländlichen Raum

Dipl.-Ing. Univ. Maria Brigitte Ott

Vollständiger Abdruck der von der
Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzende: Prof. Dr. Sonja Berensmeier

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp
2. Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner

Die Dissertation wurde am **10.08.2017** bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die **Fakultät für Maschinenwesen** am **22.11.2017** angenommen.

Evaluation von emissionsoptimaler Mobilität im ländlichen Raum

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieurs
an der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München.

Vorsitzende	Prof. Dr. Sonja Berensmeier
Prüfende	1. Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp 2. Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner
Eingereicht von	Maria Brigitte Ott, geb. Kugler Hofmannstr. 32 81379 München +49 176 20552977
Eingereicht am	München, den 10.08.2017

Kurzfassung

Elektrofahrzeuge können mobilitätsbedingte CO₂-Emissionen reduzieren. Durch die Verwendung von Sonnenenergie zum Laden kann der Nutzer nicht nur die Emissionen weiter senken, sondern auch unabhängig vom Stromanbieter werden. Als Bewertungskonzept wird in dieser Arbeit untersucht, in wie weit Privatanutzer im ländlichen Raum durch innovative Mobilitätskonzepte ihre Emissionen reduzieren können. Die Evaluation beruht dabei auf einer qualitativen Modellierung des Mobilitätsbedarfs unter Berücksichtigung einer Szenario-Analyse.

Abstract

Electric vehicles can reduce mobility related CO₂ emissions. By charging the vehicle with solar energy, the user can not only further decrease his emissions but also become more independent from the electricity provider. In this thesis an evaluation concept identifies the emission reduction potential of private users in non-urban areas through innovative mobility concepts. The evaluation is based on a qualitative modelling of the mobility demand and considering of a scenario analysis.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München unter dem Ordinariat von Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp. Aus diesem Grund möchte ich mich an erster Stelle bei ihm bedanken. Seine Unterstützung während und nach meiner Zeit am Lehrstuhl und sein fundiertes und effizientes Feedback zu allen meinen offenen Fragen haben diese Dissertation erst möglich gemacht. Nicht nur die wissenschaftliche Arbeit hat mir sehr viel Freude bereitet, auch die angenehmen Rahmenbedingungen in sowohl organisatorischer als auch kollegialer Hinsicht lassen mich die Zeit am Lehrstuhl vermissen.

Des Weiteren gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner mein Dank für die unkomplizierte Bereitschaft zur Übernahme des Zweitgutachtens sowie seine hilfreichen Anmerkungen und Vorschläge zu meiner Arbeit. Bei Frau Prof. Dr. Sonja Berensmeier bedanke ich mich für die herzliche Betreuung des Verfahrens.

Arbeitsinhalte können noch so spannend sein, wenn die Kollegen dazu nicht passen, wird man nur schwer glücklich mit der Arbeit. Daher kann ich hier nur sagen: „Danke Jungs (und Mädels)“ für die tolle Zeit gemeinsam mit euch am Lehrstuhl – oder wo immer wir auch sonst zusammen waren! Ganz besonders dankbar bin ich, dass ich Mitglied der „Smarties“ sein durfte: mit euch hat es einfach immer Spaß gemacht und ich hoffe, wir sehen uns auch in Zukunft noch häufiger. Außerdem möchte ich den FTM-Mädels Danke sagen, dass wir gemeinsam einfach immer ein bisschen Girl-Power am Lehrstuhl verbreitet haben.

Eine besonders wichtige Person, nicht nur in der Arbeit, sondern auch weit darüber hinaus, möchte ich an dieser Stelle nennen: Alexa, danke für die Zeit, die wir zusammen gearbeitet haben, danke für die literweise Kaffee, die wir gemeinsam getrunken haben und danke für deine Freundschaft.

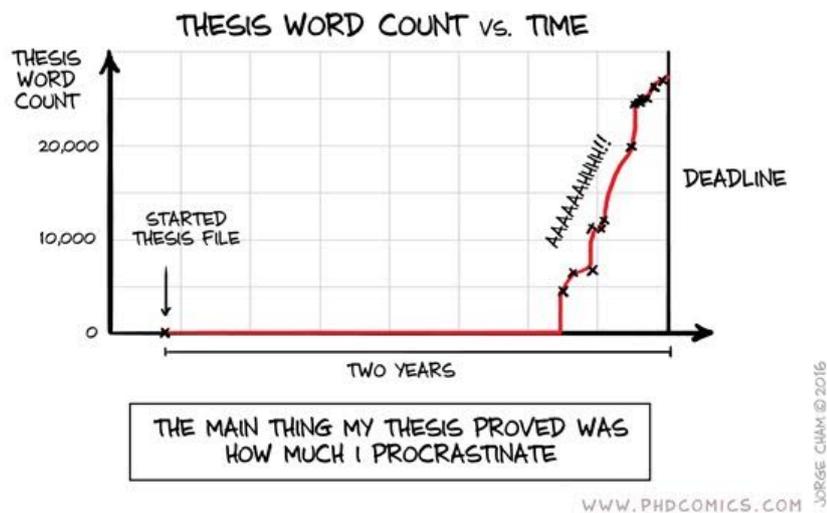
Ein weiterer wichtiger Beitrag zu dieser Arbeit sind alle, die mir durch ihr fachliches und grammatikalisches Feedback geholfen haben, möglichst wenig Fehler am Ende abzugeben. Daher vielen Dank an meine Korrekturleser Michael Wittmann, Sebastian Osswald, Jürgen Lohrer, Alexa Lohrer und meine beiden Schwestern Amelie und Franziska.

Damit ist ein sehr guter Übergang zu den nächsten wichtigen Personen gelegt, die mich immer in meinen Plänen und meinen Entscheidungen unterstützt und gestärkt haben: Vielen Dank Mama und Papa! Ohne euch wäre ich heute nicht hier.

Zu guter Letzt gibt es eine Person, der ich nicht nur Danke sagen möchte, sondern der ich irgendwo auch diesen heutigen Erfolg zu VERdanken habe. Ohne ihn wäre ich wahrscheinlich nicht mal übers Grundstudium hinausgekommen, da ich das Lernenmüssen nicht so ernst genommen habe. Auch im weiteren Verlauf des Studiums konnte ich immer zu ihm gehen und darauf vertrauen, dass er mir ehrliches Feedback geben wird. Wenn während der Zeit am Lehrstuhl nichts mehr weiter ging und ich einfach kein Ziel gesehen habe, hat er mich aufgefangen und meinen Kopf entwirrt. Aus diesem Grund mein größtes Danke an meinen konstruktivsten Kritiker, meinen zuverlässigsten Freund und besten Ehemann Daniel!

München, im Juli 2017

Maria Ott



Für alle zukünftigen Doktoranden hat PhD-Comics das Anfertigen einer Dissertation auf den Punkt gebracht (auch wenn man vorher davon überzeugt ist, dass man selbst dieses Problem nie haben wird...) [1]

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation.....	2
1.2	Aufbau der Arbeit	3
2	Stand der Wissenschaft.....	5
2.1	Grundlagen des Energiebedarfs im Haushalt.....	5
2.2	Methoden zur Steigerung des Eigenverbrauchs	7
2.3	Kombination von Elektromobilität und Energiegewinnung	9
2.4	Diskussion des Stands der Wissenschaft und Ableitung der Themenstellung	10
3	Entwicklung eines repräsentativen Mobilitätsplans	15
3.1	Stand der Wissenschaft zum Mobilitätsverhalten	15
3.1.1	Flottenversuche als Mittel zur Datenaufzeichnung	16
3.1.2	Analyse und Interpretation – Fahrverhalten, Energie und Emission ..	19
3.1.3	Prädiktion des Mobilitätsverhaltens	21
3.2	Vorgehen zur Datensammlung und -aufbereitung	23
3.2.1	SmartMeter-Daten	24
3.2.2	Smartphone-Aufzeichnung	25
3.2.3	Verkehrsmittelerkennung.....	28
3.3	Mobilitätsanalyse.....	30
3.3.1	Bewertung bezüglich multimodaler Mobilität	30
3.3.2	Einsatzfähigkeit von Elektromobilität.....	32
3.3.3	Einfluss von repetitiver Mobilität und Mobilitätsrauschen	35
3.4	Resultierender Wochenmobilitätsplan	37
3.4.1	Definition Wochenmobilitätsplan	37
3.4.2	Logikentwicklung zur alltäglichen Mobilität.....	37
3.4.3	Aufbau des Wochenmobilitätsplans	43
3.5	Diskussion der Güte des Mobilitätsplans	45
4	Systematische Optimierung und Evaluation des Emissionspotentials	49
4.1	Stand der Wissenschaft zu Photovoltaik-Anlagen sowie Pufferspeichern im Privatgebrauch	49
4.1.1	Eigenschaften, Dimensionierung und Anschaffungskosten.....	50
4.1.2	Berechnung des Photovoltaik-Ertrags.....	52
4.1.3	Eigenverbrauch der Photovoltaik-Energie.....	54
4.2	Vorgehen zur Bestimmung des Emissionspotentials	56
4.2.1	Verknüpfung von Mobilität und Emission	56
4.2.2	Ladeverhalten als Randbedingung für Emissionseinsparung	58
4.2.3	Integration von Pufferspeichern zur Emissionseinsparung.....	60
4.3	Optimierung der Haustechnik auf verschiedene Fahrzeuganforderungen	60

4.4	Berechnung und Validierung des Emissionspotentials.....	63
4.4.1	Mobilitätsvariabilität und optimierter Wochenmobilitätsplan	63
4.4.2	Bewertung des Emissionspotentials	65
4.5	Resultierendes Emissionspotential	67
4.5.1	Emissionspotential und Haustechnik	67
4.5.2	Szenario-Analyse.....	71
4.6	Diskussion des Emissionspotentials	76
5	Nutzerakzeptanz – Emissionsoptimale Handlungsempfehlungen	81
5.1	Ermittlung der Nutzerakzeptanz	81
5.2	Vorgehen zur Bestimmung der Nutzerakzeptanz	82
5.3	Empfehlungen basierend auf untersuchten Familien	84
5.4	Ableitung von allgemeingültigen Empfehlungen.....	87
5.5	Nutzerakzeptanz als einschränkende Größe	90
6	Diskussion	93
7	Zusammenfassung	97
	Abbildungsverzeichnis.....	i
	Tabellenverzeichnis.....	vii
	Formelzeichen.....	ix
	Abkürzungsverzeichnis.....	xi
	Literaturverzeichnis.....	xxvii
	Verzeichnis eigener Veröffentlichungen	xxix
	Studentische Arbeiten	xxxii
A	Anhang.....	xxxiii
A.1	Rechenaufwand Optimierungsprozess.....	xxxiii
A.2	Ausgangslage Emissionen.....	xxxiv
A.3	Prozentuale Emissionseinsparung	xxxvii
A.4	Benötigte PV-Fläche.....	xl
A.5	Emissionspotential.....	xli
A.6	Kostenanalyse	lxi

1. Einleitung

Die Reduktion von Emissionen spielt bereits heute eine große Rolle. In den nächsten Jahren wird diese noch wichtiger werden. Treibhausgase, die durch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen entstehen, tragen unmittelbar zum Treibhauseffekt und damit zur Klimaerwärmung bei. Dieser Trend soll durch verminderte Emissionen gestoppt bzw. die weitere Erderwärmung verhindert werden. Hierbei ist nicht nur die Industrie zum Handeln gezwungen, sondern auch Privatpersonen in verschiedenen Situationen. Mit fast 90 % stellt Kohlenstoffdioxid (CO₂) den relevantesten Anteil an Treibhausgasen dar (Abbildung 1.1). Damit ist eine Reduzierung dieser Emissionen von entscheidender Bedeutung. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) stellt in ihrem Bewertungsbericht 2014 [2, S. 603] fest, dass 23 % der kompletten Ausstöße von CO₂ durch den Verkehrssektor verursacht werden.

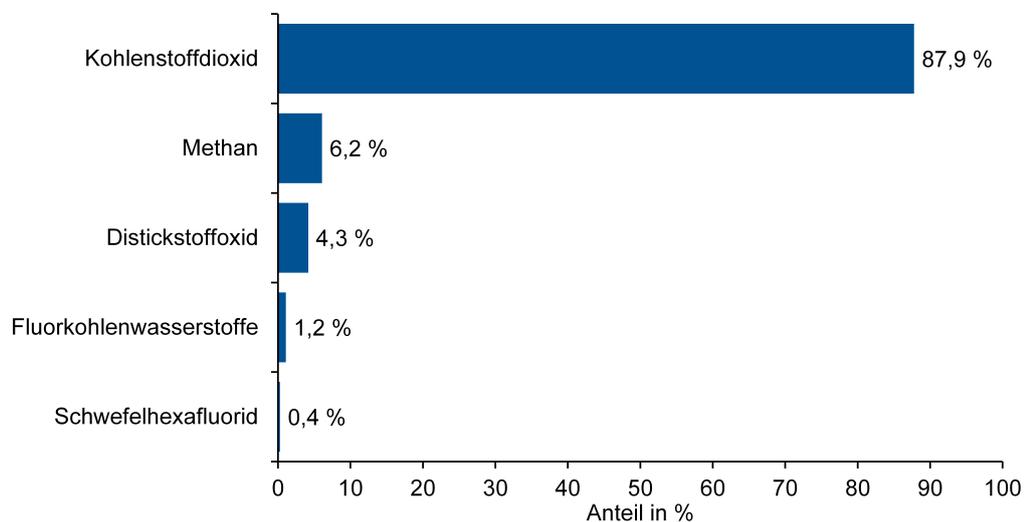


Abbildung 1.1 Anteile der Treibhausgase an den Emissionen (berechnet in CO₂-Äquivalenten) 2014; Gesamt: 902 Millionen Tonnen [3]

Der weltweite Mobilitätsbedarf wird weiter steigen. Damit erhöht sich die zu erwartende produzierte Emissionsmenge. Dadurch nimmt die Notwendigkeit, mögliche Lösungen zur Reduzierung von Emissionen zu entwickeln und diese auf Alltagstauglichkeit zu überprüfen, einen immer wichtigeren Stellenwert ein.

Wie Creutzig et al. [4] anführen, können verkehrsbedingte CO₂-Emissionen auf verschiedene Arten vermindert werden. Einerseits kann der gesamte Mobilitätsbedarf gesenkt werden. Auf der anderen Seite widerspricht das dem Grundbedürfnis nach Mobilität, das vor allem für den Privatanutzer von großer Relevanz ist und dadurch einen starken Einfluss auf den zukünftigen Energiebedarf haben wird [5]. Als weitere Möglichkeiten zur CO₂-Einsparung gelten die Steigerung der Energieeffizienz und der Einsatz von Treibstoffen mit geringerem CO₂-Ausstoß. Diese Ziele können über technische Optimierungen oder Nutzung von Alternativen von alternativen Treibstoffen erreicht werden [6]. Ein wichtiger Aspekt hierbei sind alternative Antriebsarten, bei denen der Treibstoff aus er-

erneuerbaren Quellen gewonnen wird oder Antriebsemissionen und CO₂-Ausstoß entkoppelt werden. Außerdem kann durch ein intelligenteres und bewussteres Mobilitätsverhalten direkt Einfluss auf den individuellen CO₂-Ausstoß genommen werden.

1.1. Motivation

Das Elektrofahrzeug (engl. Battery Electric Vehicle) (BEV) ist durch die Nutzung von Strom als Antriebsenergie und der damit verbundenen Reduktion von direkten Emissionen eine sinnvolle Lösung für das alltägliche Mobilitätsverhalten. Durch die Möglichkeit, das BEV mit Strom zu laden, der aus erneuerbaren Energien erzeugt wird, kann ein signifikanter Beitrag hin zu einer besseren CO₂-Bilanz geleistet und somit die verkehrsbedingten Emissionen gesenkt werden. Vor allem in Großstädten, die von starken Verkehrsbelastungen betroffen sind, können BEV dazu beitragen, die direkten Emissionen und die Lärmentwicklung zu reduzieren [7]. Das städtische Mobilitätsverhalten mit Fahrtlängen von meist unter 50 km und im Mittel sogar nur etwa 10 km [8] ermöglicht die Einsatzfähigkeit von BEV.

Allerdings stehen nach Newman et al. [9] den Vorteilen in der Nutzung von BEV in Großstädten auch einige Nachteile gegenüber. Vor allem die schwierige Parksituation führt dazu, dass ein gleichzeitiges und zeitlich unbeschränktes Parken und Laden in einer akzeptablen Laufdistanz vom Wohnort des Nutzers nur schwer realisierbar ist [10]. Wie Newman et al. [9] allerdings auch bereits anmerken, treten diese Schwierigkeiten bei einer Nutzung im ländlichen Raum weniger bis überhaupt nicht auf. In diesem Nutzungskontext nimmt die Anforderung, dass alle Fahrten abgedeckt werden müssen, einen wesentlich höheren Stellenwert ein.

Ein weiterer Vorteil des ländlichen Raums ist die höhere Verfügbarkeit einer Photovoltaik-Anlage (PV), wie die Darstellung der installierten Leistung in Abbildung 1.2 zeigt.

Wirth und Schneider [12] stellen fest, dass im Jahr 2015 7,5 % des gesamten deutschen Energiebedarfs durch PV bereit gestellt wurden. Abhängig von der Wetterlage und der Art des Wochentags können bis zu 50 % des gesamten deutschen Energieverbrauchs durch Sonnenenergie gedeckt werden.

Wagner et al. [13] zeigen dazu, dass die Kombination von PV mit Elektromobilität eine sinnvolle Herangehensweise darstellt, CO₂-Emissionen effektiv zu reduzieren. Allerdings muss dabei auch beachtet werden, dass die durch PV erzeugte Energiemenge starken Schwankungen unterliegt. Diese können nach Wesselak und Voswinkel [14] durch das Wetter, die Jahreszeiten oder auch durch konstruktive Randbedingungen beeinflusst werden. Dadurch ist eine tiefere Evaluation des Einflusses der PV notwendig, weil hierdurch die Ladefunktion beeinträchtigt werden kann.

In dieser Arbeit wird ein ganzheitlicher Ansatz vorgestellt, der die Kombination von BEV mit der Energieerzeugung aus einer eigenen PV evaluiert. Dazu wird das Mobilitätsverhalten für Privatnutzer im ländlichen Raum beschrieben, analysiert und bezüglich des zu

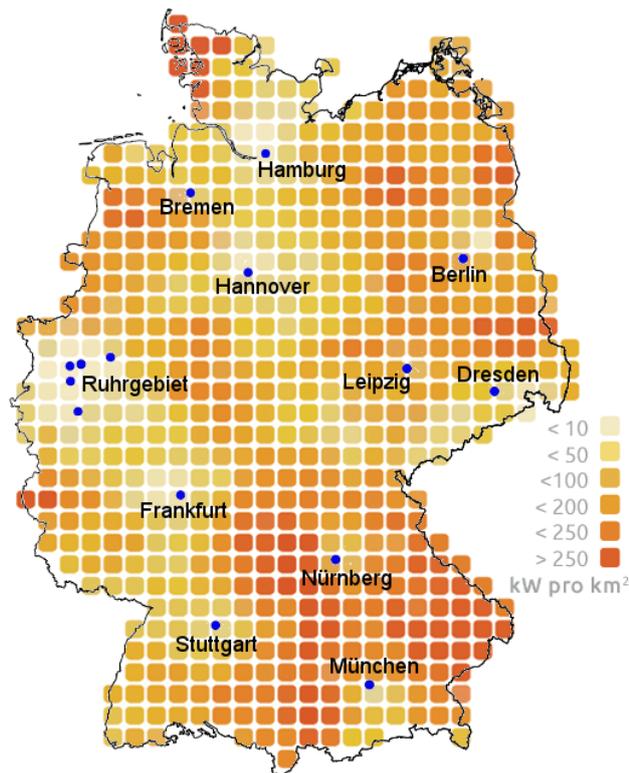


Abbildung 1.2 PV in Deutschland – Installierte Leistung pro Quadratkilometer [11]

erwartenden Einsparpotentials bewertet. Als wichtiger Faktor fließt dabei die Nutzerakzeptanz in die Bewertung mit ein.

1.2. Aufbau der Arbeit

Nach diesem einleitenden Abschnitt gliedert sich die vorliegende Arbeit in sechs Hauptkapitel. Kapitel 2 geht auf den allgemeinen Stand der Wissenschaft bezüglich der Nutzung von dezentraler, privater Energiegewinnung und der Kombination mit Elektromobilität ein und analysiert die Herausforderungen für diesen Anwendungsfall. Daraus wird die Zielsetzung der Arbeit abgeleitet. Kapitel 3 befasst sich mit dem Aspekt der Erfassung, Analyse und Interpretation des Mobilitätsverhaltens. Es wird ein Vorgehen zur generischen Beschreibung des Mobilitätsbedarfs vorgestellt. In Kapitel 4 werden aufbauend auf dem erstellten Mobilitätsplan die resultierenden Emissionen untersucht. Durch systematische Adaptionen wird das Potential der Emissionseinsparungen ermittelt und bewertet. Es werden verschiedene Konstellationen zum Energiemanagement betrachtet. Anschließend stellt Kapitel 5 das Emissionspotential in den Kontext der Nutzerakzeptanz. Daraus schlussfolgernd werden qualitative Handlungsempfehlungen abgeleitet. Die Arbeit schließt mit einer Diskussion der Ergebnisse und der darauf folgenden Zusammenfassung in Kapitel 6 .

2. Stand der Wissenschaft

Dieses Kapitel geht im Allgemeinen auf den derzeitigen Stand der Wissenschaft bezüglich der Integration von BEV in den Energiehaushalt und den damit verbundenen Emissionen ein. Es wird dargestellt, wie der Eigenverbrauch von selbst produzierter Energie gefördert werden kann und welche Potentiale sich daraus ergeben. Die Ableitung der Themenstellung dieser Arbeit erfolgt aus der anschließenden Diskussion des Stands der Wissenschaft. Detailliertere Auseinandersetzungen zum Stand der Wissenschaft finden sich zu Beginn der jeweiligen Kapitel.

2.1. Grundlagen des Energiebedarfs im Haushalt

Das tägliche Leben ist durch die Nutzung und Umwandlung von Energie gekennzeichnet. Vor allem für den privaten Alltag ist Energie für den Betrieb einer großen Anzahl von Geräten, egal ob kleine Elektrogeräte oder Personenkraftwagen (Pkw) für die regelmäßige Pendelstrecke, notwendig. Auch der Konsum von Lebensmitteln wird erst durch den Einsatz von Energie zu deren Herstellung möglich. Durch die historische Entwicklung der Erzeugung aus fossilen Brennstoffen wird Energie mit der Emission von CO₂ verknüpft. Durch verschiedene Ansätze sollen die Emissionen messbar und damit vergleichbar gemacht werden [15].

Wie Druckman und Jackson [16] beschreiben, ist der private CO₂-Ausstoß in vier Hauptursachen aufteilbar:

1. CO₂, das in Gütern und Dienstleistungen steckt, die für das alltägliche Leben benötigt werden. Es wird bei der Produktion oder dem Transport gebildet.
2. CO₂-Emissionen durch die direkte Nutzung von Brennstoff. Es wird die Stromversorgung des Haushalts hinzugerechnet, weil die Stromherstellung immer noch zu einem großen Teil auf (fossilen) Brennstoffen beruht.
3. CO₂-Emissionen durch private Mobilität und die Nutzung des eigenen Pkws.
4. CO₂-Emissionen durch private Flugreisen.

Weber und Matthews [17] untersuchen die privaten CO₂-Emissionen anhand detaillierter Unterscheidungskategorien, wie sie in Abbildung 2.1 aufgeschlüsselt sind. Es wird verdeutlicht, dass die CO₂-Emissionen zu einem großen Teil auf die Positionen Mobilität und Haushaltsenergieverbrauch zurückzuführen sind. Außerdem konstatieren sie, dass der CO₂-Ausstoß eng mit dem Haushaltsbudget zusammenhängt. Haushalte mit größerem verfügbarem Budget verursachen daher mehr Emissionen. Dies hängt vor allem mit vermehrten Aufwendungen für private Mobilität zusammen.

Bin und Dowlatabadi [18] stellen die CO₂-Emissionen verursacht durch den Privatsektor oder den Industriesektor gegenüber. Dabei stellen sie fest, dass mehr als 80 % des

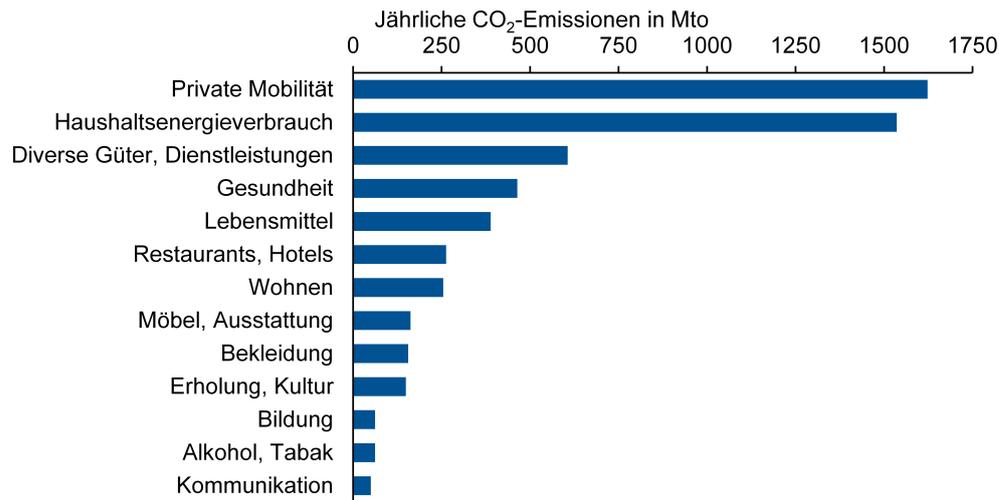


Abbildung 2.1 Aufstellung der jährlichen Emissionen für verschiedene alltägliche Bereiche in den Vereinigten Staaten von Amerika [17]

emittierten CO₂ in den Vereinigten Staaten von Amerika durch die Nachfrage der Verbraucher nach Konsumgütern hervorgerufen werden. Des Weiteren beträgt der Anteil im Bruttoinlandsprodukts infolge von Energienutzung und Mobilität durch Privatnutzer nur 4%. Im Gegensatz dazu sind sie jedoch für 28% des tatsächlichen Energieverbrauchs – und damit der CO₂-Emissionen – verantwortlich. Daher ist eine Emissionsreduktion im Privatsektor ein sinnvoller Stellhebel.

Wie eine Emissionsreduktion für Privathaushalte aussehen und durch welche Maßnahmen diese umgesetzt werden kann, stellen Druckman und Jackson [19] über eine Szenario-Analyse vor. Es werden wesentliche Emissionsverursacher im Privathaushalt aufgeschlüsselt und anhand der Einsparpotentiale untersucht (Abbildung 2.2). Als Einsparpotential ist die Reduktion auf tatsächlich notwendige Ausgaben und Aufwendungen definiert.

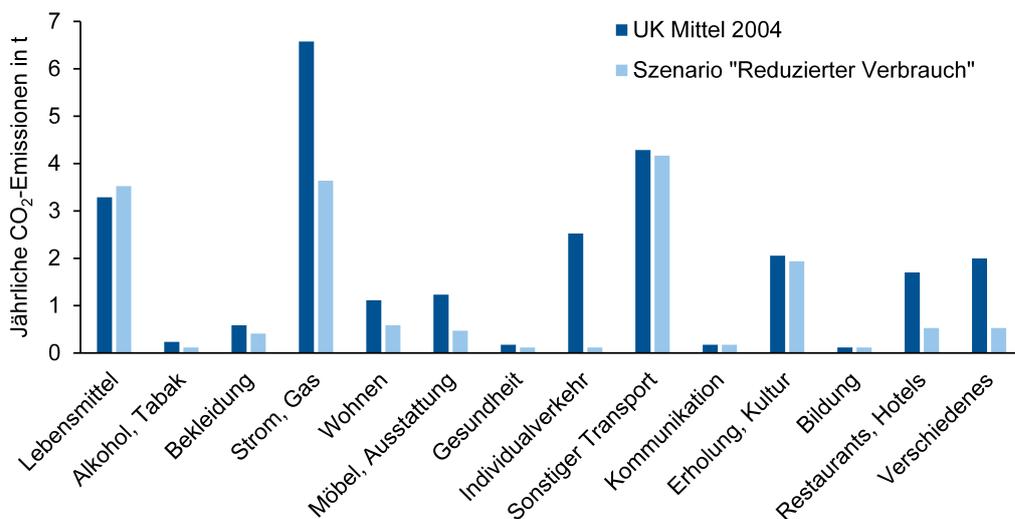


Abbildung 2.2 Vergleich der mittleren CO₂-Emissionen pro Haushalt aus tatsächlichen Verbräuchen und der Szenario-Analyse [19]

Dieses Potential zur möglichen Einsparung ist signifikant. Vor allem im Individualverkehr und im Haushaltsenergieverbrauch können große Einsparungen erzielt werden.

Kerkhof et al. [20] zeigen ebenfalls, dass die größten Treiber für private CO₂-Emissionen die Faktoren Haushaltsenergieverbrauch und Transport sind (Abbildung 2.3). Außerdem wird ein gesteigertes Emissionsaufkommen – und damit größeres Potential zur Einsparung – in Ländern mit mehrheitlich ländlicheren Umgebungen deutlich.

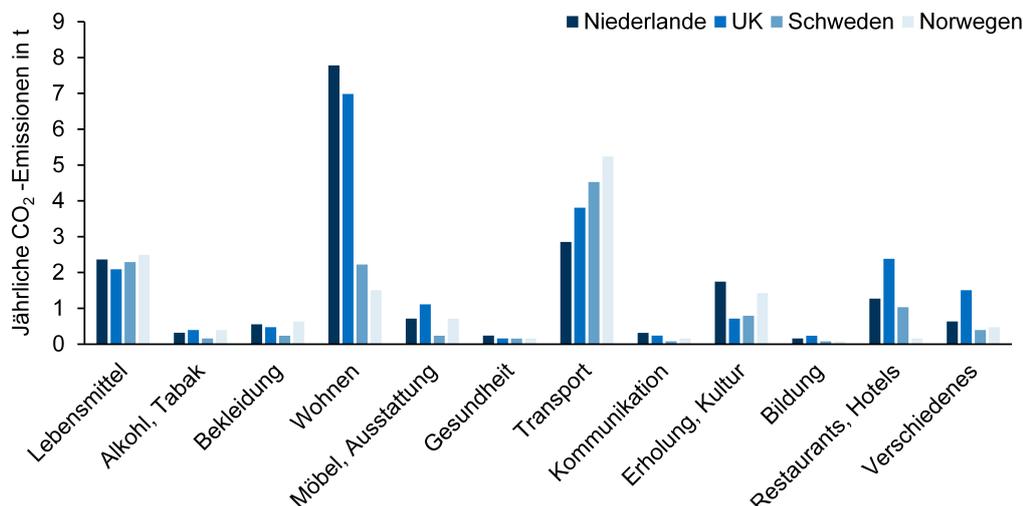


Abbildung 2.3 Zusammensetzung der jährlichen CO₂-Emissionen des durchschnittlichen Haushalts in vier Ländern [20]

2.2. Methoden zur Steigerung des Eigenverbrauchs

Als geeignete Möglichkeit, den Ausstoß von CO₂ zu reduzieren, gilt die Integration von erneuerbarer Energie in die Energiegewinnung. Perry et al. [21] analysieren dazu das Potential zur Emissionseinsparung, wenn Energie aus erneuerbaren Quellen oder durch thermische Abfallverwertung generiert wird. Es wird gezeigt, dass die Integration von erneuerbarer Energie in den Energiehaushalt gut funktioniert. Dadurch senkt sich direkt der CO₂-Fußabdruck.

Die Methode der Verwendung von Strom aus einer eigenen PV wird als Eigenverbrauch bezeichnet. Er stellt ein direkt und einfach umsetzbares Mittel dar, CO₂-Emissionen in der privaten Nutzung einzusparen. Beim Eigenverbrauch wird, wie in Abbildung 2.4 gezeigt, der durch die PV generierte Strom direkt für die Verbraucher im Haushalt verwendet. Nur in Zeiten ohne PV-Ertrag muss dann auf das Stromnetz zurückgegriffen werden.

Ein Nachteil der Nutzung von Solarenergie ist die Abhängigkeit von Tageszeit, Wetter und Saison. Dieser Umstand erschwert es, erneuerbare Energie als konstanten Faktor in das Stromnetz zu integrieren. Masa-Bote et al. [23] sehen daher für PV den besonderen Vorteil im Eigenverbrauch. Kombinationen mit einer aktiven Laststeuerung und vor allem der Zwischenspeicherung in lokalen Pufferspeichern sind von wirtschaftlichem und

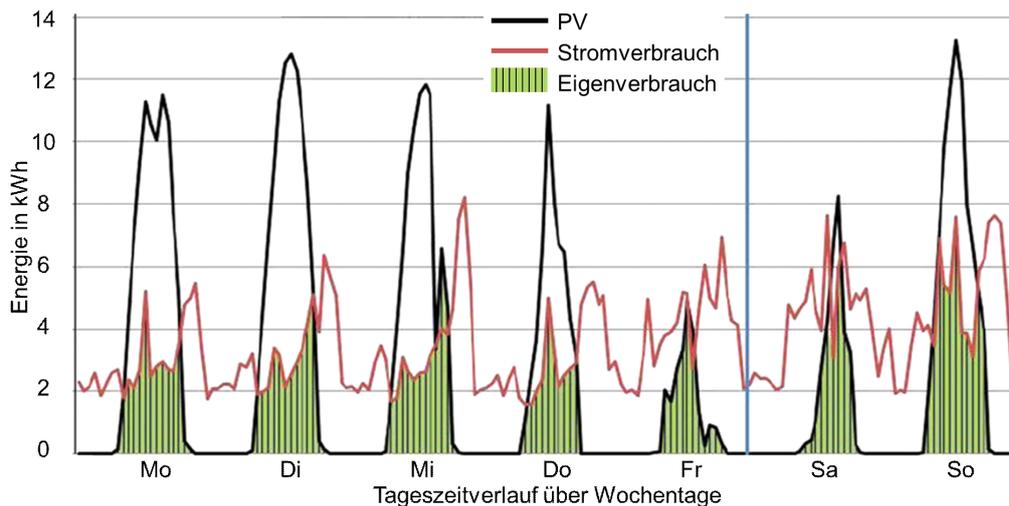


Abbildung 2.4 Vergleich der Verläufe von Stromverbrauch, generierter PV-Energie und Eigenverbrauch während einer Sommerwoche [22]

energieeffizientem Interesse. Durch diese Herangehensweise kann der Eigenverbrauch deutlich gesteigert werden.

Zu dem gleichen Ergebnis kommen Luthander et al. [24]. Sie stellen fest, dass der Eigenverbrauch um bis zu 24 % gesteigert werden kann. Dies wird durch die Zwischenspeicherung der von der PV generierten Solarenergie in lokalen, kleinen Pufferspeicher-Anlagen erreicht. Die Zwischenspeicherung erfolgt dabei bis zur gewünschten Verwendung. Der Energieverbrauch bezieht sich an dieser Stelle nur auf den reinen Haushaltsenergieverbrauch.

Weiterhin untersuchen Strzalka et al. [22] das Potential der großflächigen Integration von PV in Städten. Dazu werden alle Dächer von Wohngebieten nach ihrer Eignung für PV-Dachinstallationen bewertet. Ausgehend davon wird anhand parametrischer Haushaltsverbräuche der mögliche Eigenverbrauch bemessen. Wie in Abbildung 2.5 zu sehen, hat besonders der Haushaltsenergiebedarf Einfluss auf den zu erreichenden Energieeigenverbrauch. Nur bei sehr großen Gebäuden mit hohem Energieverbrauch kann die gesamte generierte PV-Energie im Eigenverbrauch genutzt werden.

Somit wird ein Verbraucher, der die Energiespitzen der PV nutzen kann, für einen hohen Eigenverbrauch benötigt. Damit können Energieüberschüsse vermieden werden. Es ist jedoch nicht das Ziel, den Energiebedarf im Gesamten absolut zu erhöhen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, diesen Verbraucher aus den restlichen, bis dahin vom Haushaltsnetz unabhängigen, Emissionsquellen zu wählen. So bleibt der Energiebedarf für alle Belange des Alltags gleich. Im gleichen Zug kann ein anderer Emissionsproduzent in den Energiehaushalt integriert werden. Er kann damit den Ertrag aus der PV optimal ausnutzen und somit CO₂-Emissionen reduzieren. Für dieses Vorhaben eignet sich der Faktor Mobilität, der als großer Emissionsproduzent identifiziert ist. Durch die Elektromobilität wird die Schnittstelle zwischen Stromverbrauch und Transport beschrieben.

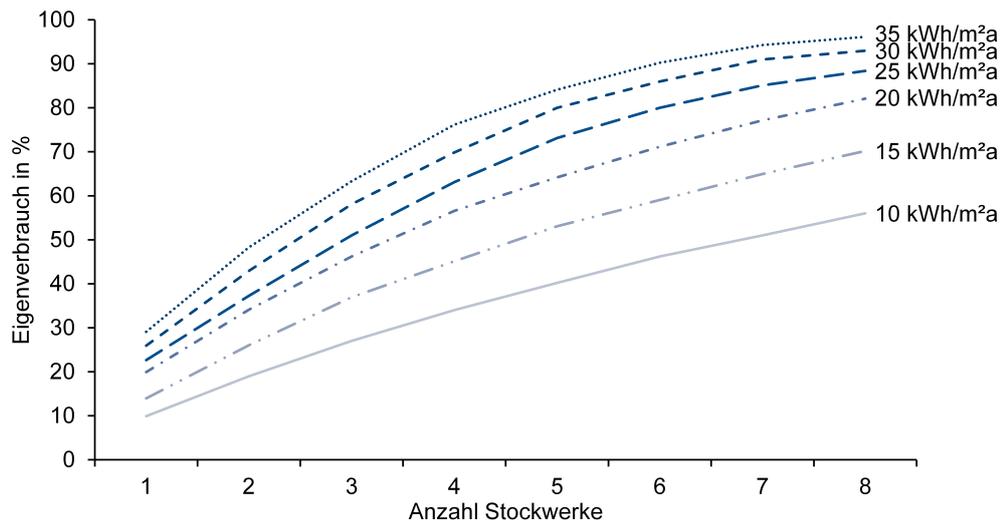


Abbildung 2.5 Zusammenhang von Stockwerken sowie Haushaltsenergieverbrauch auf den Eigenverbrauchsanteil [22]

2.3. Kombination von Elektromobilität und Energiegewinnung

Die Elektromobilität ist eine gute Möglichkeit zur emissionsreduzierten Mobilität [25]. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass im ersten Schritt nur die direkten Emissionen deutlich eingespart werden [7]. Erst durch die Nutzung von emissionsarmer Energie für den Ladevorgang kann tatsächlich eine CO₂-Einsparung erreicht werden. Aus diesem Grund eignen sich BEV in einigen Ländern mehr zur Emissionseinsparung als in anderen Ländern. China hat aufgrund des großen Anteils an Kohlekraftwerken einen Strommix mit einem hohen CO₂-Emissionsfaktor [26].

Genau an dieser Stelle setzt das Konzept der Kombination von Elektromobilität und Energie aus erneuerbaren Quellen an. Ringel [27] beschreibt dies als „Grüne Mobilität“ und zeigt Möglichkeiten und Grenzen dieses Modells auf. Es werden vor allem die positiven Auswirkungen bezüglich der dezentralen Energieerzeugung und -nutzung genannt. Außerdem wird die Nutzung von Elektromobilität mit erneuerbarer Energie als sich gegenseitig verstärkende Maßnahme betrachtet, die schließlich zu einer insgesamt positiveren Ökobilanz führt.

Durch die Nutzung einer eigenen PV steht direkt erneuerbare Energie zur Verfügung. Diese führt in Kombination mit einem BEV zu einer Steigerung des Eigenverbrauchs. Wie Munkhammar et al. [28] zeigen, verbessert sich der Eigenverbrauch durch die Nutzung eines BEV, das die PV-Energie zum Laden verwendet. Allerdings wird nicht das volle Potential ausgeschöpft, weil es wenig zeitliche Übereinstimmung zwischen solarer Energiegewinnung und Ladenachfrage gibt.

Als weiterführende Untersuchungen zeigen Munkhammar et al. [29], dass das Laden von BEV zu Hause vor allem abends stattfindet. Die PV-Energie wird jedoch vor allem tagsüber generiert. Durch diese Eingriffe in die normale Haushalts-Energiebilanz (Abbildung 2.6) ergibt sich ein variabler Faktor zwischen Energieverbrauch und Energiege-

winn. Das BEV erhöht hauptsächlich am Abend den Energieverbrauch. Die PV kann vor allem über die Mittagsstunden den Energieverbrauch teilweise decken und damit den Strombezug aus dem Netz reduzieren.

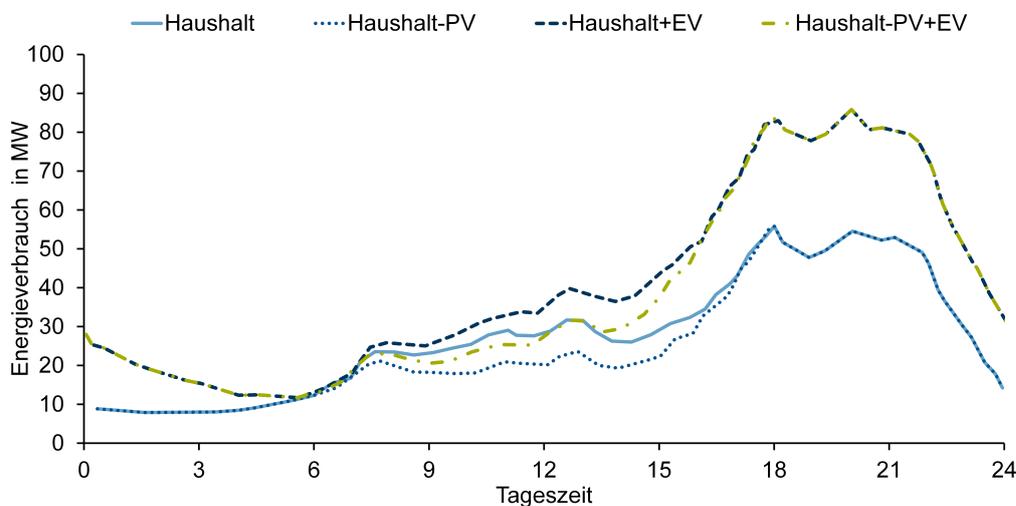


Abbildung 2.6 Energieverläufe von Haushalt in Kombination mit PV und BEV [29]

Diese zeitliche Diskrepanz muss aufgelöst werden, um Energie aus PV und BEV effizient zu kombinieren.

Ein weiterer Aspekt, der sich aus der Verknüpfung von Elektromobilität mit erneuerbaren Energien ergibt, ist die Frage, inwieweit die Nutzer sich auf die damit einhergehenden Einschränkungen und Neuerungen einlassen. Dütschke et al. [30] untersuchen dazu die Akzeptanz bezüglich verschiedener Lademanagement-Optionen. Dazu werden die verschiedenen Ausbaustufen von einer rein manuellen Ladung, über Ladesteuerungen mit unterschiedlichen Strommischen bis zu einer Vehicle-2-Grid (V2G)-Lösung betrachtet. Es wird deutlich, dass die Lade-Option über ein V2G-System die höchste Zustimmung mit 27,6% erhält. Mit 22% die mit Abstand zweithäufigste Wahl ist die Ladung über eine manuelle Steuerung durch individuelle Entscheidung.

2.4. Diskussion des Stands der Wissenschaft und Ableitung der Themenstellung

Durch den immer weiter steigenden CO₂-Ausstoß weltweit wird es notwendig, Lösungen zur Reduktion der Emissionen zu finden. Wie im Stand der Wissenschaft aufgeführt, liegt die Pflicht nicht nur im Industriesektor. Privatanutzer sind in dieser Angelegenheit eine wichtige Gruppe, weil sie zu einem signifikanten Teil zu den weltweiten Emissionen beitragen. Die größten Stellhebel in Bezug auf ihre Emissionen sind für Privatanutzer in den Bereichen Mobilität und Stromverbrauch zu finden.

Das Reduktionsszenario von Druckman und Jackson [19] stellt einen Entwurf vor, bei dem die einzelnen Emissionsquellen auf das Nötigste reduziert werden. So soll der minimale Lebensstandard erfüllt werden. Diese Lösung kann jedoch für die zukünftigen

ge Gesellschaft nicht das Ziel sein, weil dies dem technischen und gesellschaftlichen Fortschritt entgegensteht. Es wird daher eine andere, effizientere Herangehensweise erforderlich.

BEV sind derzeit noch mit hohen Anschaffungskosten verbunden [31]. Durch den begrenzten Aktionsradius ergeben sich Akzeptanzprobleme des Nutzers, der die Rentabilität als nicht ausreichend ansieht.

Witzig [32] untersucht Maßnahmen, wie der Energiebedarf und somit die CO₂-Emissionen im Personenverkehr reduziert werden können. Dazu hat er ein Modell erstellt, das den Einfluss von BEV auf den Emissionsausstoß und Energiebedarf abbildet. Witzig kommt zu dem Schluss, dass nur eine geringe bis keine Reduzierung der CO₂-Emissionen durch die Nutzung von BEV möglich ist. Dies ist allerdings unter der Prämisse zu sehen, dass er nur eine Ladung aus dem Stromnetz betrachtet. Durch eine verstärkte Ladenachfrage wird eine erforderliche Kapazitätserweiterung der bestehenden Kraftwerke prognostiziert, die mehrheitlich über emissionsreiche Braunkohlekraftwerke gedeckt wird. Eine Betrachtung von dezentral generiertem Strom aus privaten PV wird nicht durchgeführt.

Die deutsche Bundesregierung [33] hat als Einsparziel eine CO₂-Reduktion von 40 % bis 2020 und eine fast vollkommene Minderung von 80-95 % bis 2050 (jeweils bezogen auf das CO₂-Niveau von 1990) festgelegt. Daher ist es von Interesse, an welchen Stellen zuerst angesetzt werden soll, um möglichst gute Early Adopter-Ergebnisse erzielen zu können. Als Early Adopter werden Nutzer beschrieben, die frühzeitig und erstmals innovative Produkte verwenden und damit Trends für die Zukunft setzen.

Für das Erreichen dieser CO₂-Ziele ist es notwendig, weitere Anreizmechanismen sowie Effizienzsteigerungen zur Emissionseinsparung zu untersuchen. Trotz Witzigs Ergebnissen ist eine weitere Betrachtung der Einführung von Elektromobilität sinnvoll. Zu diesem Schluss kommt das Forschungsprojekt ARTEMIS [34]. In diesem wird durch eine detaillierte Szenarioanalyse eine deutliche Reduktion der CO₂-Emissionen des individuellen Personenverkehrs prädiziert, selbst wenn der zukünftige Strommix eine größere und damit schlechtere CO₂-Intensität aufweisen sollte. Um diese signifikante Energieeinsparung und die damit verbundenen niedrigeren Kosten für den Privatanutzer zu ermöglichen, kann der Eigenverbrauch von PV-Energie als geeignete und erfolgreiche Methode gesehen werden. Durch das kombinierte Potential kann der Problematik des CO₂-Ausstoßes entgegen gewirkt werden.

Nichtsdestotrotz wird durch die geringe vorhandene zeitliche Überschneidung von PV-Energieeintrag und Ladebedarf eine Möglichkeit benötigt, die Energie bis zum Zeitpunkt des Ladewunsches zwischenspeichern. Dies legt die Nutzung eines Pufferspeichersystems nahe, mit dem die Energie für das BEV bereitgestellt werden kann.

Aufgrund der Akzeptanz- und Rentabilitätsproblematik ist es für die Early Adopter-Strategie wichtig, geeignete Personenkreise als Fokusgruppen anzusprechen. Kleinhüchelkotten et al. [35, S. 89ff.] formulieren dazu:

„Strategien zur Senkung des individuellen Ressourcenverbrauchs und der CO₂-Emissionen sollten

- a) auf Bereiche fokussiert werden, in denen die Energieverbräuche und/oder die Einsparpotenziale groß sind, und
- b) auf Zielgruppen ausgerichtet sein, bei denen es hohe Einsparpotenziale gibt und/oder bei denen Ressourceneinsparungen vergleichsweise leicht zu erreichen sind.

Um den individuellen Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen zu senken, sollte im ersten Schritt bei Bevölkerungsgruppen angesetzt werden, die

- in Bezug auf den Verbrauch und die Emissionen deutlich über dem Bevölkerungsdurchschnitt liegen,
- über die finanziellen Ressourcen verfügen, um auch kostenträchtige Maßnahmen umzusetzen,
- das notwendige Wissen und die Einstellungen haben, die für die Einsicht in die Notwendigkeit eines verringerten Ressourcenverbrauchs und des Klimaschutzes förderlich sind, und
- so informationsorientiert sind, dass auch überwiegend informationsbasierte Anstöße zu einer ressourcensparsameren Lebensweise wirksam sein können.“

Aus diesen Punkten können Szenarien für verschiedene Fokusgruppen abgeleitet werden. Um eine möglichst hohe Energieeffizienz durch eine hohe PV-Wahrscheinlichkeit zu erreichen, sollten Personen in Einfamilienhäusern angesprochen werden. Frondel et al. [36] zeigen in diesem Anwendungsbereich eine stark erhöhte Nutzungswahrscheinlichkeit von PV im Gegensatz zu Mehrfamilienhäusern (Abbildung 2.7). Mit einer größeren

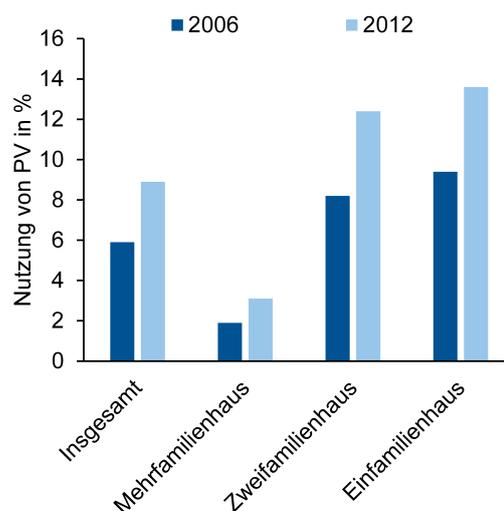


Abbildung 2.7 Verteilung der Nutzungshäufigkeit von PV in verschiedenen Gebäudetypen [36]

Verbreitung von Ein-/Zweifamilienhäusern in ländlichen Gegenden rückt die Gruppe von

Privatnutzern auf dem Land in den Fokus. Durch die meist einfacheren Park- und Abstellmöglichkeiten in Ein-/Zweifamilienhäusern ist weiterhin die Problematik geklärt, wo das BEV geladen werden kann.

Als wichtiger Punkt bei der Betrachtung von Privatnutzern auf dem Land ist die stärkere Abhängigkeit vom Privatfahrzeug zu sehen. Diese ist durch den meist schlechteren Ausbau der öffentlichen Verkehrsinfrastruktur bedingt. Daher wird eine detaillierte Analyse des Mobilitätsverhaltens erforderlich.

Aus der Diskussion des Stands der Wissenschaft leitet sich das wesentliche Ziel dieser Arbeit ab. Dieses stellt die Bewertung der realistisch einsparbaren CO₂-Emissionen abhängig von der Investitionslast sowie der Nutzerakzeptanz dar. Dazu wird das dem Emissionsausstoß zugrundeliegende Mobilitätsverhalten analysiert, bewertet und generisch aufbereitet. So lässt sich eine Aussage bezüglich der erforderlichen Aufwendungen zur Energiegewinnung ableiten. Diese wiederum beeinflussen maßgeblich das CO₂-Reduktionspotential, das sich aus der Kombination von Elektromobilität und erneuerbarer Energie aus PV ergibt.

Daraus lässt sich die folgende, zentrale Forschungsfrage ableiten:

Wie stark kann der Nutzer selbst seine CO₂-Emissionen durch sein Mobilitätsverhalten reduzieren?

Aus der Fragestellung ergeben sich folgende Teilfragen:

- Gibt es optimale, allgemeingültige Parametrierungen für PV, Pufferspeicher, BEV, die z. B. mit der Länge von Pendelstrecken korrelieren?
- Welche Mobilitätsanpassungen werden akzeptiert?

Dazu wird der in Abbildung 2.8 dargestellte Ablauf systematisch bearbeitet. Zuerst wird das Mobilitätsverhalten der relevanten Nutzergruppe „Privatnutzer im ländlichen Raum“ erfasst, ausgewertet und aufbereitet. So soll ein detailliertes Verständnis für die Mobilitätsnachfrage entwickelt werden. Es wird ein generischer Ansatz verwendet, um eine Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit auf weitere Familien zu gewährleisten. Parallel dazu werden PV-Energieeinträge, Haushaltsenergieverlauf sowie das Ladeverhalten erfasst. Diese Informationen werden zusammengefasst, um so die daraus resultierenden Emissionen zu bestimmen. Als wichtige Faktoren für das Emissions-Einsparpotential wird das Mobilitätsverhalten anhand von Nutzerakzeptanzschwellen optimiert und das energetische Gesamtsystem optimal auf die Mobilitätsanforderungen angepasst.

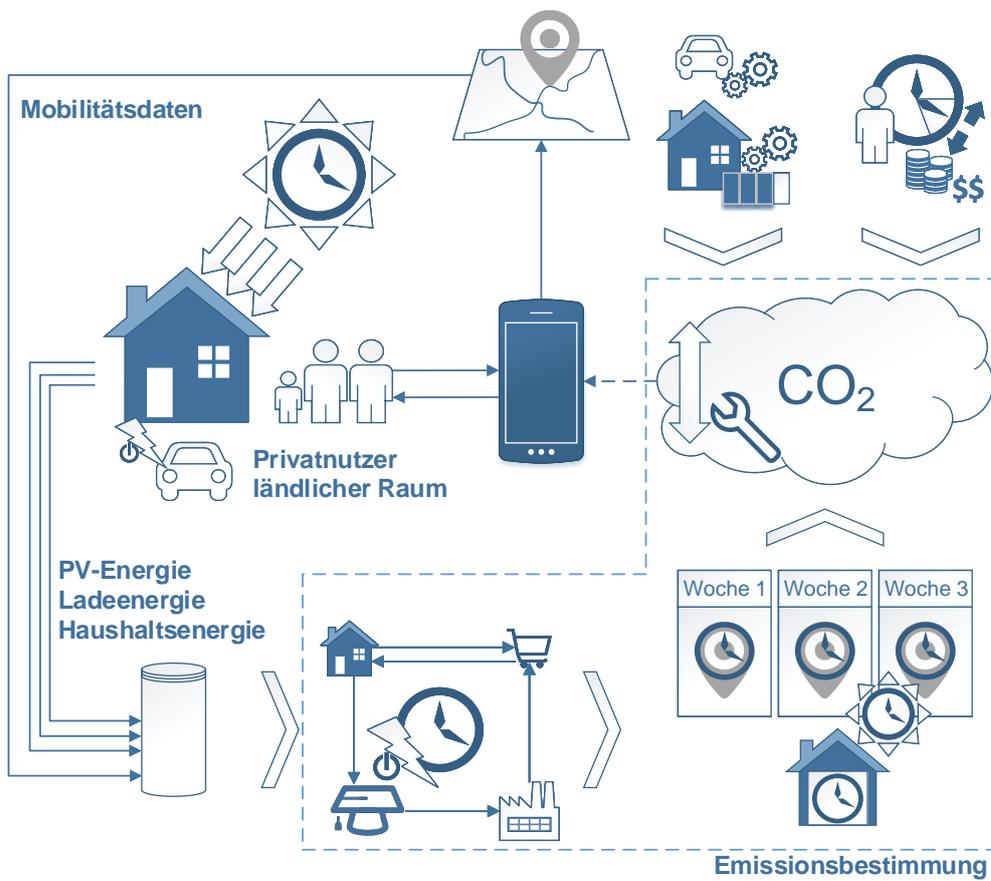


Abbildung 2.8 Graphische Darstellung der im Gesamtsystem relevanten Abläufe und Einflussfaktoren

3. Entwicklung eines repräsentativen Mobilitätsplans

Als erster Schritt zur Ermittlung der emissionsoptimalen Mobilität im ländlichen Raum wird durch eine detaillierte Mobilitätsanalyse einer entsprechenden Nutzergruppe die Basis für die weiteren Untersuchungen gelegt. Dazu wird zuerst der spezifische Stand der Wissenschaft zu Mobilitätsaufzeichnungen sowie -analysen vorgestellt. So kann die danach erläuterte und in dieser Arbeit verwendete Vorgehensweise zur Sammlung und Verarbeitung von Mobilitätsdaten eingeordnet werden. Dieses Kapitel schließt mit der Erarbeitung und Diskussion eines Wochenmobilitätsplans, der zur weiteren Emissionsbewertung herangezogen wird.

3.1. Stand der Wissenschaft zum Mobilitätsverhalten

Die Erforschung des menschlichen Mobilitätsverhaltens wird auf vielfältige Weise betrieben. Außerdem wird für unterschiedlichste Zwecke Verständnis bezüglich des Mobilitäts- und Bewegungsverhaltens aufgebaut.

[37–43] nutzen bspw. Beschleunigungssensoren, die in mobilen Endgeräten verbaut sind, um anhand der erhaltenen Daten eine Bewegungserkennung auf statistischen Auswertungen durchführen zu können. Damit können in einem weiteren Mobilitätssinn Bewegungsmuster klassifiziert werden, um so die Mobilitätsüberwachung von Patienten für Pflegepersonal zu unterstützen.

Durch eine anonyme Sendemastortung von Mobiltelefonen stellen Gonzales et al. [44] fest, dass das menschliche Bewegungsverhalten entgegen vorheriger Annahmen durch eine starke zeitliche und örtliche Regelmäßigkeit gekennzeichnet ist.

Gianotti et al. [45] zeigen, dass durch eine große Zahl an von Fahrzeugen erfassten Global Positioning System (GPS)-Daten das Mobilitätsverhalten detailliert beschrieben werden kann. Dieses kann zur Bestimmung von Mustern oder zur Charakterisierung und Vorhersage der Verkehrslage genutzt werden.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit für die technische Aufzeichnung des Standortverlaufs ist das Fahrtenbuch zur Erfassung des fahrzeuggebundenen Mobilitätsverhaltens. Murakami und Wagner [46] zeigen, dass so nicht nur eine genauere Beschreibung möglich, sondern damit auch weniger Aufwand im Vergleich zu technischen Aufzeichnungssystemen verbunden ist.

Basierend auf Standortdaten analysieren Noulas et al. [47] das menschliche Bewegungsmuster. Sie beschreiben das Mobilitätsverhalten durch die Aneinanderreihung von Zielorten.

Um detaillierte Analysen des Mobilitätsverhaltens durchführen zu können, ist es notwendig die Daten genauer zu interpretieren. Sester et al. [48] bestimmen aus Bewegungsda-

ten signifikante Orte, die häufig angefahren werden, sowie das zur Trajektorie gehörende Verkehrsmittel (VM). So können Fahrprofile zusammengefasst und verglichen werden.

Die grundlegende Untersuchung des menschlichen Bewegungsverhaltens hat Hägerstrand [49] 1970 in seiner Arbeit „What about people in regional science?“ beschrieben und damit den Begriff der Zeitgeographie geprägt. Er beschreibt damit den zeitlichen und örtlichen Aufenthaltspunkt (AP), der für jeden Menschen einmalig ist (Abbildung 3.1). Durch diese Betrachtungsweise kann das Mobilitätsverhalten genauer untersucht werden.

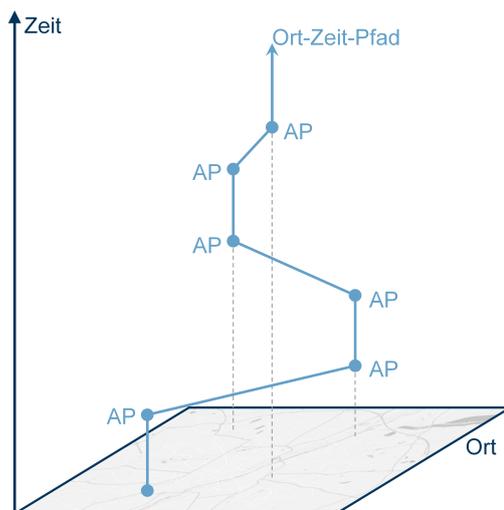


Abbildung 3.1 Darstellung der Raum-Zeit-Geographie nach Hägerstrand [49]

Diesen Ansatz nutzen ebenfalls Shaw et al. [50], um Aussagen über Bewegungsmuster treffen zu können, wenn Aufenthaltspunkte mit Daten aus einem Geoinformationssystem (GIS) kombiniert werden.

Für die Beschreibung des Mobilitätsverhaltens ist daher eine Datenbasis mit Bewegungsdaten notwendig. Diese können nachgehend analysiert werden und stehen dann für die jeweiligen Anwendungen zur Verfügung. Im Folgenden wird auf diese Aspekte näher eingegangen.

3.1.1. Flottenversuche als Mittel zur Datenaufzeichnung

Die Datenaufzeichnung des Bewegungsverhaltens ist die Grundlage für die Mobilitätsforschung. Wie Stopher und Greaves [51] festhalten, ist für das Verständnis des Mobilitätsverhaltens eine detaillierte Abfrage des Bewegungsprofils notwendig. Um eine aussagekräftige und empirische Datenerfassung gewährleisten zu können, wird ein spezifischer Anwendungsfall und die geeignete Nutzergruppe untersucht. Flottenversuche dienen dazu, eine möglichst realistische Nutzung durch die Fokusgruppe nachbilden zu können. Diese können dann für verschiedene Nutzungsanalysen herangezogen werden [52].

Ein Flottenversuch umfasst meist eine definierte, gekapselte Nutzergruppe, die die Daten explizit erfasst und bereitstellt. Asakura und Iryo [53] wählen dazu gezielt Touristinnen aus, die ihren Bewegungsverlauf während eines touristischen Aufenthalts aufzeichnen.

Ein weiterer Vorteil bei der Durchführung von Flottenversuchen ist, dass sie als Referenzversuche zur Validierung von verschiedenen Methoden nutzbar sind, weil die Versuchsteilnehmer zum Abgleich befragt werden können [54].

Für die Erfassung können verschiedene Systeme verwendet werden, die entweder auf GPS-Daten [55] zurückgreifen oder durch andere Lokalisierungsmethoden den Standort bestimmen [56]. Wichtig ist immer, dass der Bewegungsverlauf kontinuierlich und genau erfasst wird sowie einfach verarbeitbar ist.

Byon et al. [57] nutzen dazu GPS-Logger, die in Fahrzeugen verbaut sind. Diese erfassen die Fahrten des Fahrzeugs. Nach der Aufzeichnung der gewünschten Anzahl an Fahrten können die Daten von den Loggern extrahiert und ausgewertet werden.

Als Mittel zur einfachen Datenerfassung bieten sich Mobiltelefone an, die über ein GPS-Modul verfügen [58]. Heutzutage ist es mit der weiten Verbreitung von Smartphones besonders günstig, diese für die Aufzeichnung zu nutzen [59]. Wie Wu et al. [60] zeigen, ist die Nutzung von Smartphones zur Datenaufzeichnung vielversprechend. Mok et al. [61] untersuchen ebenfalls die Nutzbarkeit der Smartphone-Aufzeichnung. Sie stellen fest, dass eine belastbare Datenaufzeichnung gewährleistet werden kann.

Nicht nur die technische Funktionalität ist für den Flottenversuch von Bedeutung, sondern auch weitere Faktoren. Wie Nitsche et al. [62] festhalten, ist dafür vor allem die Repräsentativität der untersuchten Nutzergruppe von Bedeutung. Entscheidend sind dabei die räumliche und zeitliche Verteilung der erfassten Bewegungsprofile, eine gut durchmischte Nutzergruppe, eine intermodale Verkehrsmittelnutzung und ein grundlegendes Verständnis über Fahrtzwecke. Des Weiteren muss für die Durchführung und erfolgreiche Nutzung des Flottenversuchs die Vergleichbarkeit der aufgezeichneten Daten und eine fehlerfreie Erkennung der Fahrten vorliegen. Weil damit Flottenversuche stark von den Versuchsteilnehmern abhängen, ist deren Akzeptanz an der Teilnahme wichtig. Das zieht die Pflicht der Datensicherheit nach sich.

Durch die Datenerfassung bei Flottenversuchen, vor allem mittels Smartphones, ergeben sich vielversprechende Möglichkeiten, unterschiedlichste Anwendungsfälle zu untersuchen. Mit dem großen Einfluss von Lieferverkehr auf die Verkehrsbelastung in Großstädten, ist eine Analyse des Fahrverhaltens notwendig, um so Optimierungspotential aufzudecken. Dazu erfassen Pluvinet et al. [63] die Bewegungsprofile von Lieferfahrern mittels einer Smartphone-Anwendung, um so Erkenntnisse über das Fahraufkommen und daraus resultierende Kennwerte zu gewinnen. Liu et al. [64] sowie Jäger et al. [65] untersuchen Taxiflotten in der Großstadtanwendung. Dies dient für die Verkehrsanalyse [64] oder für Untersuchungen zum Elektrifizierungspotential der Fahrzeugflotte [65].

Als weiterer wichtiger Aspekt der Bewegungserfassung gilt die Unterscheidung der verwendeten VM. Nur diese Erkennung ermöglicht eine nachfolgende Analyse und Interpretation der Fahrdaten.

Die Autoren von [66–69] entwickeln dazu eine VM-Erkennung, die sich nur auf Messwerte stützt, die durch ein Smartphone erfasst werden. [70] bewertet außerdem, dass diese

Art der Erkennung akkurater Ergebnisse liefert, egal welche Person das Smartphone nutzt oder wie es positioniert ist. Viele Ansätze zur VM-Erkennung benötigen zusätzlich hoch aufgelöste Daten und unterscheiden trotzdem nur zwischen stehend, laufend und motorisiert fahrend [44, 69, 71–73].

Zusätzlich zu den Werten aus GPS- und Beschleunigungs-Sensoren nutzen Stenneth et al. [74] noch Informationen aus einem GIS. Damit kann eine um 17% höhere Erkennungsgenauigkeit für die VM Auto, Bus, Zug, Laufen und Fahrrad erreicht werden.

Für das Verständnis der VM-Nutzung ist es notwendig, besonderes Augenmerk auf die Zustände des Stillstands und des Laufens zu legen [75]. Der Wechsel von einem VM zum nächsten wird dadurch beschrieben. Diese Auswirkungen werden in weiteren Arbeiten [76] und [77] detailliert analysiert.

Den Aspekt der Stillstände zwischen Fahrten mit verschiedenen VM und den charakteristischen VM-Fahrprofilen untersuchen Zhang et al. [78] (Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3).

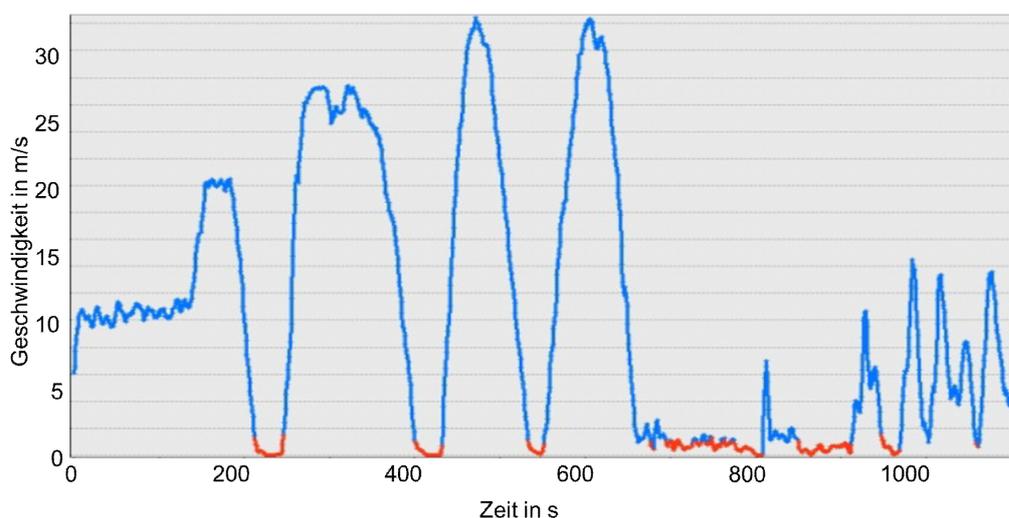


Abbildung 3.2 Darstellung des Einflusses von Stillstandszeiten auf den Wechsel zwischen VM [78]

Sie unterteilen dazu das Bewegungsprofil in Teile zwischen Haltepunkten und klassifizieren diese Abschnitte anschließend nach Fußgänger, Fahrrad und motorisiertem Fahrzeug. Im weiteren Verlauf werden die motorisierten Fahrzeuge weiter detailliert.

Jedoch wird das Mobilitätsverhalten nicht nur durch das verwendete VM beschrieben. Ein wichtiger Aspekt ist der Fahrtzweck, also der Grund, warum eine bestimmte Fahrt durchgeführt wird.

Zur Bestimmung dessen ist es notwendig, die GPS-Daten mit GIS-Werten anzureichern. So kann ein räumlicher Abgleich durchgeführt werden. Wie Wolf et al. [79] feststellen, ist eine erfolgreiche Fahrtzweck-Erkennung möglich, wenn die Ankunftszeit, die Aufenthaltsdauer und die Fahrtziel-Koordinaten mit passenden GIS-Standortinformationen bekannt sind.

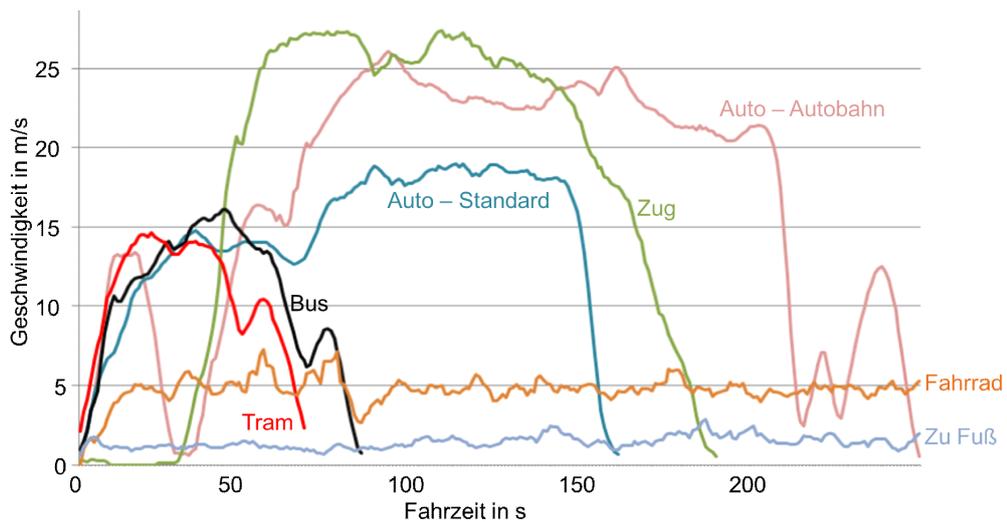


Abbildung 3.3 Darstellung typischer Geschwindigkeitsverläufe für verschiedene VM [78]

Eine weitere Möglichkeit, den Fahrtzweck bzw. die Fahrt zu einem wichtigen Ort zu klassifizieren, stellen Zheng et al. [80] vor. Sie filtern nach interessanten Positionen, indem sie häufige Zielpunkte der Bewegungsdaten clustern.

Es wird ein weiterer wichtiger Aspekt zur Fahrtzweck-Analyse herausgestellt. Ein Fahrtzweck kann daher nur definiert werden, wenn das Fahrtende fehlerfrei erkannt wird. Dies ist im Kontext der korrekten Beschreibung des allgemeinen Fahrtaufkommens bzw. der Fahrtcharakteristiken von Bedeutung, wie Du und Aultman-Hall [81] beschreiben.

3.1.2. Analyse und Interpretation – Fahrverhalten, Energie und Emission

Nach der Erfassung und ersten Verarbeitung von Mobilitätsdaten ist die Durchführung von detaillierten Analysen zur Erkenntnisgewinnung möglich.

Als wichtiger Faktor zählt die Forschung zur Beschreibung und Quantifizierung des Bewegungsablaufs. Weil sich der Bewegungsablauf immer aus einzelnen Aktivitäten zusammensetzt, ist die Untersuchung hierzu wichtig. Ellegård [82] beschreibt dazu die menschliche Aktivität in einem generalistischen Ansatz. Sie stellt den Unterschied in der Aktivitätsbetrachtung heraus, wie er in Abbildung 3.4 gezeigt ist. Es wird zwischen dem gesamtheitlichen Zeitaufwand für eine bestimmte Aktivität und dem tatsächlichen, aufeinander folgenden realen Ablauf unterschieden. Vor allem durch die sequentielle Beschreibung ist eine Verknüpfung von Aktivität, Zeit und Raum möglich.

Eine gute Beschreibungs- und Vergleichsgröße für Fahrprofile sind Fahrzyklen. Sie beschreiben den Geschwindigkeitsablauf über die Zeit. Sie repräsentieren so bestimmte Fahrmuster, die für weitere Berechnungen herangezogen werden können. Ein Problem dieser Fahrzyklen ist die geringe Ähnlichkeit zu tatsächlich gefahrenen Fahrprofilen. Wang et al. [83] entwickeln daher für elf chinesische Großstädte repräsentative Zyklen aus tatsächlich gefahrenen Fahrten. Sie nutzen dazu Parameter, die sich aus dem Geschwindigkeitsprofil des Verkehrsflusses ergeben. Sie zeigen, dass sich die abgeleiteten makroskopischen Zyklenverläufe nicht nur innerhalb der untersuchten Städte teils stark

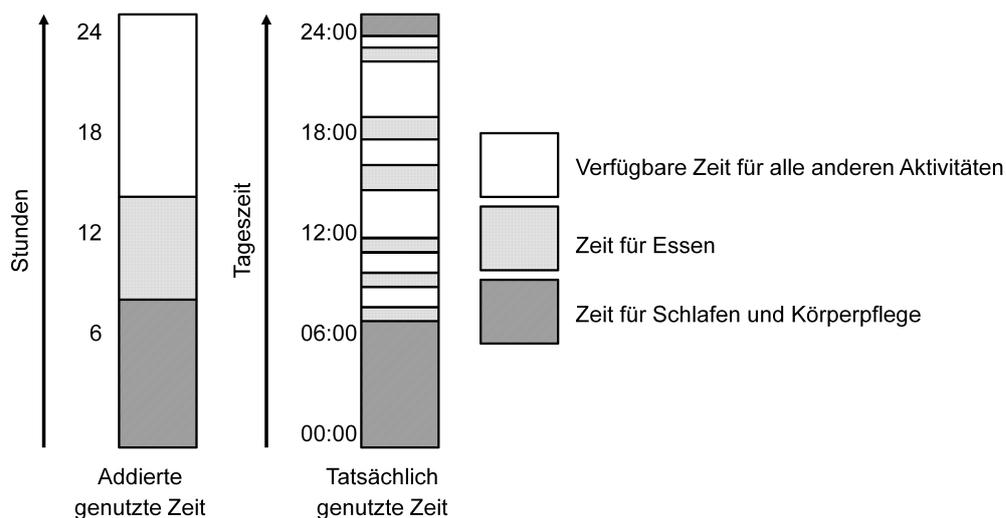


Abbildung 3.4 Darstellung der unterschiedlichen Typen zur Aktivitätsuntersuchung [82]

unterscheiden, sondern dass eine tatsächliche Vergleichbarkeit vor allem für nicht-asiatische Städte nicht gegeben ist. Als weitere Möglichkeiten, vergleichbare Fahrzyklen zu generieren, können Ansätze mit Fuzzy-Logik [84] oder statistische Auswertungen von tatsächlichen Fahrten [85] genutzt werden.

Detaillierte Betrachtungen des tatsächlichen Fahrverhaltens liefert Ericsson [86]. Sie extrahiert dazu die folgenden gruppierten Einflussgrößen auf das Fahrverhalten:

Fahrzeug: Fahrzeugtyp, Alter, Leistung/Gewicht, Größe, Motor

Fahrer: Geschlecht, Alter, körperliche Verfassung, Erfahrung, Einstellung

Fahrt: Fahrtzweck, Länge, Dauer, Routenwahl

Verkehr: Fluss, Geschwindigkeit, Zusammensetzung, Richtung

Straßenumgebung: Art, Ausführung, Verkehrsregelung

Wetter: Temperatur, Sicht, Feuchtigkeit, Niederschlag, Zustand Straßenbelag

Aus realen Fahrprofilen werden anschließend 26 Faktoren extrahiert, die konstante und schwankende Kennwerte beschreiben, sowie Verteilungen berücksichtigen. Die Ausprägungen dieser Faktoren können dann den einzelnen Einflussgrößen zugeordnet werden. So kann das Fahrverhalten quantifiziert und verglichen werden.

Bei der gesamtheitlichen Betrachtung des Fahrverhaltens von einzelnen Personen ist eine gute Vergleichbarkeit für einzelne Aktivitäten möglich [87]. Es können für einzelne Personen Muster in den Alltagsbewegungen gefunden werden. Um diese Muster sichtbar und für den Menschen verständlich zu machen, eignen sich visuelle Methoden, wie sie von Andrienko et al. [88] vorgestellt werden. Als wichtig benennen die Autoren den Zusammenhang von Fahrtanfang und -ende und dass diese Punkte durch unterschiedliche Wege verbunden werden können. Als weitere visuelle Vergleichsmethode neben dem räumlichen Abgleich, ist das zweite Kriterium für Mobilität, die Zeit, nutzbar [89].

Durch die damit einhergehende Vergleichbarkeit der Tagesabläufe können kombinierte Untersuchungen durchgeführt werden. Biagioni und Krumm [90] kombinieren die Aktivitätensequenzen mit Fahrtinformationen. Damit können Tagesroutinen erkannt werden.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Farrahi und Garica-Perez [56], die die alltäglichen Aufenthaltspunkte von 97 Studenten über ein Jahr bezüglich ihrer Tagesabläufe untersuchen. Dadurch ist wiederum eine Aussage über Routinen möglich.

Ein weiterer stark mit der Analyse von Fahrprofilen verbundener Aspekt ist die Untersuchung bezüglich des damit verbundenen Energiebedarfs und der ausgestoßenen Emissionen. Weil dies vor allem für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor ein wesentlicher Faktor ist, fokussieren sich viele Forschungsarbeiten auf die genaue Quantifizierung der verursachten Emissionen und die korrelierenden Faktoren [63, 91–101]. Um die Emissionen unabhängig von tatsächlichen Fahrprofilen bestimmen zu können, werden verschiedene Schätzmodelle entwickelt [102–106].

Wie [107] und [108] zeigen, ist der Emissionsausstoß nicht nur abhängig vom Fahrprofil, sondern zu einem nicht unwesentlichen Teil vom verwendeten Fahrzeugtyp und der Art des Treibstoffs. Außerdem wird der generelle CO₂-Ausstoß großenteils durch die Faktoren der allgemeinen Fahrleistung, der täglichen Fahrregelmäßigkeit und der Wahrscheinlichkeit von Langstreckenfahrten beeinflusst [109]. Diese Aspekte werden in Emissionsuntersuchungen und -prädiktionen jedoch meistens nicht berücksichtigt.

Gesamtheitliche Untersuchungen von realen Mobilitätsdaten und Bewertungen zum Elektrifizierungspotential zeigen, dass mehr als 80 % privater Mobilität mit BEV realisiert werden können [110, 111].

Zusammengefasst ist die Nutzung von realen und detaillierten Bewegungsdaten eine effektive und effiziente Methode, Wissen über und Verständnis für das Mobilitätsverhalten aufzubauen. Sie dient als belastbare Grundlage für weitergehende Analysen [8].

3.1.3. Prädiktion des Mobilitätsverhaltens

Eine häufig angewandte Weiterentwicklung der Mobilitätsdaten-Analyse ist die Ableitung von prädiktiven Modellen. Diese umfassen das Spektrum von der Prädiktion des eigentlichen Fahrprofils [112], über die Bestimmung der Reisezeit abhängig von der Geschwindigkeit [113] bis hin zur Vorhersage des Mobilitätsbedarfs [114]. Gleichzeitig können die Untersuchungen auf mikroskopischer individueller Ebene [115] liegen oder makroskopisch den Verkehr [116] oder die Gesellschaftsbewegung [117–119] beschreiben.

Song et al. [120] untersuchen dazu die grundlegende Machbarkeit der Aufenthaltsvorhersage anhand von anonymisierten Mobilfunkdaten. Sie stellen fest, dass es ein Potential von 93 % für die Vorhersage des nächsten Standortes gibt. Selbst der zukünftige Aufenthaltsort von stark in ihrem Bewegungsverhalten variierenden Personen kann noch mit einer Genauigkeit von über 80 % vorhergesagt werden. Ashbrook und Starner [121] nutzen dazu die Stellung von wiederholt angefahrenen Zielpunkten, um so eine sequentielle Bewegungsprädiktion aufzubauen. Diese ist auf den Übergangswahrscheinlichkeiten aufbaut.

Eine weitere Anwendung für Prädiktionsmodelle für das Mobilitätsverhalten wird von Bowman und Ben-Akiva [122] vorgeschlagen. In ihrer Arbeit nutzen sie eine Aktivitäten-Prädiktion, um so eine Vorhersage über den Stadtverkehr treffen zu können.

Ebenfalls als Werkzeug zur Vorhersage des Verkehrs, nutzen Castro et al. [123] die GPS-Informationen aus einer chinesischen Taxiflotte, die über einen Monat gewonnen wurden. Damit präzisieren sie die Verkehrsdichte und die damit verbundenen Emissionen.

Bei der Nutzung von hoch aufgelösten Mobilitätsdaten zeigen Chon et al. [124], dass eine Bewegungsprädiktion vor allem dann gute Ergebnisse liefert, wenn eine hohe raumzeitliche Regularität vorliegt. Weiterhin verbessern sich die Ergebnisse, wenn Informationen über die tatsächlichen Orte vorliegen.

Das Lernen und Vorhersagen von spezifischen Orten ist ein wesentlicher Schritt in der Mobilitätsprädiktion. Wann eine Person zu Hause ist oder nicht [125], ist eine wichtige Prädiktion. Die Vorhersage, welches genaue Ziel eine Person als nächstes erreichen wird [126–129] ist ebenfalls ein zentraler Aspekt der Mobilitätsprädiktion.

Die zusätzliche Prognose von nicht nur dem nächsten Ziel, sondern dem tatsächlichen Bewegungsablauf des Tages, der Woche oder sogar eines noch späteren Zeitabschnitts ist ein weiterer Teil der Forschung. Dadurch sind einige weitere Fragestellungen verbunden.

Wie Recker [130] beschreibt, hängt die Bewegungsforschung nicht nur von den prädizierten Zielen ab, sondern kann durch eine große Varianz in der Wegwahl (Abbildung 3.5) beeinflusst werden. Dabei spielt eine Rolle, dass verschiedene Zielpunkte durch unterschiedliche Wegeketten erreicht werden können.

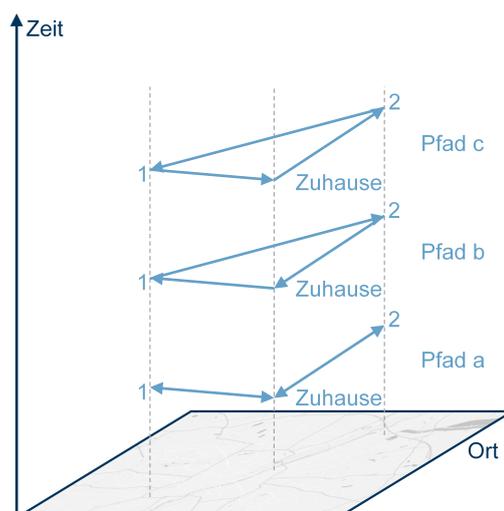


Abbildung 3.5 Einfluss der Wegwahl auf die Mobilitätsprädiktion [130]

Ein weiterer kritischer Punkt für den Mobilitätsablauf ist die zeitliche Einordnung. Scellato et al. [131] entwickeln dazu ein Framework, das für einzelne Nutzer relevante Positionen

in einen zeitlichen Zusammenhang stellt. Dazu werden Ankunfts- sowie Aufenthaltsdauer an den wichtigsten nächsten Orten präzisiert.

Durch diese Untersuchungen können Strukturen und Eigenverhalten im Mobilitätsablauf erkannt und genutzt werden [132]. Eagle und Pentland [133] können durch eine Eigenverhalten-Analyse der ersten Tageshälfte den zweiten Tagesabschnitt mit einer Genauigkeit von 70 % vorhersagen.

Dieses Wissen kann dann für weitere Detailprädiktionen herangezogen werden. Naghshtabrizi et al. [134] nutzen es dazu, die Strecke vorherzusagen, die bis zum nächsten Tank- oder – für den Fall eines BEV – Ladezeitpunkt zurückgelegt wird.

Nichtsdestotrotz bleiben bei der Nutzung von GPS-Informationen zur Beschreibung und Prädiktion des Mobilitätsverhaltens Schwächen in der Genauigkeit der Aussagekraft. Sie werden durch die Stichprobengröße oder die verwendete Methode hervorgerufen [135]. Diese Problematik kann mit einer geeigneten Abstimmung zwischen genutzten Daten und gewünschter Komplexität des Beschreibungsmodells gelöst werden.

3.2. Vorgehen zur Datensammlung und -aufbereitung

Die Datenbasis für den zu entwickelnden Mobilitätsplan wird im Rahmen des Förderprojekts „sun2car@GAP – Untersuchung des Kundenannahmeverhaltens zur Integration von Erneuerbarer Energie in Elektrofahrzeuge innerhalb der e-GAP Modellkommune Garmisch-Partenkirchen“ gewonnen. Die detaillierten Projektergebnisse können dem Abschlussbericht [136] entnommen werden.

Im Rahmen des Projekts sind 22 Familien (52 Personen) über einen Zeitraum von zwölf Monaten Teilnehmer in einem Flottenversuch. Die durch die Projektziele vorgegebene Randbedingung ist, dass jeder Haushalt über eine PV verfügen muss, um CO₂-freie Energie erzeugen zu können. Der Flottenversuch wird im Raum Garmisch-Partenkirchen durchgeführt, der eine ländliche Region darstellt. Trotzdem gibt es eine gute soziale Infrastruktur mit Schulen, Arbeits- und Einkaufsmöglichkeiten. Dadurch kann der tägliche Bedarf zufriedenstellend gedeckt werden. Um allgemeingültige Aussagen ableiten zu können, wird bei der Probanden-Auswahl darauf geachtet, dass alle Altersklassen vertreten sind. Ebenfalls ist es sinnvoll, möglichst viele Haushaltszusammensetzungen abzubilden. Diese reichen von Single-Haushalten, über Alleinerziehende bis zu Familien mit unterschiedlicher Kinderzahl und -altersstruktur. Außerdem sind Haushalte mit verschiedenen Arbeitsverhältnissen (Vollzeit Arbeitsstelle (VZ), Teilzeit Arbeitsstelle (TZ), nicht berufstätig) vertreten. Abbildung 3.6 zeigt die Altersverteilung, Abbildung 3.7 die Familienzusammensetzungen und Abbildung 3.8 die verschiedenen Konstellationen von Arbeitsverhältnissen im Flottenversuch.

Während des Flottenversuchs wird in allen Haushalten der Energieverbrauch (Haushalt und Ladeenergie) und die Energieerzeugung durch die PV erfasst. Des Weiteren wird das Mobilitätsverhalten von allen Teilnehmern aufgezeichnet, wie bereits in [137] dargestellt. Die Datengewinnung im Flottenversuch wird im Folgenden kurz beschrieben.

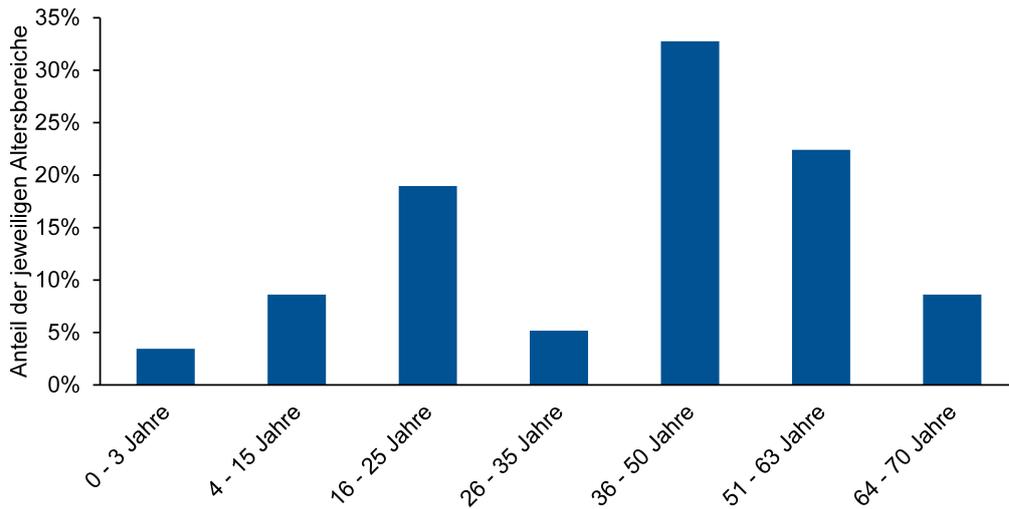


Abbildung 3.6 Altersverteilung aller Teilnehmer im Flottenversuch; Zeitpunkt September 2013

	2 Erwachsene, 1 Jugendlicher 20%	2 Erwachsene, 2 Jugendliche 15%	
		2 Erwachsene, 2 Kinder 5%	1 Erwachsener, 1 Kind 5%
2 Erwachsene 35%	2 Erwachsene, 1 Kind 10%	2 Erwachsene, 1 Jugendlicher, 1 Kind 5%	1 Erwachsener 5%

Abbildung 3.7 Übersicht der Anteile der verschiedenen Familienkonstellationen im Flottenversuch (Kind jünger als 15 Jahre, Jugendlicher zwischen 15 und 25 Jahren); Zeitpunkt September 2013

3.2.1. SmartMeter-Daten

Mobilität kann im weiteren Sinne als Energieverbrauch definiert werden. Vor allem bei der Nutzung von BEV wird dies klar, weil die Fahrzeuge über das Energienetz geladen werden. Um also Mobilität und Energie gemeinsam betrachten zu können, ist eine Haushaltsbilanz notwendig, die über von Smart Metern bereitgestellte Informationen aufgestellt werden kann. Zu diesem Zweck werden alle teilnehmenden Familien für den

Vollzeit (VZ) 18%	VZ, Ausbildung 9%	2x nicht berufstätig 5%	TZ, Ausbildung, nicht berufstätig 5%
	VZ, 2x Ausbildung, nicht berufstätig 5%		
VZ, Teilzeit (TZ) 18%		2x VZ 5%	2x VZ, Ausbildung 5%
	VZ, Ausbildung, nicht berufstätig 5%	2x VZ, Ausbildung, nicht berufstätig 5%	2x VZ, TZ, Ausbildung 5%
	VZ, TZ, nicht berufstätig 5%	2x VZ, nicht berufstätig 5%	2x VZ, 2x TZ 5%

Abbildung 3.8 Übersicht der Anteile der verschiedenen Beschäftigungskonstellationen im Flottenversuch; Zeitpunkt September 2013

Zeitraum des Flottenversuchs mit verschiedenen SmartMetern ausgestattet, die folgende Daten aufzeichnen:

Haushaltsenergieverbrauch: Diese Daten zeichnen den gesamten zeitlichen Energieverbrauch des Haushalts auf. Es ist keine Unterscheidung verschiedener Verbraucher möglich, sondern der gesamte Verbrauch wird betrachtet. Die Daten werden viertelstündlich erfasst.

PV-Energieerzeugung: Diese Daten zeigen die zeitliche Erzeugung erneuerbarer Energie durch die verbaute PV, abhängig vom Wetter sowie der Jahreszeit. Die Daten werden viertelstündlich erfasst.

Ladeenergieverbrauch: Durch die Nutzung von BEV wird es notwendig, diese zu laden. Der zeitliche Ladeenergieverbrauch wird festgehalten. In den teilnehmenden Haushalten wird eine Ladestation mit einer für den Flottenversuch beschränkten Ladeleistung von 7,4 kW verbaut. Die Daten werden alle zehn Sekunden erfasst.

3.2.2. Smartphone-Aufzeichnung

Für die Aufzeichnung der Bewegungsdaten wird eine eigens entwickelte Smartphone Applikation verwendet. Diese wird über Smartphones allen Teilnehmern zur Verfügung gestellt. Nach einem nutzerindividuellen Login sind alle Funktionen der App wählbar. Für die einfachere Handhabung wird eine übersichtliche Kachelstruktur gewählt (Abbildung 3.9).

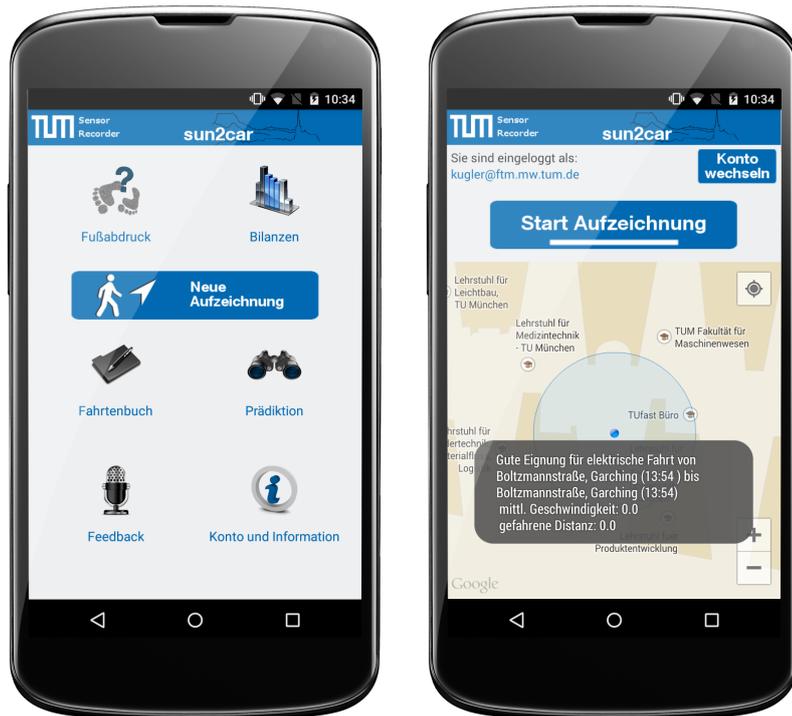


Abbildung 3.9 Ansicht des Hauptbildschirms der im Flottenversuch zur Mobilitätsdatenaufzeichnung verwendeten Smartphone-Applikation (links) sowie der Ansicht zum Starten und Beenden der Aufzeichnung mit Elektromobilitätseinschätzung nach Beenden der Fahrt (rechts)

Im Gegensatz zu einer direkten Aufzeichnung über beispielsweise On-Board-Diagnose (OBD)-Logger im Fahrzeug wird die Aufzeichnung per Smartphone gewählt, um den Teilnehmern eine direkte Sensibilisierung für ihren Mobilitätsbedarf zu vermitteln. Außerdem ist es nur über portable Geräte wie Smartphones möglich, das gesamte Mobilitätsbild zu erfassen, weil das Smartphone einfach überall mit hingenommen werden kann. Über die Schaltfläche „Neue Aufzeichnung“ werden die Aufzeichnungen aller Fahrten proaktiv durch den Nutzer gestartet und bei Ende der Fahrt wieder beendet. Beim Start der Aufzeichnung werden folgende Informationen abgefragt:

- Fahrtzweck (Beruf/Ausbildung, Einkauf, Freizeit, Familie, Urlaub, Spaß am Fahren)
- Planung der Fahrt (spontan, geplant)
- Antriebsart (elektrisch, konventionell)

Diese Informationen können für statistische, allgemeine Auswertungen herangezogen werden.

Nach der Eingabe dieser Informationen erreicht der Nutzer die Ansicht zur Aufzeichnung (Abbildung 3.9). Nach Start der Aufzeichnung wird der Verlauf der Fahrt dynamisch über eine Kartenansicht mitverfolgt. Wenn der Nutzer die Fahrt beendet, wird basierend auf der zurückgelegten Distanz rückgemeldet, ob die Fahrt mit einem BEV machbar gewesen wäre. Durch diese Funktion kann der Nutzer bereits sensibilisiert werden, wieviele

seiner alltäglichen Strecken bereits heute mit einem BEV möglich sind. Schon während der Aufzeichnung werden im Hintergrund die aufgezeichneten Fahrdaten zuerst auf dem Smartphone lokal zwischengespeichert und dann an die Server weiter geschickt, wo sie aufbereitet und in der Datenbank gespeichert werden [59].

Die aufgezeichneten und verarbeiteten Daten werden dann über Synchronisierungsprozesse wieder auf das Smartphone zurück übertragen und dem Nutzer in Form eines Fahrtenbuchs verfügbar gemacht. Durch dieses Fahrtenbuch kann sich der Nutzer sein tatsächliches Mobilitätsverhalten in chronologischer Form mit Informationen zu Start (Ort, Zeit), Ende (Ort, Zeit), Distanz sowie verwendetem VM der einzelnen Fahrten anzeigen lassen (Abbildung 3.10). Nach Wahl einer spezifischen Fahrt wird der zugehörige Verlauf auf der Karte sowie der Geschwindigkeitsverlauf angezeigt. (Abbildung 3.10)

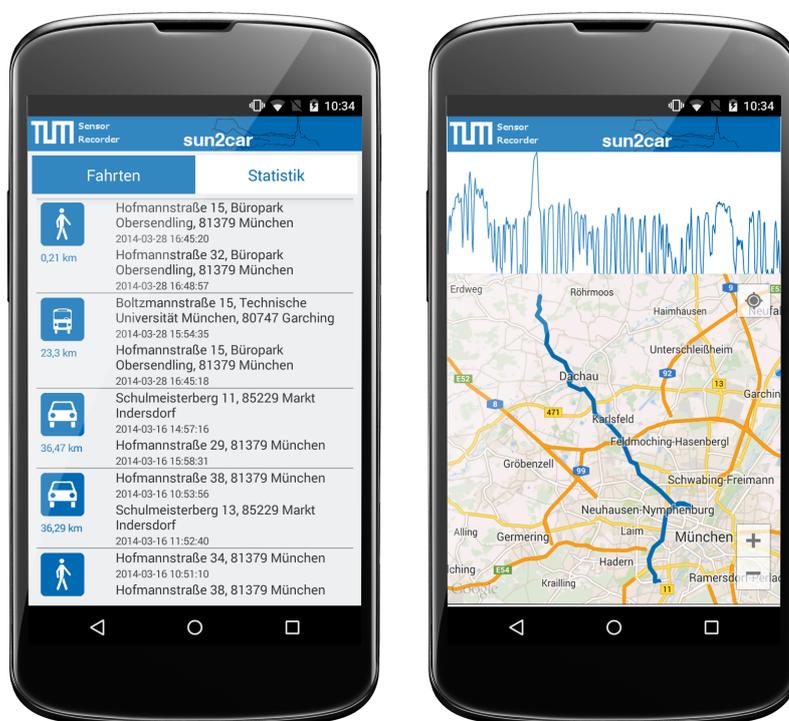


Abbildung 3.10 Ansicht des Fahrtenbuchs in chronologischer Aufzählung (links) und der Fahrtdetails zu einer einzelnen Fahrt (rechts)

Neben diesen direkten Auswertungen des Mobilitätsverhaltens werden dem Nutzer weitere detailliertere Statistiken seiner Mobilität über die Ansicht „Statistik“ gegeben (Abbildung 3.11). Dem Nutzer wird, basierend auf seinen bisher aufgezeichneten Mobilitätsdaten, angezeigt, zu welchen Tageszeiten mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Fahrt starten wird (Abbildung 3.11). Außerdem stehen verschiedene Heatmap-Darstellungen zur Verfügung, welche die Aufenthalts- und Zielwahrscheinlichkeiten nutzerindividuell auf einer Karte darstellen, bzw. anzeigen, in welchen Geschwindigkeitsbereichen gefahren wird (Abbildung 3.11).

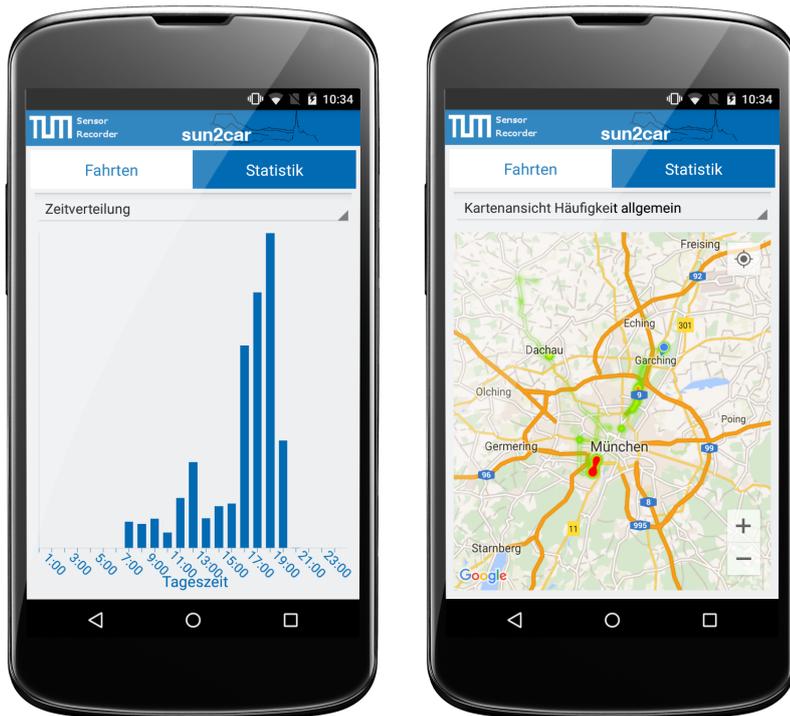


Abbildung 3.11 Ansicht der Statistiken zum Mobilitätsverhalten: Zeitverteilung (links) und Aufenthaltshäufigkeit (rechts)

3.2.3. Verkehrsmittelerkennung

Durch die Nutzung von Smartphones ist es notwendig, die Daten nach VM zu analysieren, weil die Nutzer ihre gesamte Alltagsmobilität, also auch Fahrten, die nicht mit dem Auto zurückgelegt werden, aufzeichnen. Um ein tieferes Verständnis über das Mobilitätsverhalten zu erhalten, wird eine detaillierte Mobilitätsanalyse der vorverarbeiteten Daten durchgeführt, wodurch das verwendete VM bestimmt wird. Der gesamte Klassifizierungsprozess ist schematisch in Abbildung 3.12 dargestellt und wird im Folgenden beschrieben.

Dazu werden sieben unterschiedliche VM festgelegt:

- zu Fuß
- Fahrrad
- Bus
- Auto
- U-Bahn
- Tram
- Zug

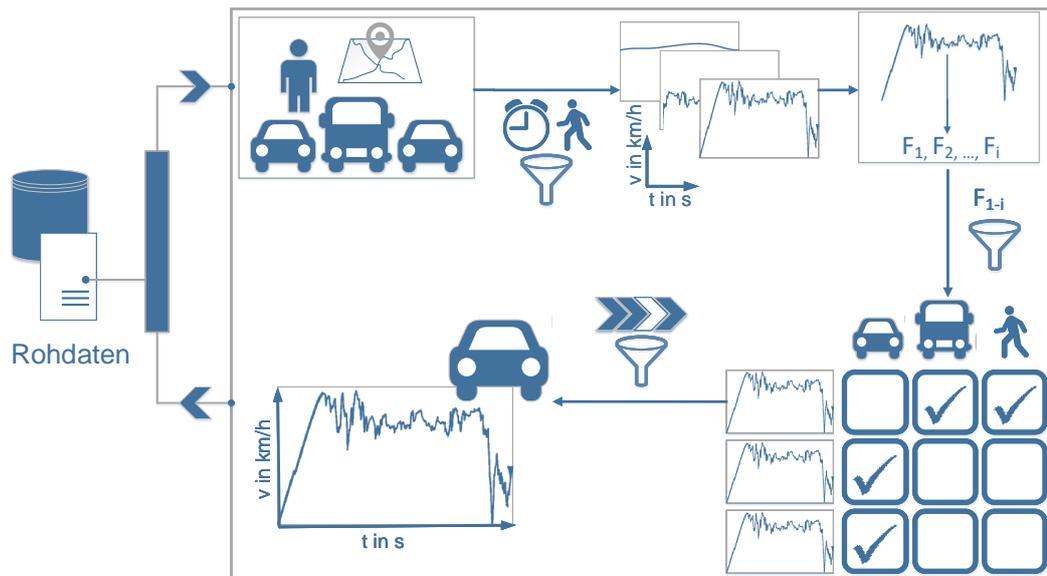


Abbildung 3.12 Ablauf zur automatisierten VM-Erkennung aus Fahrprofil-Rohdaten

Die Analyse zur VM-Erkennung beginnt mit den in der Datenbank abgelegten Rohdaten, die in logische Mobilitäts-Einheiten zerlegt werden. Als Mobilitäts-Einheit ist eine Fahrt definiert, die mit einem VM und für einen Fahrtzweck zurückgelegt wird. Durch diese Betrachtung ist eine Interpretation von Stillständen im Fahrprofil notwendig. Einerseits bedingen Stillstände eine Separierung in einzelne Fahrten, wenn der Stillstand die Dauer eines gewissen Schwellwerts überschreitet oder ein Fußweg den Wechsel von einem VM zum anderen signalisiert.

Andererseits ist ein Stillstand jedoch nur eine kurze Pause in einer Fahrt, beispielsweise an einer Ampel oder bedingt durch einen Signalverlust. Das Fahrprofil darf an dieser Stelle nicht getrennt werden, um Fehlinterpretationen im Mobilitätsverhalten zu vermeiden. Um möglichst korrekte und in sich konsistente Fahrtsegmente zu erhalten, werden Stillstandszeiten im gesamten Fahrprofil bewertet. Nur wenn ein eindeutiges, logisches Fahrtende erkannt wird, erfolgt eine Separierung des Fahrprofils. Im Folgenden kann die Fahrt als Eingangsgröße für die Analyse bezüglich des VM verwendet werden.

Für die Festlegung des VM für eine Fahrt wird die gesamte Mobilitäts-Einheit nochmals in kürzere Teilabschnitte, definiert als Microtrips, zerlegt. Diese Microtrips werden durch Stillstände innerhalb der Fahrt eingeteilt. Die Analyse dieser Microtrips basiert auf verschiedenen, in der Arbeit von Templer [196] beschriebenen, Charakteristiken, wie mittlere und maximale Geschwindigkeit, Geschwindigkeitsverteilung, Beschleunigungsverhalten oder zurückgelegte Distanz. Durch die Bewertung anhand dieser Parameter wird über einen mehrstufigen Ausschlussprozess auf das wahrscheinlichste VM für einen Microtrip geschlossen. Die analysierten Microtrips werden dann wieder chronologisch verkettet und einer Logikprüfung unterzogen, wodurch das VM für die gesamte Fahrt festgelegt werden kann. Anhand dieses Verfahrens wird das Mobilitätsverhalten strukturiert und konkret veranschaulicht, wodurch weitere Untersuchungen ermöglicht werden.

3.3. Mobilitätsanalyse

Während des Flottenversuchs werden Mobilitätsdaten von knapp 120 000 km von den Teilnehmern aufgezeichnet. Diese Daten, zusammen mit den soziodemographischen Informationen der Familien, liefern einen ersten Überblick über das Mobilitätsverhalten im ländlichen Raum. Durch tiefer gehende Analysen ist ein detailliertes Verständnis des alltäglichen Mobilitätsbedarfs und zugrundeliegender Routinen erreichbar.

3.3.1. Bewertung bezüglich multimodaler Mobilität

Die Erfüllung des Mobilitätsbedürfnisses ist nicht nur durch die Bereitstellung von Fahrzeugen möglich. Wenn der Nutzer zusätzlich auf andere, öffentlich zugängliche VM zurückgreifen kann, bietet die multimodale Fortbewegung viele Vorteile, weil hierdurch auf ein eigenes Fahrzeug verzichtet werden kann. Hierzu bedarf es jedoch einer gut ausgebauten Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) Infrastruktur. Im Flottenversuch wird das Potential der Emissionseinsparung durch die Nutzung von ÖPNV bewertet. Durch Umfragen wird das Nutzungsverhalten der Teilnehmer erfasst. Über die Flottenlaufzeit von einem Jahr werden die Teilnehmer befragt, wie der ÖPNV in ihr Mobilitätsverhalten eingebunden ist bzw. werden kann. Als grundsätzliche Frage gilt die Einschätzung der Anbindung alltäglicher Ziele, wie Ausbildungs- oder Arbeitsstätte und Einkaufsmöglichkeiten, durch den ÖPNV. Wie die Ergebnisse in Abbildung 3.13 zeigen, wird die ÖPNV-Anbindung für tägliche Wege mehrheitlich mittelmäßig bis negativ beurteilt. In Kombination mit der Frage nach der tatsächlichen Nutzung des ÖPNV-Angebots (Abbildung 3.14) wird deutlich, dass der ÖPNV im Flottenversuch keine signifikante Rolle für die Erfüllung des Mobilitätsbedarfs spielt.

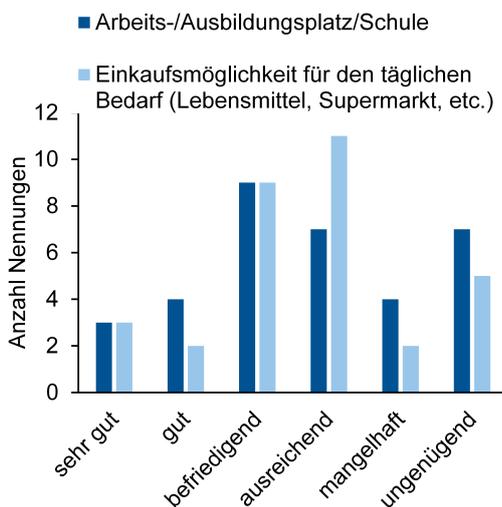


Abbildung 3.13 Umfrageergebnisse zum Mobilitätsverhalten bezüglich der ÖPNV-Anbindung für tägliche Wege: *Wie schätzen Sie die Erreichbarkeit mit dem ÖPNV ein?* (n=34)

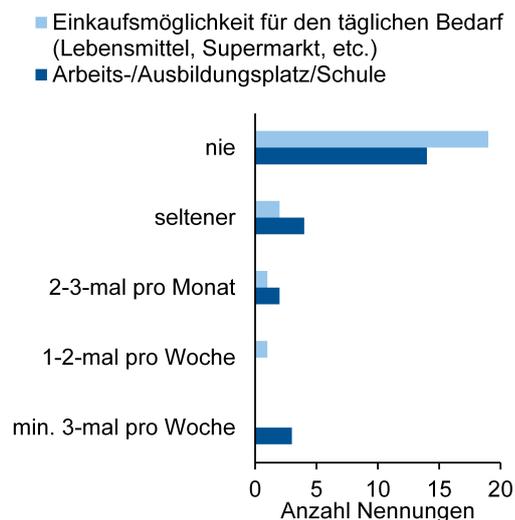


Abbildung 3.14 Umfrageergebnisse zum Mobilitätsverhalten bezüglich der ÖPNV-Nutzung für tägliche Wege: *Wie häufig nutzen Sie den ÖPNV?* (n=23)

Die Untersuchung bezüglich der Reihenfolge der verwendeten VM für die tägliche Pendelstrecke zum Ausbildungs- oder Arbeitsplatz (Abbildung 3.15) stützt die Aussage des

geringen Einflusses des ÖPNVs auf die tägliche Mobilität in ländlichen Regionen, wie im Raum Garmisch-Partenkirchen.

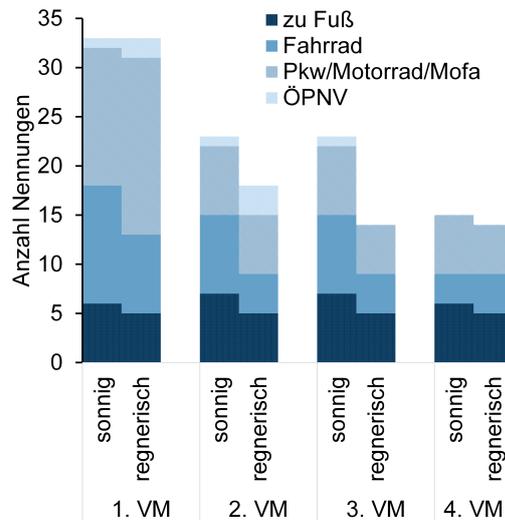


Abbildung 3.15 Umfrageergebnisse zum Mobilitätsverhalten bezüglich verwendeten VM und Wetterverhältnissen: Welche VM nutzen Sie normalerweise auf Ihrem Hinweg zur Arbeit/Ausbildungsplatz/Schule? Bitte geben Sie dabei die übliche, zeitliche Reihenfolge aller VM an, die Sie für diesen Weg benutzen. (n=33)

Es wird die tatsächliche Relevanz der VM abgefragt, die die besondere Wichtigkeit des eigenen Fahrzeugs herausstellt. Zusätzlich wird aufgezeigt, dass durch die gute Infrastruktur vor allem bei gutem Wetter auf nicht-motorisierte VM zurückgegriffen wird. Durch den ÖPNV kann weder Zeit noch Geld eingespart werden. Außerdem liegt eine starke Abhängigkeit von Abfahrtszeiten und -orten vor, wodurch die bei der Mobilität stark gewünschte Flexibilität verloren geht. Hierdurch ist die geringe ÖPNV-Nutzung erklärbar (Abbildung 3.16).

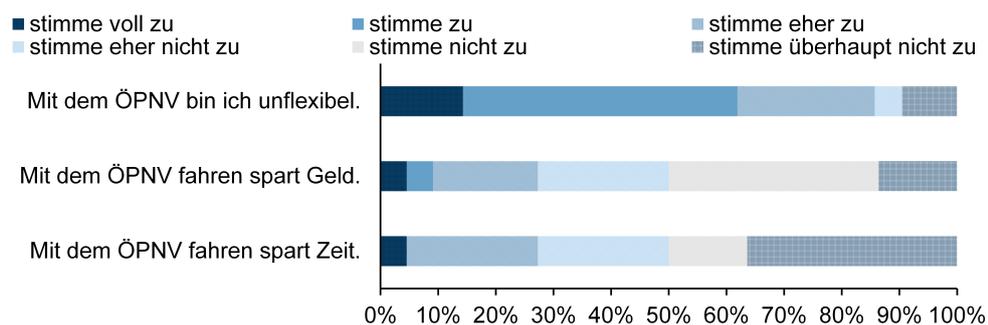


Abbildung 3.16 Umfrageergebnisse zum Mobilitätsverhalten bezüglich der ÖPNV-Bewertung für tägliche Wege: Bitte geben Sie zu folgenden Aussagen Ihre Einschätzung. (n=22)

Ausgehend von der schwach ausgeprägten Akzeptanz des ÖPNVs, sowie der untergeordneten Rolle, die der ÖPNV im täglichen Mobilitätsverhalten der Studienteilnehmer spielt, kann das Ziel der Integration in die multimodale Mobilität als real nicht umsetzbar gewertet werden. Aus diesem Grund wird die Option des ÖPNVs im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

3.3.2. Einsatzfähigkeit von Elektromobilität

Wie vorangehend beschrieben, spielt vor allem das eigene Fahrzeug für die ländliche Mobilität eine große Rolle. Um dennoch den Fokus auf eine Reduktion des Emissionsausstoßes zu legen, ist die Nutzung von BEV naheliegend, weil dadurch zumindest die Erzeugung von direkten Emissionen verhindert werden kann. Vor allem in Ballungsräumen ist die Abnahme von ausgestoßenen Emissionen wünschenswert, weshalb BEV hierfür eine gute Lösung darstellen.

Allerdings ergeben sich durch BEV weitere Randbedingungen. So ist es notwendig, dass das Fahrzeug regelmäßig geladen wird. Dies erfordert einen Parkplatz mit Lademöglichkeit, der sich idealerweise in fußläufiger Distanz zum Wohnsitz befindet [138]. Die generelle Stadtentwicklung mit Miet- und Mehrfamilienhäusern hat jedoch zur Folge, dass nicht jeder Haushalt über einen festen Stellplatz verfügt. Vorhandene Bestands-Stellplätze, die meist in Tiefgaragen liegen, sind häufig ohne Anbindung ans Stromnetz und ohne Abrechnungsmöglichkeit für einzelne Parteien [139]. Hierdurch ist die Ladung eines BEV nicht oder nur schwer möglich. Mittlerweile werden Bestrebungen verfolgt, um den Bau von Ladestationen in Mehrparteienhäusern zu vereinfachen und so zu fördern [140].

Wird das Einsatzfeld für Elektromobilität erweitert und der städtische Raum verlassen, bietet sich mit den Gegebenheiten in Kleinstädten und ländlichen Gebieten großes Potential für die Nutzung von BEV. Je ländlicher die Region, desto größer ist der Anteil an vom Eigentümer bewohnten Wohnungen und freistehenden Einfamilienhäusern [141]. Diese Verteilungen sind in Abbildungen 3.17 und 3.18 dargestellt.

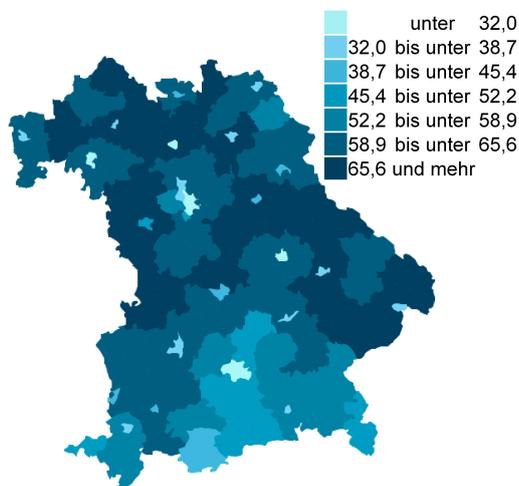


Abbildung 3.17 Graphische Darstellung der Zensus2011 Ergebnisse zum Anteil der Eigentümerquote in Bayern in Prozent [142]

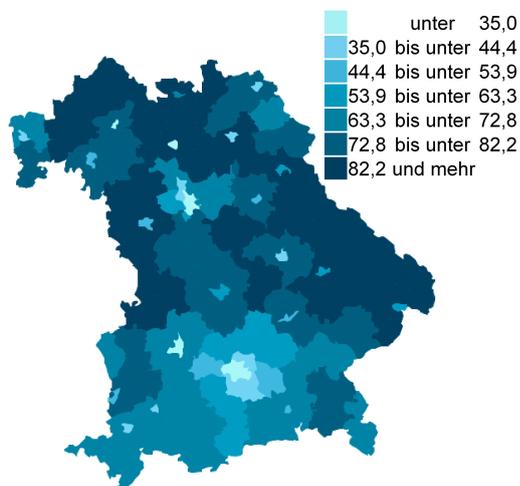


Abbildung 3.18 Graphische Darstellung der Zensus2011 Ergebnisse zum Anteil der freistehenden Wohngebäude in Bayern in Prozent [143]

Weil freistehende Einfamilienhäuser meistens über entsprechende, mit Stromanschluss ausgerüstete Garagen oder Stellplätze verfügen, kann das Problem der fehlenden Park- und Lademöglichkeit behoben werden. Daher ist eine grundlegende Analyse des Mobilitätsbedarfs in ländlichen Regionen bezüglich der Realisierbarkeit mit BEV notwendig. Für dieses Szenario ist vor allem die Randbedingung der beschränkten Reichweite von

BEV zu betrachten und die damit verbundene Notwendigkeit des Nachladens zwischen den einzelnen Fahrten.

Diese Einschränkungen in der Mobilität führen zu der als Reichweitenangst bezeichneten Furcht der Nutzer, mit dem BEV stehen zu bleiben. Weil diese nach Neubauer und Wood [144] vor allem mit der Ladeinfrastruktur zusammenhängt und diese im ländlichen Raum meist dünner angesiedelt ist als in der Stadt, muss sich der Nutzer auf die Lademöglichkeit zu Hause verlassen können. Dies zieht ggf. eine Einschränkung im Mobilitätsradius nach sich. Rauh [145] zeigt außerdem, dass eine stärkere Reichweitenangst vorliegt, wenn der Nutzer keine Erfahrung mit dem Thema Elektromobilität hat. Durch Aufklärung über die reale Einsatzfähigkeit der Elektromobilität kann daher die gefühlte Sicherheit des Nutzers und die Akzeptanz der Elektromobilität gefördert werden.

Kugler [146] bewertet ausführlich die Machbarkeit der Elektromobilität im ländlichen Raum. Die Kernaussagen werden im Folgenden dargestellt. Für die Bewertung der Elektromobilität als Lösung für den ländlichen Raum wird das Mobilitätsverhalten bezüglich der benötigten Reichweite rund um die Heimatstadt, die als Fixpunkt für die alltägliche Fortbewegung dient, analysiert. Dazu wird die radiale Ausdehnung einer Perzentilbetrachtung unterzogen. Um eine Aussage bezüglich des alltäglichen Mobilitätsbedarfs treffen zu können, werden nur Mobilitätsdaten herangezogen, deren Fahrtbeginn bzw. -ende in einem Radius von 50 km rund um den Fixpunkt liegt. Daraus ergibt sich das gefilterte Mobilitätsverhalten. Wie in Abbildung 3.19 zu sehen, befindet sich die 99-Perzentil-Ausdehnung des Mobilitätsbedarfs, die 99 % aller Mobilitätsdaten abdeckt, zu großen Teilen innerhalb eines Radius von 50 km.

Einziger Ausreißer sind Fahrten nach Nordosten in das Großstadtgebiet München, wo es eine gut ausgebaute Ladeinfrastruktur gibt. Zu beachten ist, dass die Fahrten nicht in radialer Richtung vom Fixpunkt aus stattfinden und somit die Mobilitätsausdehnung keine tatsächlichen Fahrten beschreibt. Vielmehr stellen die Daten eine kumulierte Aufenthaltswahrscheinlichkeit in einem bestimmten Radius um den Fixpunkt der eigenen Heimatstadt dar (Abbildung 3.20). Daher ist die Mobilitätsausdehnung nicht mit der tatsächlich gefahrenen Distanz zu vergleichen. Als Einschätzung der Eignung von Elektromobilität dient die Analyse bezüglich der engen Beschränkung innerhalb eines Radius von 50 km, weil dieses Gebiet gut von bereits 2016 auf dem Markt erhältlichen BEV abgedeckt werden kann.

Neben der reinen Mobilitätsausdehnung wird außerdem das Fahrdistanz-Verhalten untersucht, um die tatsächlich zurückgelegte und geforderte Reichweite bewerten zu können. Dazu werden die gefilterten Mobilitätsdaten bezüglich des Zwischenladepotentials beurteilt. Wenn zwischen zwei Fahrten weniger als eine Stunde Pause liegt, die zum Nachladen verwendet werden könnte, wird der Reichweitenbedarf für diese Fahrten addiert. Durch dieses Vorgehen ergibt sich eine Verschiebung des kumulierten Distanzbedarfs hin zu höheren geforderten Reichweiten (Abbildung 3.21a). Mit unter 200 km liegen diese nach wie vor innerhalb der technischen Reichweite von aktuellen BEV.

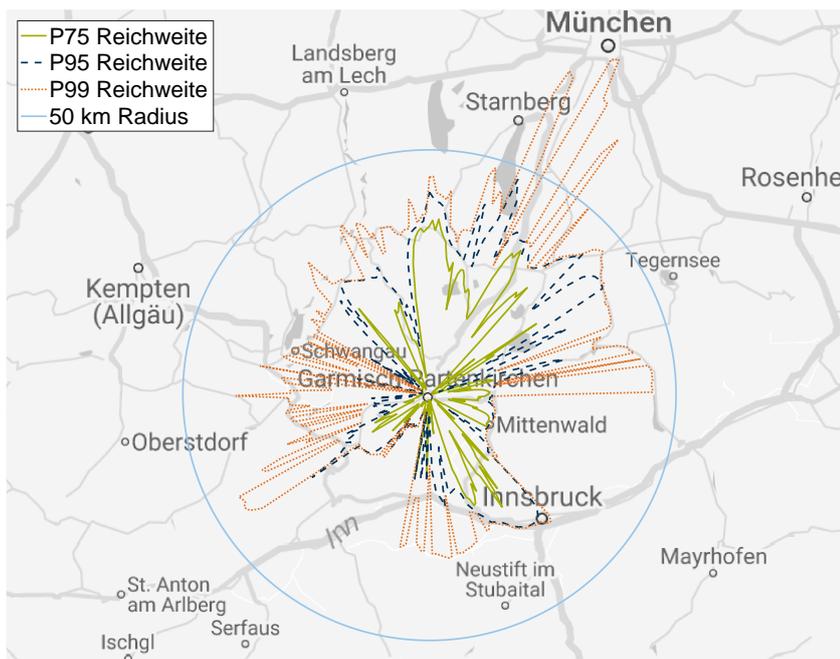


Abbildung 3.19 Mobilitätsverhalten bezüglich der benötigten Reichweite rund um den Fixpunkt der Heimatstadt; es wird jeweils das 75-, 95- sowie 99-Perzentil der Mobilitätsausdehnung betrachtet: Kartographische Darstellung der benötigten Reichweite (Kartendaten: Map data ©2016 GeoBasis-DE/BKG (©2009), Google)

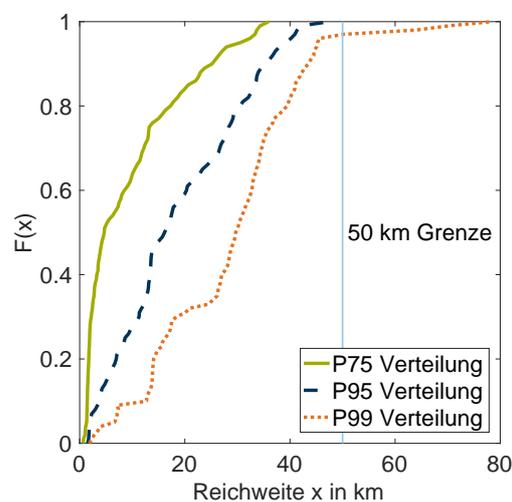


Abbildung 3.20 Mobilitätsverhalten bezüglich der benötigten Reichweite rund um den Fixpunkt der Heimatstadt; es wird jeweils das 75-, 95- sowie 99-Perzentil der Mobilitätsausdehnung betrachtet: Kumulative Häufigkeit der benötigten Reichweite

Abbildung 3.21b zeigt den Zusammenhang zwischen der Anzahl der täglich durchgeführten Fahrten und deren mittlerer Distanz. Es wird ersichtlich, dass die durchschnittliche Distanz pro Fahrt mit der Anzahl an durchgeführten Fahrten an einem Tag sinkt. Häufige Fahrten über den Tag verteilt sind durch kurze Strecken gekennzeichnet. Damit fällt der Ladebedarf dementsprechend geringer. Wenige und damit zeitlich weiter auseinander-

derliegende Fahrten pro Tag weisen zwar höhere mittlere Distanzen auf. Das Fahrzeug kann aber während einer längeren Stillstandszeit nachgeladen werden.

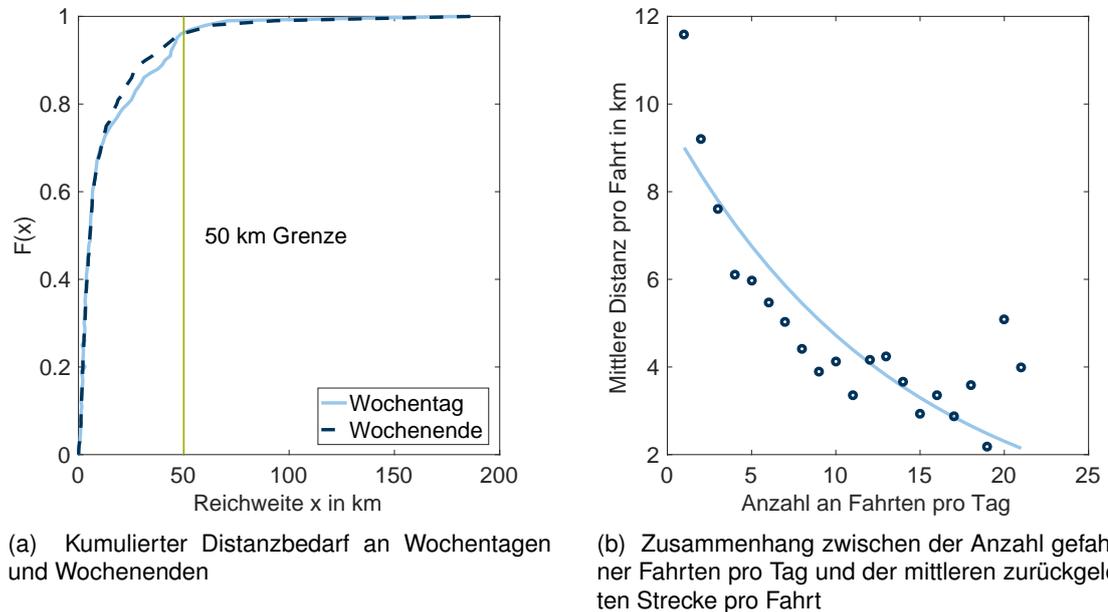


Abbildung 3.21 Mobilitätsverhalten bezüglich der kumulierten benötigten Reichweite

Im direkten Vergleich mit der Mobilitätsanalyse von Fahrzeugen im Taxiverkehr im städtischen Bereich [65] wird außerdem deutlich, dass das Mobilitätsverhalten von Privatanutzern im ländlichen Bereich durch einen deutlich geringeren Mobilitätsradius gekennzeichnet und der Einsatz von BEV als sinnvoll einzuschätzen ist.

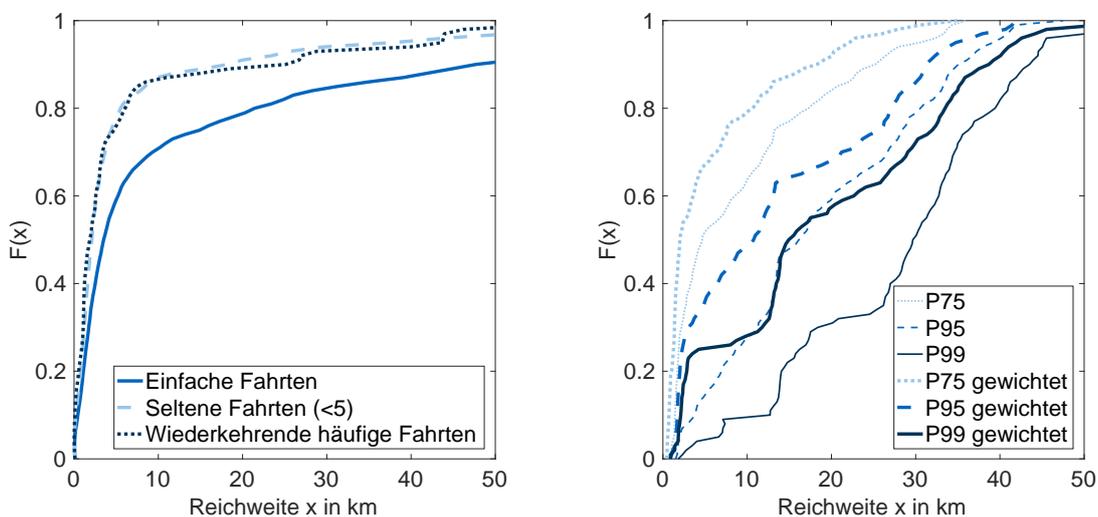
3.3.3. Einfluss von repetitiver Mobilität und Mobilitätsrauschen

Bei der Betrachtung und Bewertung von Alltagsmobilität ist es naheliegend, dass nicht jeder Fahrt die gleiche Relevanz und damit Gewichtung beigemessen wird. Einmalig auftretende Urlaubsfahrten spielen im täglichen Mobilitätsbedarf eine untergeordnete Rolle, wohingegen die Pendelstrecke in die Arbeit als wichtig eingestuft werden muss. Daher soll dieser Einfluss in der Bewertung der Mobilität mit berücksichtigt werden. Dazu wird eine zeitliche Start-Ziel-Analyse durchgeführt, die die tägliche Mobilität in 3-Stunden-Segmente unterteilt und nachfolgend nach gleichen Ausgangs- und Endpunkten zusammenfasst. Es ist nicht relevant, dass zwischen Start- und Zielpunkt die gleiche Strecke abgefahren wird, sondern nur, dass die tatsächlichen Start- und Zielorte eine Fahrt beschreiben.

Anhand der Häufigkeit einzelner Start-Ziel-Kombinationen kann deren Relevanz im täglichen Mobilitätsverhalten bestimmt werden. Es wird zwischen repetitiver Mobilität und dem Mobilitätsrauschen unterschieden. Die repetitive Mobilität beschreibt Fahrten, die häufiger und wiederholt stattfinden. Diese sind durch eine größere zeitliche Stabilität gekennzeichnet. Das Mobilitätsrauschen setzt sich aus Fahrten zusammen, deren Ziele einmalig angefahren werden, und weist kein erkennbares Muster bezüglich Tages-

zeit und Distanzbedarf auf. Diese Gewichtung nach relevanter Alltagsmobilität wird als Grundlage für eine erweiterte Evaluation der Elektromobilität herangezogen.

Wie in Abbildung 3.22a dargestellt, verschiebt der stärkere Fokus auf wiederkehrende Alltagsmobilität die kumulierte Reichweitenverteilung hin zu häufigeren kürzeren Reichweiten. Bei der erneuten Perzentilbetrachtung (Abbildung 3.22b) zeigt sich ein schnellerer Anstieg der kumulierten Reichweite bei der gewichteten Betrachtung. Hier ist vor allem der starke Anstieg des gewichteten 99-Perzentils von Interesse, weil ein signifikanter Mobilitätsbeitrag von Fahrten mit Distanzen von unter 2,5 km aufgezeigt wird. Der direkte Vergleich mit den nicht gewichteten Mobilitätsdaten dokumentiert einen insgesamt niedrigeren, notwendigen Reichweitenbedarf durch die Gewichtung, weil die besonders häufigen Fahrten um die Heimatstadt deutlich zum Tragen kommen.



(a) Vergleich der Reichweitenverteilungen von verschieden häufig vorkommenden Fahrten

(b) Vergleich der kumulativen Häufigkeiten (75-, 95-, 99-Perzentile) der benötigten Reichweite von gefilterter (gestrichelt) sowie gewichteter (durchgezogen) Mobilität

Abbildung 3.22 Auswirkungen von häufigen Fahrten bezüglich der kumulierten benötigten Reichweite

Dieser Einfluss zeigt sich detailliert in Tabelle 3.1. Es sind im direkten Vergleich die Perzentil-Reichweitenbedarfe für die zugrundeliegende, gefilterte Mobilität und die nach Relevanz gewichtete Mobilität aufgelistet. Es wird deutlich, dass nach Median- und Mittelwert-Analyse die gewichtete Ausdehnung teils deutlich geringer ausfällt als bei den gefilterten Mobilitätsdaten. Ebenfalls reduzieren sich die maximal erforderlichen Reichweiten. Hierdurch kann, begründet durch die signifikante Mobilität, eine gute Einsatzfähigkeit für Elektromobilität im ländlichen Raum bestätigt werden.

Basierend auf den Erkenntnissen der Mobilitätsdaten-Analyse und unter Einbeziehung der Relevanz von gewichteter Mobilität kann der Mobilitätsplan zur Beschreibung des alltäglichen Mobilitätsbedarfs von Nutzern im ländlichen Raum abgeleitet werden.

Tabelle 3.1 Vergleich von Median, Mittelwert sowie Maximalwert der benötigten Reichweiten der 75-, 95-, 99-Perzentile von gefilterter sowie gewichteter Mobilität

	75-Perzentil		95-Perzentil		99-Perzentil	
	gefiltert	gewichtet	gefiltert	gewichtet	gefiltert	gewichtet
Median in km	5	2	16	11	30	15
Mittelwert in km	9	6	19	14	28	20
Maximalwert in km	36	35	48	42	78	69

3.4. Resultierender Wochenmobilitätsplan

Um familienindividuelle Mobilität verstehen zu können, wird ein Wochenmobilitätsplan für jede Familie erstellt. Dieser beschreibt in verständlicher Form das zeitliche und örtliche Bewegungsverhalten von allen Familienmitgliedern der jeweiligen Haushalte. Im Folgenden wird erläutert, nach welchen Aspekten dieser Plan definiert und aufgebaut wird.

3.4.1. Definition Wochenmobilitätsplan

Das Mobilitätsverhalten von Nutzern zu beschreiben und damit verständlich abzubilden, ist eine Kernaufgabe für viele Anwendungen, wie die Stadtplanung, die Infrastrukturplanung oder die Energieplanung. Je nach Zielsetzung wird eine andere Detailtiefe für die Mobilitätsanalyse gefordert. Im Rahmen dieser Arbeit wird das qualitative Potential bezüglich der Emissionseinsparungen durch das Alltagsmobilitätsverhalten in Kombination mit aus einer PV erzeugter erneuerbarer Energie untersucht. Durch diese Herangehensweise ergeben sich spezielle Anforderungen an den resultierenden Mobilitätsplan.

Für eine Potentialabschätzung wird ein generisches und trotzdem reales Nutzerverhalten benötigt, in dem tagesabhängige Änderungen, aber auch unvorhergesehene Fahrten, Einfluss finden. Durch die Analyse und Bewertung von charakteristischen Größen kann so ein Vergleich stattfinden. Für diesen Schritt wird ein repräsentativer Wochenplan definiert, der sich aus der „gemittelten Alltagsmobilität“ zusammensetzt. Dieser Wochenmobilitätsplan erhebt keinen Anspruch auf hundertprozentig prädiktive Genauigkeit, sondern beschreibt in qualitativer Weise die zeitliche und örtliche Mobilitätsnachfrage der Familien. Es ist zu beachten, dass der entwickelte Wochenmobilitätsplan keine tatsächliche Übereinstimmung mit den aufgezeichneten Rohdaten aufweisen muss. Vielmehr basiert er auf den Kernfahrten zu wichtigen Zielen. Die Fahrtketten setzen sich durch statistische Relationen zusammen. Diese Logik wird im Folgenden detailliert ausgeführt.

3.4.2. Logikentwicklung zur alltäglichen Mobilität

Bei der zugrundeliegenden Logik zur Erstellung des Wochenmobilitätsplans wird das Konzept der „zielorientierten Mobilität“ verfolgt. Dies beinhaltet eine detaillierte Analyse der Mobilitätsketten und Start-Ziel-Zusammenhänge des alltäglichen Mobilitätsverhaltens. Dazu werden die im Flottenversuch gesammelten Rohdaten einer zeitlichen Untersuchung unterzogen, um ein grundlegendes Verständnis für Wochen-Routinen innerhalb der einzelnen Familien erkennen zu können. Die Rohdaten liefern dafür erste Erkenntnis-

se über das Bewegungsverhalten und die reinen wöchentlichen aufgezeichneten Fahrleistungen der einzelnen Familien. Es ist zu beachten, dass die resultierenden Werte nur auf Basis der aufgezeichneten Mobilitätsdaten zu verstehen sind. Ziele, die während des Flottenversuchs angefahren werden, jedoch in keiner Fahrt aufgezeichnet sind, können im Mobilitätsplan nicht berücksichtigt werden.

Abbildung 3.23 stellt beispielhaft das Mobilitätsaufkommen einer Familie über mehrere Wochen dar. Zu jedem Zeitpunkt, an dem die Familie eine Fahrt beginnt, wird diese Fahrt durch einen Punkt verdeutlicht. Je größer der Distanzbedarf der Fahrt ist, desto größer wird der Punkt dargestellt. Durch diese grafische Visualisierung können Muster und Regelmäßigkeiten im Mobilitätsverhalten aufgedeckt werden. Wie in dem mit „Unvollständig“ gekennzeichneten Bereich deutlich wird, ist die Aufzeichnung durch Fehler im Sinne von fehlenden Fahrten beeinträchtigt. Dadurch liegt kein vollständiges Bild vor. Im Bereich „Vollständig“ sind dagegen Fahrten sowohl mit Hin- als auch Rückfahrt zu erkennen. Hier hat die betreffende Person die Fahrten vollständig aufgezeichnet. Des Weiteren zeigt Abbildung 3.24 die durch die Rohdaten erfasste mittlere, wöchentliche Laufleistung der einzelnen Familien. Erkennbar ist die große Schwankung innerhalb der Probandenfamilien bezüglich der Wochenlaufleistung.

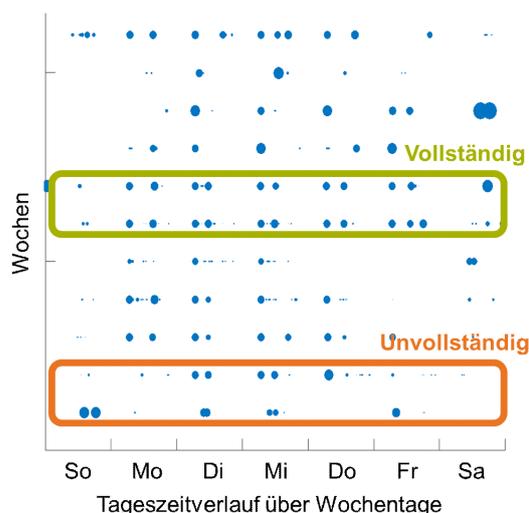


Abbildung 3.23 Auswertung der Rohdaten der Mobilitätsaufzeichnung bezüglich logischer Muster im Bewegungsverhalten

Entsprechend der Logik der „zielorientierten Mobilität“ werden die Bewegungsdaten anhand der am häufigsten angefahrenen Ziele sortiert. Dazu wird jeder Start und jedes Ziel aller Fahrten mit einem durchnummerierten Kennzeichen versehen, das den Längen- und Breitengrad des geographischen Punkts beschreibt. Basierend auf einer Umkreissuche werden nahe beieinander liegende Punkte zusammengefasst, um so die Komplexität zu reduzieren. Durch diese Klassifizierung können alle Fahrten jeweils einem Startpunkt und einem Zielpunkt zugeordnet werden. Damit ist eine Aussage darüber möglich, wie wichtig ein bestimmter Punkt für das tägliche Mobilitätsverhalten ist. Signifikante Punkte sind häufiger Start- und Zielpunkt einer Fahrt, als nicht-signifikante. Als essentielle Randbedingung für ein vollständiges Mobilitätsabbild gilt, dass ein Punkt genau so häufig

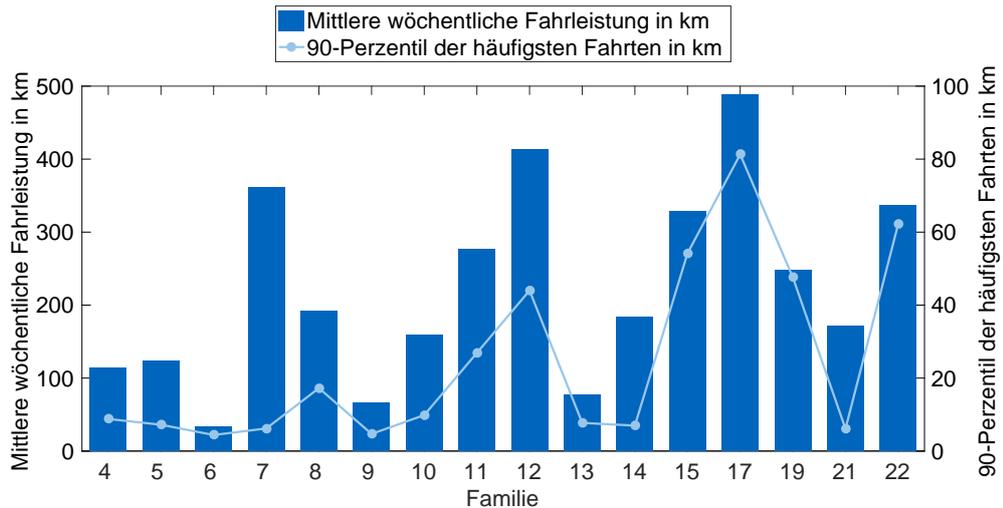


Abbildung 3.24 Auswertung der Rohdaten der Mobilitätsaufzeichnung bezüglich Wochenlaufleistung und häufigsten Fahrten

fig Ziel einer Fahrt ist, wie Start einer Fahrt. Das bedeutet, dass von jedem erreichten Ziel auch wieder gestartet werden muss, um alle Fahrten abzudecken.

Durch die Verknüpfung zwischen Start-Ziel-Punkten und den dazugehörigen Fahrten, können die An- bzw. Abfahrtsdistanzen zu diesem Ziel für die Analysen herangezogen werden. Abbildung 3.24 zeigt zusätzlich das 90-Perzentil der signifikanten Fahrten im Vergleich zu den reinen Wochenlaufleistungen. Dazu werden alle Zielpunkte entsprechend ihrer Wahrscheinlichkeit sortiert und die zugehörigen Fahrdistanzen ermittelt. Die Perzentil-Untersuchung der Fahrdistanzen der häufigsten Ziele der jeweiligen Familien resultiert in den benötigten Reichweiten der einzelnen Familien. Es wird ein 90-Perzentil-Ansatz angenommen, um die häufigsten Fahrten abzudecken. Kürzere Fahrten sind damit automatisch abgedeckt, aber die charakteristischen häufigsten Reichweiten können ermittelt werden. Weil das absolut häufigste Ziel jeder Familie das eigene Zuhause ist, wird dieses Ziel bei dieser Betrachtung vernachlässigt. Diese Herangehensweise bereinigt automatisch die Ergebnisse, weil Fahrten von Zuhause an einen weiteren wichtigen Punkt bereits durch dessen Anfahrdistanzen abgedeckt sind. Eine Verfälschung und überproportionale Gewichtung durch doppelte Berücksichtigung kann damit ausgeschlossen werden.

Das Prinzip der „zielorientierten Mobilität“ erfordert weiterhin detaillierte statistische Informationen über die jeweiligen Ziele, um sie sinnvoll in den Mobilitätsplan aufnehmen zu können. Dazu werden alle Zielpunkte analysiert, verglichen und klassifiziert. Im Folgenden wird dazu beispielhaft auf drei verschiedene Kategorien eingegangen, die mit den gleichen, mindestens jedoch ähnlichen statistischen Eigenschaften bei allen teilnehmenden Familien zu finden sind. Die Kategorien sind das Zuhause der Familien, ein Arbeitsplatz sowie ein Supermarkt als Einkaufsziel. Für die statistischen Analysen werden die Daten bezüglich der Tageszeiten, der gefahrenen Distanzen sowie der Häufigkeit der Zielerreichung untersucht.

Für bessere Übersichtlichkeit wird eine Familie gewählt, die im Allgemeinen kürzere Strecken zurücklegt. Außerdem werden Ausreißerwerte in den beispielhaften Diagrammen nicht gezeigt.

Zielstatistik Zuhause

Das durchgängig häufigste Ziel jeder Familie ist das eigene Zuhause. Wenn dieses innerhalb der Rohdaten-Analyse nicht ausreichend häufig zu finden ist, kann die entsprechende Familie nicht in die weiteren Betrachtungen mit einbezogen werden, weil dann insgesamt zu wenig Fahrten vorhanden sind. Wie aus Tabelle 3.2 ersichtlich, entfallen die Familien 1, 2, 3, 16, 18 und 20 aus den folgenden Analysen und Entwicklungen. Für diese Familien können im Laufe der Studie nicht genügend Fahrten erfasst werden, um daraus verlässliche Ergebnisse abzuleiten.

Tabelle 3.2 Vorkommenshäufigkeit des Ziels „Zuhause“ in den Rohdaten der Familien

Familie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Anzahl	0	16	28	223	254	140	429	234	179	194	469
Familie	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Anzahl	338	154	526	151	27	153	4	102	0	284	44

Die detaillierte statistische Betrachtung des Ziels „Zuhause“ ist in Abbildung 3.25 exemplarisch gezeigt.

Das Ziel „Zuhause“ zeichnet sich besonders bei der Zeitverteilung von Ankunft- und Abfahrtszeit aus. Bedingt durch die wichtige Rolle des Zuhauses für die Alltagsmobilität liegen Ankunftszeiten zeitlich gesehen nach den Abfahrtszeiten. Daraus lässt sich folgern, dass zu jeder Abfahrt stets eine spätere Ankunft zu Hause vorliegt. Ebenfalls lässt sich für das Ziel „Zuhause“ eine hohe Zielerreichung pro Tag und pro Woche feststellen. Basierend auf den Daten wird das Zuhause täglich in den Mobilitätsplan aufgenommen, weil das Delta zwischen zwei Zielerreichungen genau einem Tag entspricht. Das bedeutet, dass zwischen zwei Zielerreichungen zuhause maximal ein Tag liegt. Weiterhin ist die Tagesintensität, also wie häufig das Ziel an welchen Wochentagen angefahren wird, über die komplette Woche verteilt. Es sind leicht niedrigere Häufigkeiten am Wochenende zu erkennen. Dies repräsentiert im Fall des Zuhauses eine geringere Mobilität an diesen Tagen, weil weniger Fahrten von und nach Zuhause stattfinden.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wird für die Entwicklung des Mobilitätsplans zur Beschreibung des alltäglichen Bewegungsverhaltens das Ziel „Zuhause“ als Fixpunkt festgelegt. Jeder Mobilitätstag beginnt mit einer Fahrt, die zu Hause startet und endet mit einer Fahrt, die zu Hause abschließt.

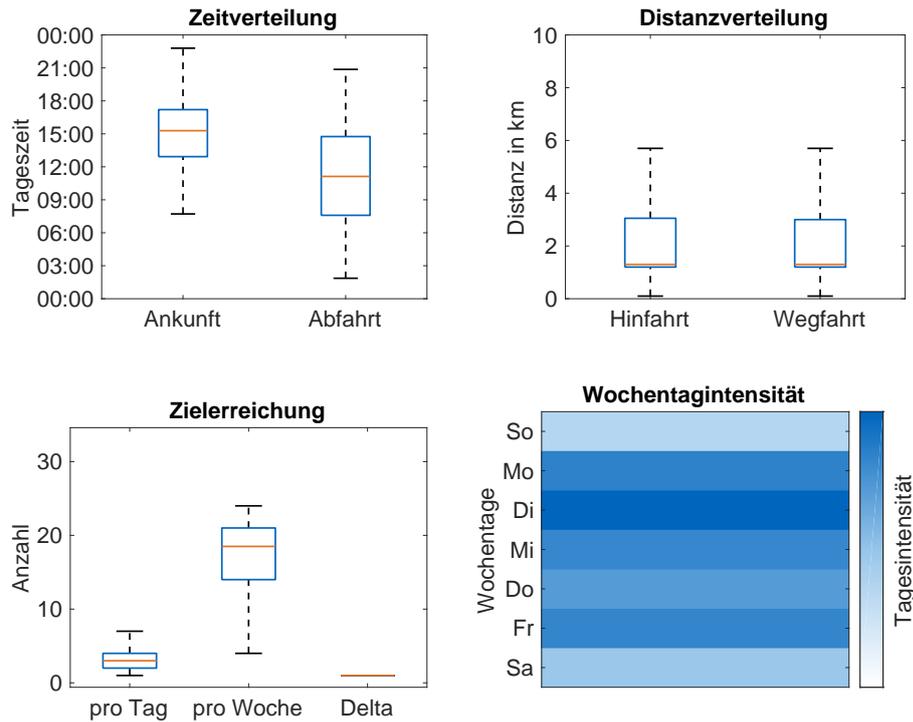


Abbildung 3.25 Graphische Auswertungen einer beispielhaften Zielstatistik zum Zielort „Zuhause“

Zielstatistik Arbeitsplatz

Das – je nach Familienkonstellation – zweithäufigste Ziel ist ein Arbeitsplatz. Es zeigen sich erkennbare statistische Gemeinsamkeiten im Mobilitätsverhalten von Personen, die in VZ arbeiten, gegenüber Personen, die in TZ beschäftigt sind. Abbildung 3.26 zeigt beispielhaft die statistischen Auswertungen.

Entgegen dem Ziel „Zuhause“ sind die Ankunfts- und Abfahrtszeiten am Arbeitsplatz zeitlich nacheinander über den Tag verteilt. Wichtig ist vor allem, dass keine bis wenig zeitliche Überschneidung zwischen Ankunfts- und Abfahrtszeiten existiert. So kann eine belastbare Aufenthaltsdauer an diesem Ziel abgeleitet werden. Eine weitere charakteristische Größe ist die jeweilige Distanz für die An- bzw. Abfahrt. Diese befindet sich für den Arbeitsweg in einem engen Intervall, was für stets ähnliche Fahrtwege spricht und damit eine bedeutende Konstante im täglichen Mobilitätsverhalten repräsentiert.

Als wichtigste statistische Information für Ziele, die nicht das Zuhause beschreiben, ist die Zielerreichung gemeinsam mit der Wochentagintensität zu sehen. Durch die Analyse dieser Zusammenhänge kann das gesamte Mobilitätsverhalten abgeleitet werden. Für diesen Zweck spielt vor allem eine Rolle, wie häufig pro Tag und Woche und an welchen Tagen das Ziel angefahren wird. Die Auswertung zeigt, dass das beispielhafte Ziel aus statistischen Gesichtspunkten im Median einmal täglich, sowie fünfmal wöchentlich im Mobilitätsverhalten auftritt. Das Delta zwischen den Zielerreichungen zeigt eine hohe Tendenz zu einem Ein-Tages-Rhythmus. Die Pause über das Wochenende ist mit der

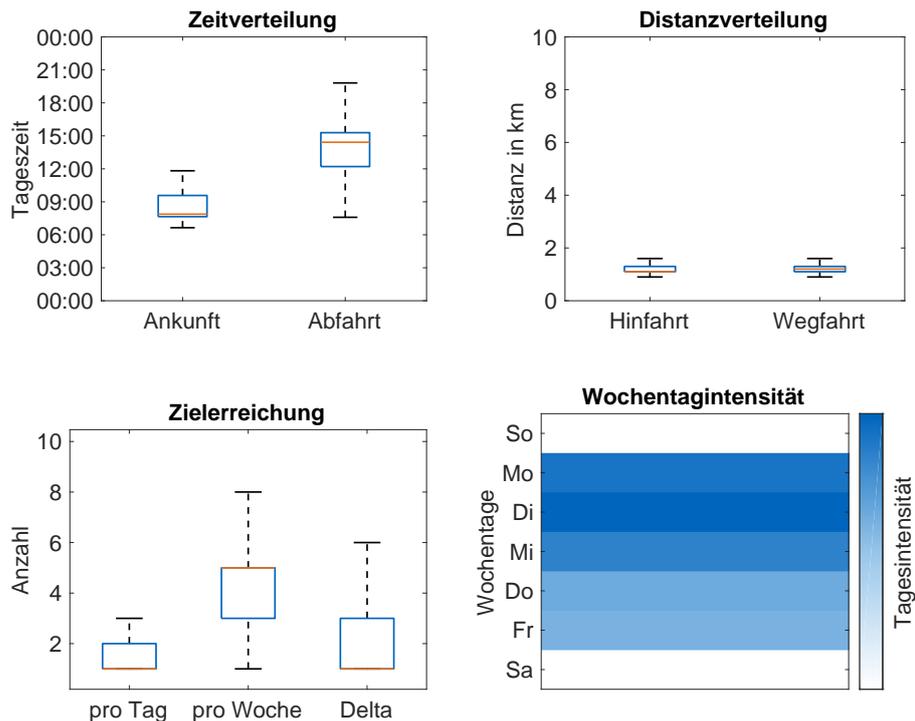


Abbildung 3.26 Graphische Auswertungen einer beispielhaften Zielstatistik zum Zielort „Arbeit“

Verschiebung zu 3 Tagen zu erkennen. Bei der Betrachtung der Wochenintensität ist allgemein eine hohe Regelmäßigkeit über die relevanten Arbeitstage zu erkennen. Es besteht trotzdem eine unterschiedliche Häufigkeit, die aus den Aufzeichnungsfehlern resultiert. Daher können mit diesen statistischen Informationen fehlende Fahrten aufgefüllt werden, um ein ganzheitliches Bild zu erstellen.

Zielstatistik Einkaufen

Im Gegensatz zu Zielen wie dem Zuhause oder der Arbeitsstelle gibt es im alltäglichen Mobilitätsverhalten viele Ziele, die einer höheren Dynamik und Streuung in der Wahrscheinlichkeit unterworfen sind. Dazu zählen beispielsweise Freizeitfahrten oder Besorgungsfahrten. Allerdings lassen sich auch hier charakteristische Informationen aus den Rohdaten ableiten. Diese werden anhand eines typischen alltäglichen Einkaufsziels, einem Supermarkt, verdeutlicht. Wie in Abbildung 3.27 zu sehen, ist vor allem bei der Zeitverteilung von Ankunft und Abfahrt eine große Überschneidung festzustellen.

Hierdurch ergibt sich ein größeres Intervall der Aufenthaltswahrscheinlichkeit an einem Ort dieser Kategorie. Als wichtige Größe dynamischer Ziele ist die Statistik der Zielerreichung zu sehen. Weil die absolute Anzahl dieser verschiedenen dynamischen Ziele im Vergleich zu häufigen Zielen signifikant höher ausfällt, muss sicher gestellt sein, dass diese einzelnen Ziele nicht zu häufig im Wochenmobilitätsplan integriert werden, um einen Überbedarf an Mobilität zu verhindern. Das heißt, ein konsequentes Auffüllen

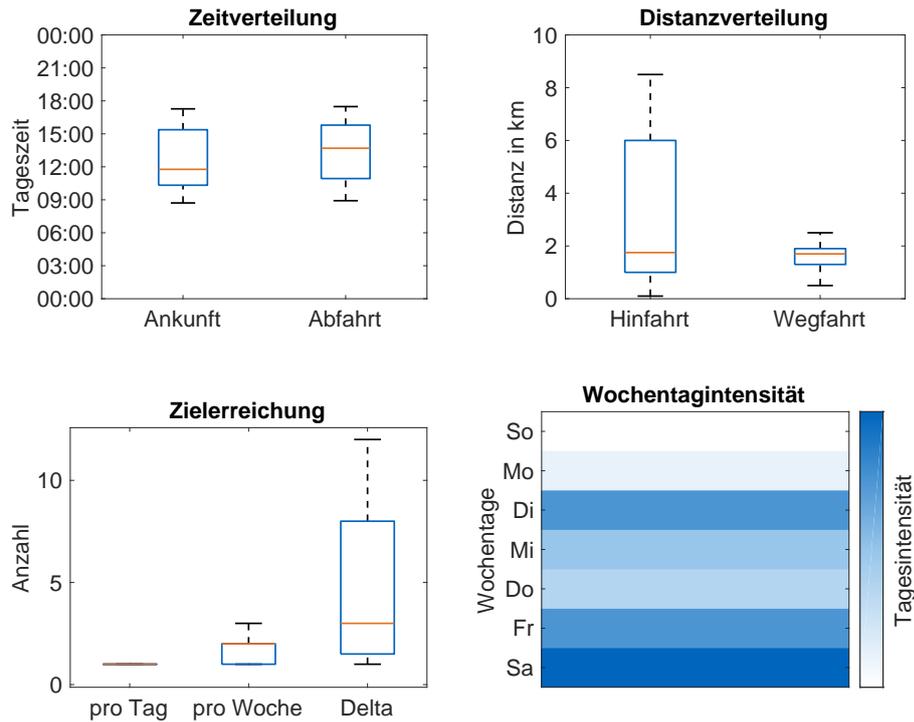


Abbildung 3.27 Graphische Auswertungen einer beispielhaften Zielstatistik zum Zielort „Einkaufen“

ist hier nicht unbedingt notwendig. Eine Grenze der Zielerreichung muss definiert und eingehalten werden.

Wie gezeigt, können aus den Zielstatistiken aller erfassten Ziele detaillierte Informationen zum Mobilitätsverhalten gezogen werden, allerdings besteht das Problem, dass allein aus den Rohdaten kein komplettes Bild erstellt werden kann. Dies führt zur der Notwendigkeit des logisch abgeleiteten Mobilitätsplans, um das gesamte Bewegungsverhalten als Evaluationsgrundlage heranziehen zu können.

3.4.3. Aufbau des Wochenmobilitätsplans

Wie in [147] ausgeführt, wird aufbauend auf den Rohdaten und der Auswertung bezüglich statistischer Kennwerte ein allgemeingültiger, generischer Plan der alltäglichen Mobilität einer Familie im ländlichen Umfeld beschrieben. Der Mobilitätsplan setzt sich dafür nicht nur aus den reinen aufgezeichneten Fahrten zusammen, sondern wird durch logische Verknüpfungen angereichert. Gerade durch die Vorgehensweise der „zielorientierten Mobilität“, die auf statistischen Wahrscheinlichkeiten beruht, ist die Möglichkeit gegeben, spontane oder seltene Ziele in den alltäglichen Bewegungsablauf zu integrieren. Dabei wird allerdings die durch die Rohdaten vorgegebene Häufigkeit beachtet.

Wie in Abbildung 3.28 dargestellt, basiert die Erstellung des Wochenmobilitätsplans auf den aufgezeichneten Daten des Flottenversuchs. Diese Fahrdaten werden – analog zur Logikentwicklung – nach Start-Ziel-Punkten analysiert und zusammengefasst. Es werden die wichtigen Orte festgelegt und mit der entsprechenden Häufigkeit verknüpft.

Durch die anschließende Zeitanalyse lassen sich die charakteristischen An- und Abfahrtszeiten und damit die Verteilung der Aufenthaltsdauer bestimmen. Als weiterer Schritt wird ebenfalls die Wochentagsverteilung mit der Zielerreichung für jedes Ziel festgehalten. Die Grundlage für die Zielorientierungs-Logik besteht in der Analyse der Start-Ziel-Verknüpfungen aller Zielpunkte und den daraus abgeleiteten Wahrscheinlichkeiten für aufeinanderfolgende Fahrten.

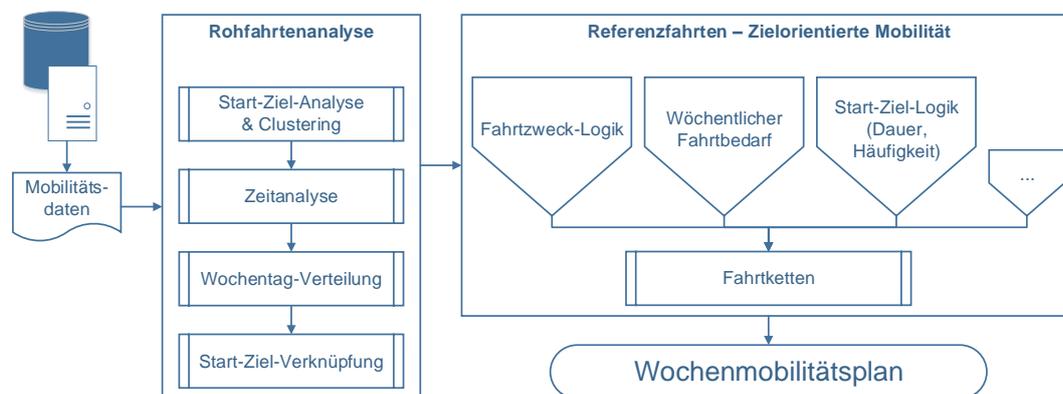


Abbildung 3.28 Graphischer Ablaufplan zur Erstellung des Wochenmobilitätsplans

Anschließend an die grundlegende Analyse und Kennwert-Beschreibung steht die Erstellung der Referenzfahrten, die die Fahrtketten über den Tag und die Woche darstellen. Der Aufbau der Fahrtketten wird stets von dem Punkt „Zuhause“ gestartet. Von diesem Fixpunkt aus wird über alle häufigsten Ziele iteriert. Es werden zu jedem Ziel die typische Anfahrtszeit, die Aufenthaltsdauer und damit die daraus folgende Abfahrtszeit aus den Statistiken extrahiert. Aus dem Pool der aufgezeichneten Rohdaten kann dann eine Fahrt, die zwischen den Punkten verläuft, gewählt und als Teil der Fahrtkette integriert werden. Für den Zeitpunkt der Abfahrt werden wiederum die häufigsten Ziele des zu verlassenden Ortes analysiert. Gewichtet nach der Auftretenswahrscheinlichkeit der nächsten Zielorte wird über einen Zufallsprozess das nächste Ziel gewählt. Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis die Fahrtkette wieder den Fixpunkt „Zuhause“ erreicht.

Um unendliche Fahrten zu vermeiden, wird ein Abbruch-Kriterium definiert. Dazu wird nach Erreichen einer Maximalzahl an Einzelfahrten ohne mögliche Rückkehr nach Hause die bisherige Fahrtkette invertiert und die Strecke wieder zurückgefahren. Als weiteres wichtiges Kriterium in der Verkettung der Fahrten ist die statistische Zielerreichung. Daher wird bei jedem Einfügen eines neuen Zielortes die bisherige Tages- und Wochenenerreichung mit der statistischen Zielerreichung abgeglichen. Wenn die maximale Erreichung bereits in den Referenzfahrten vorliegt, wird das Ziel verworfen und der Zufallsprozess zur nächsten Zielbestimmung erneut ausgeführt.

Da der Wochenmobilitätsplan die gesamte Woche abbilden soll, ist bei der Iteration durch die häufigsten Ziele ausgehend von zu Hause eine Bewertung bezüglich der Wochenintensität notwendig. Dazu wird bei jedem neuen Hauptziel vor der tatsächlichen Verkettung von Zielen festgelegt, an welchen Wochentagen das Hauptziel Bestandteil des

Wochenmobilitätsplans werden soll. Es wird zwischen zwei verschiedenen Verfahren unterschieden: Auffüllen von Tagen und Auswählen von Tagen. Das Auffüllen von Tagen findet hierbei vor allem bei Arbeits- oder Ausbildungszielen statt. Diese sind, wie oben beschrieben, durch charakteristische Zeiten und hohe, gleichmäßige Tagesintensitäten gekennzeichnet. Durch Aufzeichnungsfehler wird die Charakteristik jedoch verfälscht. Durch Kombination der Statistiken können dennoch alle relevanten Tage festgelegt werden, an denen das Ziel für den Wochenmobilitätsplan berücksichtigt werden soll. Dadurch ergibt sich das aufgefüllte Zielverhalten (Abbildung 3.29).

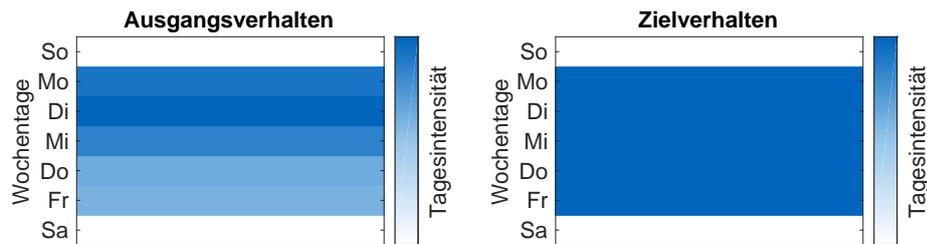


Abbildung 3.29 Basierend auf den statistischen Auswertung werden innerhalb der Aufbau-logik fehlende Fahrten im Wochenmobilitätsplan aufgefüllt, um so das Zielverhalten abbilden zu können

Anders dazu verhält es sich für den Tagesauswahlprozess. Es wird basierend auf der Auftretenswahrscheinlichkeit der einzelnen Wochentage über einen Zufallsprozess festgelegt, an welchen Tagen der Zielort aufgenommen wird. Dazu werden die maximal möglichen Zielerreichungen herangezogen. Als letzte Randbedingung für den Aufbau des Mobilitätsplans wird die Verfügbarkeit eines Fahrzeugs betrachtet. Nur wenn ein Fahrzeug zum Zeitpunkt der Abfahrt von Zuhause zur Verfügung steht, kann überhaupt die Erstellung einer neuen Fahrtkette beginnen. Dazu wird die tatsächlich vorhandene Anzahl an Fahrzeugen innerhalb der Familien als Referenz herangezogen. So kann eine reale Einschätzung für die Bedürfnisse der Familien getroffen werden.

Durch diese Vorgehensweise entsteht pro Familie ein detaillierter Plan, an welchem Tag der Woche, zu welcher Zeit ein bestimmtes Ziel angefahren wird. Als wichtige Information ist die jeweilige Fahrdistanz zwischen zwei Punkten zu betrachten. Diese beschreibt den geforderten Energiebedarf und somit die resultierenden Emissionen.

3.5. Diskussion der Güte des Mobilitätsplans

Das tägliche Mobilitätsverhalten ist geprägt durch einen hohen Individualitätsfaktor. Der Mobilitätsbedarf zeichnet sich demnach durch hohe Freiheit und Spontaneität aus. Ein komplettes, fehlerfreies Abbild ist daher nur durch ein durchgängiges Fahrtenbuch zu gewährleisten. Dieses zeigt nur das tatsächliche Verhalten genau im Aufzeichnungszeitraum auf. Wenn Aufzeichnungsfehler und -lücken vorliegen, verlieren die Mobilitätsdaten dementsprechend an Aussagekraft. Bei nur kleinen, sporadischen Lücken und damit geringem, fehlendem Prozentsatz an Daten, können diese zwar noch verwendet werden. Allerdings steigt die Unsicherheit, weil nicht mit absoluter Genauigkeit gesagt werden kann, wie viele Fahrten tatsächlich fehlen.

Diese Unsicherheit kann durch verschiedene Herangehensweisen reduziert werden. Eine Möglichkeit ist es, nach Aufzeichnung und Verarbeitung den Teilnehmern das Fahrtenbuch vorzulegen und Korrekturen und Validierung einzufordern. Dafür ist jedoch die Mitwirkung der Teilnehmer von entscheidender Bedeutung. Bei zu großem Zeitabstand zwischen Aufzeichnung und Nachkorrektur oder einer großen Menge an Daten ist die Rekonstruktion entsprechend erschwert.

Als Alternative ist daher der Ansatz zu sehen, sich von einem durchgängigen, tatsächlichen Mobilitätsabbild zu lösen, und eine generische, qualitative Beschreibung der Mobilität zu verwenden, wie sie in dieser Arbeit verfolgt wird. Es besteht allerdings das Problem von Lücken im Mobilitätsverhalten. Durch die qualitative Beschreibung ist es möglich, eine wahrscheinliche, sinnvolle Fahrt einzufügen, die den statistischen Randbedingungen genügt. So kann ein Plan entwickelt werden, der den Mobilitätsbedarf allgemein beschreibt. Durch den generischen Aufbau des Mobilitätsplans ist eine tatsächliche Validierung nicht möglich. Aus diesem Grund muss eine alternative Möglichkeit für die Plausibilisierung des Mobilitätsplans gefunden werden. Im betrachteten Fall wird dazu die Größe der Wochenlaufleistung sowie die Korrelation mit den häufigsten Fahrten herangezogen. Zuerst wird die Laufleistung, die sich aus der Entwicklung des Wochenmobilitätsplans ergibt, untersucht.

Bei dem Vergleich der Wochenlaufleistung von Rohdaten-Mobilität und Plan-Mobilität, wie sie in Abbildung 3.30 gezeigt ist, ist es vor allem wichtig, die Auswirkung der Auffüll-Logik zu beachten.

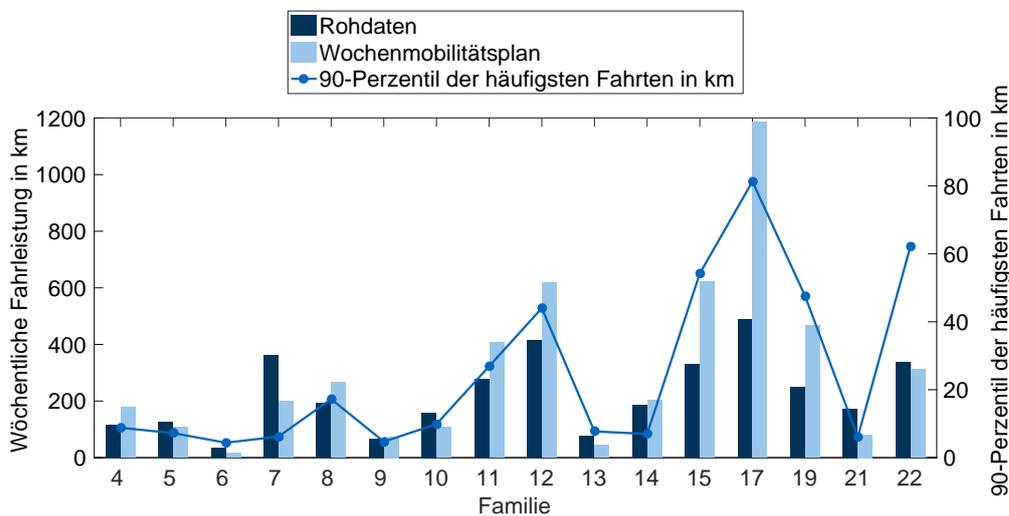


Abbildung 3.30 Vergleich der Wochenfahrleistungen der einzelnen Familien nach Rohdaten sowie Mobilitätsplan; zum weiteren Vergleich ist erneut die Distanz der häufigsten Fahrten abgebildet

Als Beispiel dient eine häufig vergessene und damit nicht aufgezeichnete Rückfahrt des täglichen Arbeitswegs. Für ein komplettes Bild wird diese aufgrund der Logik eingefügt. Dadurch kann die Wochenlaufleistung des Mobilitätsplans deutlich höher ausfallen als aus den Rohdaten vorgegeben. Als Reduktionsgröße der Wochenlaufleistung ist im Gegensatz dazu der Einfluss von vermehrten Rauschfahrten zu sehen. Neigt eine Familie

zu einem unregelmäßigen Mobilitätsverhalten, werden insgesamt weniger Alltagsfahrten pro Tag festgelegt, weil aus den Rohdaten keine häufigen Ziele und damit kein signifikantes Fahrverhalten abgeleitet werden kann.

Nach einer kritischen Betrachtung und Bewertung liegen alle Plan-Laufleistungen in einer für Alltagsanwendungen realistischen Größe. In den meisten Fällen ist die Laufleistung des Wochenmobilitätsplans höher oder ähnlich der Laufleistung aus den Rohdaten. Nur bei den Familien 7, 13 und 21 fällt die Laufleistung des Wochenmobilitätsplans signifikant niedriger aus, weil das Mobilitätsverhalten viel stärker rauscht und nur wenige bis teilweise überhaupt keine Kernziele, abgesehen vom Fixpunkt „Zuhause“, detektiert werden können.

Im nächsten Schritt wird die Relation zwischen wöchentlichen Laufleistungen des Mobilitätsplans und dem Einfluss häufiger Ziele detaillierter untersucht und bewertet. Es wird erneut das 90-Perzentil der Fahrdistanzen zu den signifikanten Zielen verwendet. Bei der Gegenüberstellung ist ein linearer Zusammenhang erkennbar. Dieser ist in Abbildung 3.31 dargestellt.

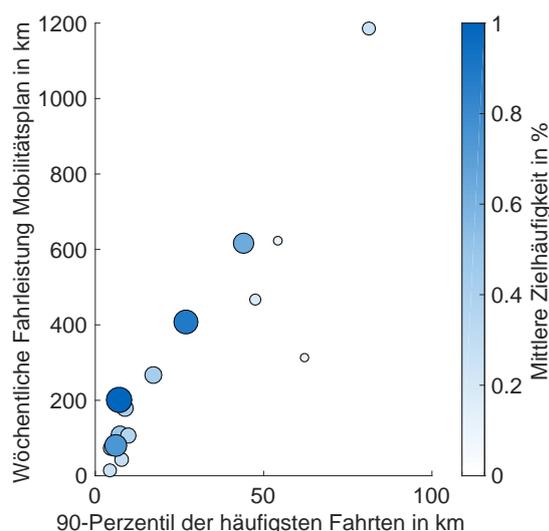


Abbildung 3.31 Zusammenhang zwischen häufigsten Distanzen und der Laufleistung nach dem Wochenmobilitätsplan; die Größe und Farbintensität der Punkte beschreibt die absolute Häufigkeit der angefahrenen Ziele und damit die Signifikanz

Als weiterer Einflussfaktor geht die mittlere Zielhäufigkeit der jeweiligen Familie in die Bewertung mit ein. Dazu werden die Zielerreichungen der häufigsten Ziele gemittelt. Hierdurch entsteht ein Maß, das anzeigt, wie repetitiv und damit stabil das Mobilitätsverhalten ist. Je dunkler und größer ein Punkt dargestellt ist, desto aussagekräftiger ist der Zusammenhang, weil der Datenpunkt durch eine höhere mittlere Zielhäufigkeit zustande kommt. Ausreißer nach unten sind vorhanden, allerdings mit einem deutlich geringeren Einfluss. Diese Familien zeichnen sich mit einem relativ gesehen weniger stabilen Mobilitätsverhalten aus, wodurch die Planerstellung stärkeren Schwankungen unterworfen ist.

Ein allgemeines, generisches Abbild der alltäglichen Mobilität wird durch den Wochenmobilitätsplan bereits geliefert. Durch die Einbeziehung der Relationen zu den häufigsten Zielen steht ein Maß der Vergleichbarkeit zur Verfügung. Aufbauend auf diesen Daten kann die weitere Analyse erfolgen.

4. Systematische Optimierung und Evaluation des Emissionspotentials

Aufbauend auf dem Wochenmobilitätsplan kann der generische Mobilitätsbedarf auf sein Emissions-Einsparungspotential hin untersucht werden. Zuerst wird auf den Stand der Technik eingegangen, der es ermöglicht, durch die Nutzung von PV und Pufferspeichern die private Energie- und damit Emissionsbilanz zu beeinflussen. Als weiterer Schritt wird der Verbrauch durch das Mobilitätsverhalten analysiert und quantifiziert. Durch eine Analyse der Optimierungspotentiale bei der Kombination von Elektromobilität, PV und Pufferspeicher werden Einsparmöglichkeiten bei der Emission von CO₂ abgeleitet. Diese werden durch eine iterative Adaption an das reale Nutzerverhalten detailliert und validiert. Zum Abschluss dieses Kapitels werden die Einsparpotentiale interpretiert und kritisch diskutiert.

4.1. Stand der Wissenschaft zu Photovoltaik-Anlagen sowie Pufferspeichern im Privatgebrauch

Bedingt durch steigende Strompreise in den letzten Jahren [148] (Abbildung 4.1) und dem Ziel der verstärkten Nutzung von erneuerbaren Energien, das im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) festgehalten wird, ist die Nutzung einer PV für den Privatanwender attraktiv geworden.

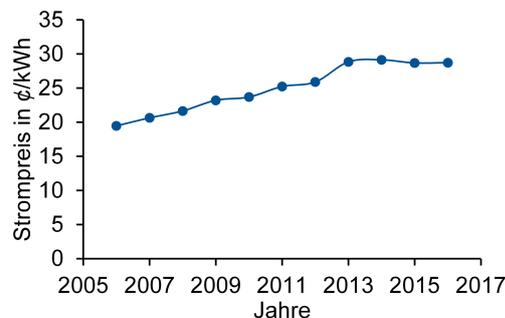


Abbildung 4.1 Durchschnittlicher Strompreis für einen Haushalt in $\frac{\text{¢}}{\text{kWh}}$ 2006 bis 2016; Jahresverbrauch von 3.500 kWh; ©BDEW [148]

Es ist zu beachten, dass die Förderungsmöglichkeiten im Rahmen des EEG für den Privatanwender zwei gegensätzliche Modelle zur Verfügung stellen:

Einspeisung: Bei diesem Nutzungsmodell wird der durch die PV generierte Strom in das Stromnetz eingespeist und steht allen Netzkunden – und damit auch dem Bereitsteller der PV – zum Verbrauch zur Verfügung. Für die Einspeisung wird der Bereitsteller pro gelieferter kWh vergütet. Zu Beginn der EEG-Förderung 2009 wurde die Einspeisung gemäß § 33 Abs. 2 EEG [149] noch mit $25,01 \frac{\text{¢}}{\text{kWh}}$ vergütet. Mittlerweile ist durch die mehrfache, stufenweise Reduktion der Vergütungssatz unter den Preis

des Netzstroms gefallen. Damit ist eine Einspeisung für neue Anlagen nicht mehr wirtschaftlich lohnend.

Eigenverbrauch: Als Alternative zur Einspeisung ins Netz kann der generierte Strom auch direkt selbst verbraucht werden. Vor allem, wenn der Netzpreis teurer ist als die Kosten für den selbst erzeugten Strom, wird eine Möglichkeit zur Kosteneinsparung geschaffen. Zu beachten ist allerdings, dass durch die neuesten Verordnungen eine Abgabe für selbst verbrauchten Strom verlangt wird. Hier bietet sich jedoch für Privatanwender ein gesetzliches Schlupfloch. Anlagen bis maximal 10 Kilowatt Peak (maximale Leistung der PV) (kW_p) sind von dieser Abgabepflicht gemäß § 61 Abs. 2 Nr. 4 EEG [150] befreit. Der Eigenverbrauch ist also vor allem für Privatanwender eine interessante Option zur Kosteneinsparung.

Aus diesen Gründen haben sich für die Forschung und die Industrie verschiedene Aspekte gefunden, für die neue Anwendungsfälle untersucht und Nutzungskonzepte angeboten werden können. Beispiele verschiedener Untersuchungen zum Thema der Kombination von Gebäude und Elektromobilität sind die Projekte econnect eE-Tour Allgäu Smart-Facility [151], eHome 2020 [152], Effizienzhaus Plus [153] und eMOBILie [154]. Dabei stehen das optimale Ladeverhalten und die Auswirkungen auf das Stromnetz im Untersuchungsfokus.

4.1.1. Eigenschaften, Dimensionierung und Anschaffungskosten

Im Folgenden wird auf die Details von PV eingegangen. Anschließend werden aktuelle Daten zu Pufferspeichern im Heimgebrauch vorgestellt.

Photovoltaik-Anlage

Durch die Absorption von Licht wird die Bewegungsenergie der Photonen in den Solarzellen der PV in elektrische Energie umgewandelt [14, S. 10-27]. Als wesentliche Voraussetzung und Einflussfaktor auf den Wirkungsgrad gilt die Einstrahlung der Sonne. Diese wurde mit Hilfe der Solarkonstante E_0 quantifiziert, indem die mittlere Einstrahlung auf die Erdatmosphäre mit $1367 \frac{W}{m^2}$ festgelegt wurde. Daraus lässt sich die Globalstrahlung G für einzelne Orte bestimmen, die sich aus Diffus- (ungerichtet) und Direktstrahlung (gerichtet) der Sonneneinstrahlung ergibt. Sie hängt von folgenden weiteren Größen ab:

- Geographischer Ort, beschrieben durch den Breitengrad
- Tag innerhalb des Jahres, beschrieben durch den Deklinationswinkel
- Zeitpunkt innerhalb eines Tages, beschrieben durch den Stundenwinkel

Nicht nur die Strahlung selbst beeinflusst den umgesetzten Energieanteil. Der Wirkungsgrad η_{PV} von Photovoltaikzellen im Realgebrauch liegt derzeit bei 15-22 %, je nach genutzter Technologie. Unter Laborbedingungen können höhere Wirkungsgrade von bis zu 46 % erzielt werden [155].

Als Vergleichsfaktor für verschiedene PV hat sich die Bezugsgröße $\frac{\text{€}}{\text{kW}_p}$ etabliert. 1 kW_p wird, je nach Technik, von vier bis fünf Photovoltaikmodulen bereitgestellt, was etwa 8 bis 10 m² Fläche entspricht. PV-Komplettlösungen (Module, Wechselrichter, Material und Montage) für den Privatgebrauch kosten derzeit etwa 1000 bis 1700 $\frac{\text{€}}{\text{kW}_p}$, je nach verbauter Technik und Standort [156, 157].

Im privaten Anwendungsbereich ist die Größe der verbauten PV außerdem durch die Dachfläche beschränkt. Deswegen bewegen sich die meisten privaten PV im Bereich von 4 bis 6 kW_p. Außerdem ist es für zukünftige privat genutzte PV aufgrund der oben beschriebenen EEG-Regelung nicht sinnvoll, mehr als 10 kW_p zu verbauen.

Pufferspeicher

Wie bereits voranstehend beschrieben, kann der durch die PV erzeugte Strom auf verschiedene Weise verwendet werden. Begünstigt durch die für neuere Anlagen niedrige Einspeisevergütung empfiehlt sich der Eigenverbrauch der Energie. Das wird aber durch die nicht verbrauchsparallele Erzeugung erschwert. Aus diesem Grund bieten sich Batterien als Pufferspeicher für den Privatgebrauch an. So kann die Energie stunden- oder tageweise zwischengespeichert werden, bis sie dann durch den normalen Verbrauch genutzt werden soll.

Für diese Batteriespeicher stehen verschiedene Speichertechnologien zur Verfügung. Sie zeichnen sich durch unterschiedliche Ausprägungen bezüglich Selbstentladung, Zyklenzahlen, Betriebstemperaturen, Energiedichten und Nennspannungen aus. Hierdurch ergeben sich je nach Nutzungsfall Vor- oder Nachteile für die verschiedenen Materialien [158, S. 157-170].

Durch die Gegebenheiten für die Speicherung von Solarenergie müssen Pufferspeicher für diesen Anwendungsfall über eine hohe Zyklenfestigkeit und eine angemessen hohe Speicherkapazität verfügen. Außerdem ist es wichtig, dass sich die Batterie nur gering selbst entlädt und wenig Wartungsaufwand verursacht [14, S. 97].

Der Vergleich von aktuell auf dem Markt vorhandenen Speichersystemen zur Anwendung als Solarspeicher ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Zu beachten ist, dass sich die Anschaffungskosten auf die Komplettlösung für Privatanwender beziehen.

Interessant für die weitere Abschätzung ist der Preis pro kWh. Diese Vergleichsgrößen sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Die Preise bewegen sich zwischen derzeit etwa 500 $\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ und mehr als 2000 $\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$. Im Mittel liegt der Preis bei etwa 1200 $\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$.

Wie es im Solarstromspeicher-Preismonitor des Bundesverbands Solarwirtschaft e.V. [161] gezeigt ist, fallen die Preise für Solarspeicher konstant. Dieser Trend kann auch für die Zukunft angenommen werden. Dies gilt vor allem unter Beachtung des Drucks aus der Automobilindustrie, immer günstigere und leistungsstärkere Batteriespeicher zu entwickeln, um so die Elektromobilität attraktiver zu machen.

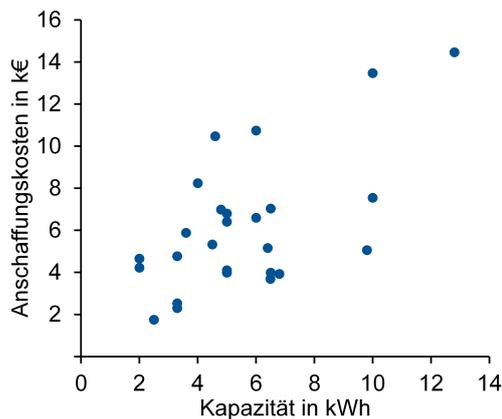


Abbildung 4.2 Darstellung der Anschaffungskosten für verschiedene Hausspeicher; Werte: [159], [160]

Tabelle 4.1 Vergleich der relativen Anschaffungskosten für verschiedene Hausspeicher; Stand 2016

	Preis in $\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$
Minimum	516
Maximum	2326
Mittelwert	1200
Median	1114

Wie auch bereits aus der Darstellung der aktuell angebotenen Speicherlösungen hervorgeht, werden diese meist mit einer Speicherkapazität im einstelligen kWh-Bereich angeboten. Sie sind dann ausreichend kompakt, um ohne Probleme in Privatgebäuden verbaut zu werden. Außerdem wird für PV im Privatgebrauch, die weniger als 10 kW_p liefern, kein größerer Puffer benötigt.

4.1.2. Berechnung des Photovoltaik-Ertrags

Wie vorangehend beschrieben, generieren PV die elektrische Energie durch die Einstrahlung der Sonnenenergie. Des Weiteren liefert eine PV maximal den Energiebetrag, der über ihre technische Spitzenleistung, beschrieben durch den kW_p-Wert, definiert ist. Die tatsächlich verfügbare Leistung variiert zeitlich und örtlich, abhängig von der aktuellen Globalstrahlung. Die Globalstrahlung, verrechnet mit den technischen Spezifikationen der Anlage, kann dann für die Berechnung der generierten Solarleistung herangezogen werden.

Zur Ermittlung der Globalstrahlung G [162, S. 20f.], [163], wird ausgehend von der Solarkonstanten E_0 die Sonneneinstrahlung I berechnet:

$$I = E_0 \sin \gamma \quad (4.1)$$

Der Winkel γ beschreibt den Winkel zwischen Sonneneinstrahlung und der horizontalen Ebene, also den Höhenwinkel der Sonne über dem Horizont. Er setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$\sin \gamma = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (4.2)$$

φ bezeichnet die geographische Breite (im Bogenmaß) des Beobachtungsortes. Der Winkel zwischen dem Sonnenzenit und dem Äquator, bekannt unter dem Sonnendeklinationwinkel, wird als δ definiert. Er wird wie folgt bestimmt:

$$\delta = 0,409 \cos\left(2\pi \frac{n_{\text{day}} - 173}{365,25}\right) \quad (4.3)$$

n_{day} bezeichnet den Tag des Jahres. Um den Einfluss des Sonnenstands über den Tag zu quantifizieren, beschreibt ω den Stundenwinkel der Sonne.

$$\omega = \frac{\pi h}{12} - \lambda \quad (4.4)$$

Dazu werden die Tagesstunde h sowie die geographische Länge λ (im Bogenmaß) des Beobachtungsortes verwendet. Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor ist die mögliche Transmission der Sonnenstrahlung, die durch den Transmissionsfaktor T_k ausgedrückt ist. Burridge und Gadd [164] entwickelten dazu ein empirisches Modell, das diesen abhängig vom Höhenwinkel der Sonne γ und dem Bedeckungsgrad beschreibt. Der Bedeckungsgrad setzt sich zusammen aus der Bedeckung durch tief hängende Wolken $p_{c,l}$, durch Wolken auf mittelhohem Niveau $p_{c,m}$ und durch hoch stehende Wolken $p_{c,h}$.

$$\begin{aligned} T_k &= (0,6 + 0,2 \sin \gamma) (1 - 0,4 p_{c,l}) (1 - 0,7 p_{c,m}) (1 - 0,4 p_{c,h}) \\ &\approx (0,6 + 0,2 \sin \gamma) (1 - 0,5 p_c) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Online-Wetterdaten liefern meist nur den allgemeinen Bedeckungs- bzw. Bewölkungsgrad p_c , weswegen eine Vereinfachung angenommen werden muss, die durch das arithmetische Mittel der Faktoren angenähert werden kann.

Nach der Bestimmung aller Einflussfaktoren kann die Globalstrahlung G berechnet werden. Dazu wird die Sonneneinstrahlung aus Gleichung 4.1 mit dem Transmissionsfaktor T_k verrechnet.

$$G = IT_k = \begin{cases} E_0 \sin \gamma T_k & \text{für } \sin \gamma > 0 \\ 0 & \text{für } \sin \gamma \leq 0 \end{cases} \quad (4.6)$$

Zu beachten ist der Fall, dass $\sin \gamma$ durch den Verlauf der Sonne über den Tag relativ zum Beobachtungsort einen negativen Wert und damit eine negative Globalstrahlung annehmen kann. Daher muss in diesem Fall $G = 0$ gesetzt werden.

Um nun die Leistung P_{PV} der PV berechnen zu können, werden noch die technischen Spezifikationen der Anlage benötigt. Der technische Wirkungsgrad $\eta_{PV,t}$ wird durch die Ausrichtung sowie den Neigungswinkel beeinflusst (Abbildung 4.3) [165, S. 53-59].

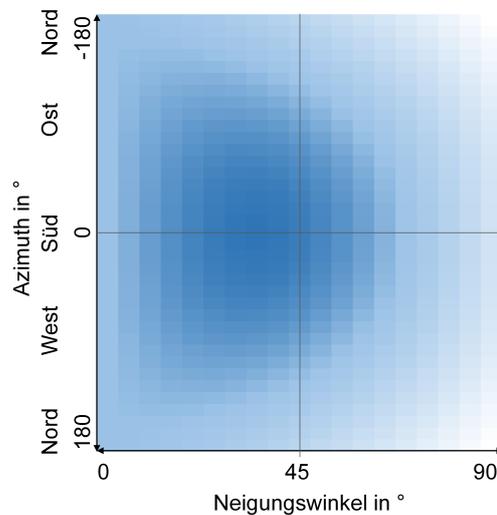


Abbildung 4.3 Qualitative Darstellung des technischen Wirkungsgrads $\eta_{PV,t}$ einer PV abhängig vom Neigungswinkel sowie der Ausrichtung der Anlage; der maximale technische Wirkungsgrad wird bei komplett südlicher Ausrichtung und einem Neigungswinkel von etwa 35° erreicht [165, S. 53-59] und entspricht dem durch Material und Bauart erreichbaren Wirkungsgrad; je dunkler die Farbintensität, desto höher der Wirkungsgrad

Die Leistung P_{PV} berechnet sich dann aus der Globalstrahlung G (in $\frac{kW}{m^2}$), der bestrahlten PV-Fläche a_{PV} (berechnet aus dem kW_p -Wert mit $10 m^2$ pro $1 kW_p$), dem technischen Wirkungsgrad $\eta_{PV,t}$ und dem Anlagenwirkungsgrad η_{PV} :

$$P_{PV} = \frac{1}{1000} G a_{PV} \eta_{PV,t} \eta_{PV} \quad (4.7)$$

Mit dieser Berechnung kann der Tagesleistungsverlauf der PV ermittelt werden.

4.1.3. Eigenverbrauch der Photovoltaik-Energie

Wie vorangehend ausgeführt, ist die alleinige Einspeisung der Photovoltaikenergie für Privatanwender nicht mehr rentabel, weil die derzeitige Einspeisevergütung unterhalb des Netzstrompreises liegt. Parallel zur Reduktion der Einspeisevergütung fördert der Gesetzgeber mit unterschiedlichen Programmen die Erzeugung erneuerbarer Energien. Vor allem der Zuschuss durch die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) für Speichersysteme in Verbindung mit einer PV [166] liefert ein großes Potential für den sinnvollen Eigenverbrauch.

Aus diesem Grund rückt der Eigenverbrauch in den Fokus für die tatsächliche Nutzung und in Forschungsfragen. Dabei werden optimale Anwendungsfälle und Einflussfaktoren untersucht.

Mierau et al. [167] bewerten das Potential des Eigenverbrauchs der Photovoltaik-Energie durch die Ladung von BEV für Privatanwender. Sie nutzen ein einfaches Mobilitätsmodell, basierend auf den Daten der Umfrage Mobilität in Deutschland (MiD) [168]. Des

Weiteren werden gemittelte Nutzergruppendaten für Haushaltsenergieverbrauch und PV-Erzeugung verwendet. Das Szenario beurteilt mit Hilfe eines fiktiven BEV mit ungesteuerter oder intelligenter Ladung den anteiligen Eigenverbrauch. Der Haushalt wird als Eigenverbraucher priorisiert. In einem weiteren Schritt wird die Ladeleistung und die Größe der PV variiert. Ein Pufferspeicher wird nicht betrachtet, weswegen die ungesteuerte BEV-Ladung keine signifikanten Steigerungen im Eigenverbrauch erreichen kann (Abbildung 4.4).

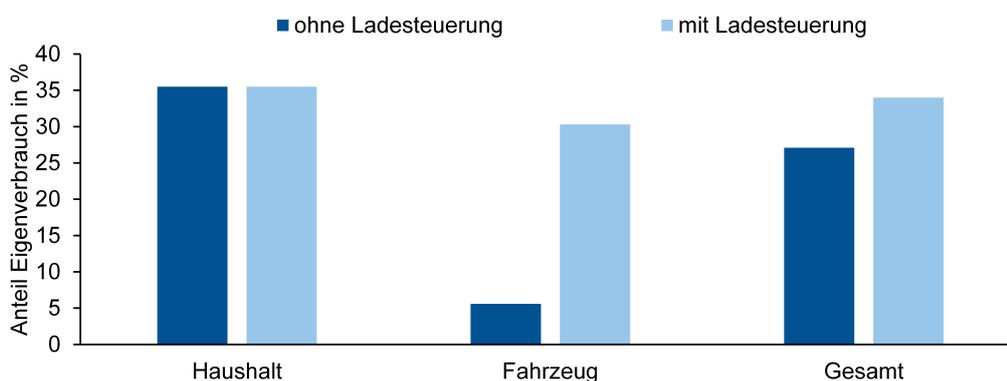


Abbildung 4.4 Eigenverbrauchs-Anteil für ungesteuerte und intelligente Ladung (3,5kW Ladeleistung, 4kW_p-PV) [167]

Der Aspekt der intelligenten Ladesteuerung zur Erhöhung des Eigenverbrauchs wird auch von van der Kam und van Sark bewertet [169]. Es wird ein Microgrid mit einer 31 kW_p-PV, mehreren Gebäuden und BEV betrachtet. In dieser Szenario-Analyse kann der Eigenverbrauch von 49% auf bis zu 87% gesteigert werden.

Castillo-Cagigal et al. [170] untersuchen dagegen den Einfluss eines Pufferspeichers auf den Eigenverbrauch von Photovoltaik-Energie, ohne jedoch explizit ein BEV als Verbraucher mit einzubeziehen. Sie zeigen, dass durch aktive Ladesteuerung zwar eine starke Erhöhung des Eigenverbrauchs erreicht werden kann. Einen noch deutlicheren Einfluss hat jedoch die Nutzung eines Pufferspeichers (Abbildung 4.5). Eine zusätzliche aktive Ladesteuerung liefert dann nur noch leichte Verbesserungen.

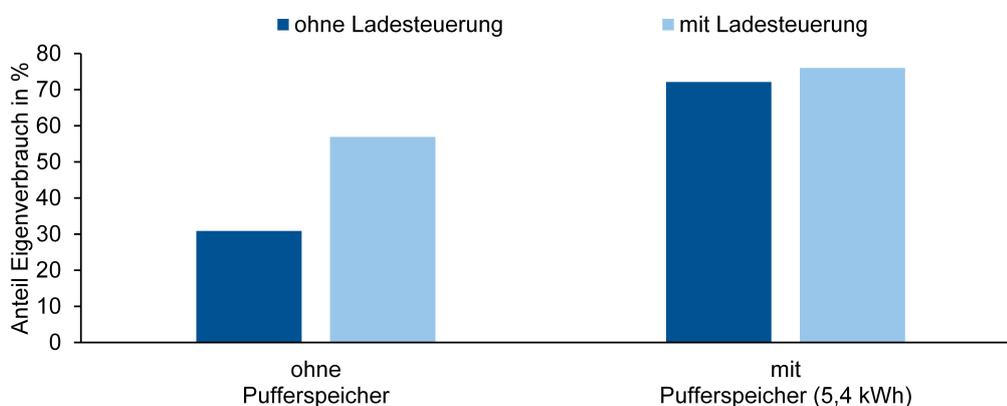


Abbildung 4.5 Eigenverbrauchs-Anteil abhängig von der Verfügbarkeit eines Pufferspeichers und Lade-strategie [170]

Bei Analysen zum Eigenverbrauch in Kombination mit Elektromobilität zeigen Nobis et al. [171], dass durch die Einbeziehung eines Hausspeichersystems die von der PV generierte Energie, die zur Ladung des Fahrzeugs verwendet werden kann, von 18 % auf 41 % gesteigert wird.

Tjaden et al. [172] belegen durch ihre Untersuchungen, dass der Eigenverbrauchsanteil durch die Nutzung eines Pufferspeichers deutlich erhöht werden kann.

4.2. Vorgehen zur Bestimmung des Emissionspotentials

Mittels des vorangehend dargestellten Mobilitätsplans können die durch Mobilität verursachten Emissionen ermittelt werden. Diese sollen durch die Nutzung von Elektromobilität unter der Einbeziehung von erneuerbaren Energien zur Ladung reduziert werden. Die Abschätzung des Emissionspotentials wird im folgenden Kapitel beschrieben. Dazu wird das Vorgehen vorgestellt und die zugrundeliegenden Annahmen erörtert.

4.2.1. Verknüpfung von Mobilität und Emission

Für die Berechnung von Emissionen, die durch Mobilität entstehen, stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung. Eine grundlegende Unterscheidung ist der betrachtete Zeitraum der Emissionsentstehung. Es wird unterschieden zwischen der Lebenszyklusanalyse, die alle Emissionen von Herstellung, Auslieferung, Betrieb, Wartung und Entsorgung des Fahrzeugs mit einbezieht, und den reinen Betriebsemissionen während der Mobilität [173, S. 12]. Für die Bestimmung der ausgestoßenen Emissionen ist die Diskrepanz zwischen den vom Hersteller angegebenen Werten und den tatsächlich im Realbetrieb entstehenden Emissionen zu beachten. Diese Abweichung ist vor allem in den letzten Jahren immer größer geworden [174] und mit Beginn des Abgasskandals in den Fokus der Gesellschaft gerückt. Aus diesem Grund ist es nicht sinnvoll, die Bewertung basierend auf theoretischen Werten durchzuführen, sondern CO₂-Werte heranzuziehen, die dem Realverbrauch entsprechen.

Für die Bewertung des Emissionspotentials wird dazu der Referenzwert eines Grundscenarios benötigt. Dieser wird für diese Arbeit als der Emissionsausstoß definiert, der durch das Mobilitätsverhalten bei Nutzung eines konventionellen, marktüblichen, verbrennungsmotorisch betriebenen Pkw, im weiteren Verlauf als konventionelles Verbrennerfahrzeug (engl. Internal Combustion Engine Vehicle) (ICEV) bezeichnet, entsteht. Als realistischer Verbrauchskennwert wird ein ICEV mit Ottomotor und einem mittleren Verbrauch von $5,3 \frac{l}{100 km}$ angenommen. Dieser Wert berechnet sich aus dem Emissionsziel von $95 \frac{g CO_2}{km}$ und einem Realfaktorzuschlag von 30 %. Der Verbrauch ist unter der Prämisse gerechtfertigt, dass der durchschnittliche Realverbrauch 2013 bei $7,8 \frac{l}{100 km}$ [175, S. 303] lag. Durch Effizienzsteigerungen kann mit dem niedrigeren Verbrauch für die Zukunft gerechnet werden. Um vom Verbrauch auf die ausgestoßenen CO₂-Emissionen schließen zu können, wird der CO₂-Umrechnungsfaktor von $2,33 \frac{kg CO_2}{l}$ für den Treibstoff Benzin [176, S. 40] verwendet.

Basierend auf diesem Grundszenario kann der Emissionsausstoß bestimmt werden. Dazu wird ein dreistufiges Evaluationsvorgehen angewendet: Es werden die resultierenden CO₂-Emissionen aus dem Mobilitätsverhalten durch Nutzung eines

1. BEV
2. BEV mit Ladung durch PV
3. BEV mit Ladung durch PV und Pufferspeicher

ermittelt und bewertet.

Als BEV werden die in Tabelle 4.2 aufgeführten Fahrzeugparametrierungen, basierend auf den Realtest- bzw. Szenario-Werten, verwendet. Der Allgemeine Deutsche Automobil-Club (ADAC) unterzieht verschiedene Fahrzeuge einem Autotest. Diese vergleichbaren Werte werden als Realtest-Werte herangezogen. Für die weiteren Untersuchungen werden die drei Fahrzeuge BMW i3 (Realtest), VW e-Golf (Realtest) und Szenario BEV betrachtet. Das Szenario BEV beschreibt dabei ein nicht im Detail spezifiziertes, effizientes und leichtes Kleinfahrzeug.

Tabelle 4.2 Fahrzeugparametrierungen für Emissionsbewertung

	BMW i3		VW e-Golf		Szenario BEV
	Hersteller [177]	ADAC Autotest [178]	Hersteller [179]	ADAC Autotest [180]	
Verbrauch in $\frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}}$	12,6	16,7	12,7	18,2	10
Batteriekapazität in kWh	33	-	35,8	-	20

Analog zum Realfaktorzuschlag für den Referenzverbrauch des ICEV zeichnen sich die BEV durch eine 30- bis 40-prozentige Abweichung zwischen vom Hersteller angegebenem und tatsächlichem Verbrauch aus. Die Emissionsberechnung wird auf Basis von Durchschnittsverbräuchen durchgeführt, ohne detailliert auf das Fahrverhalten einzugehen. Aufgrund des generischen Aufbaus des Wochenmobilitätsplans ist eine Betrachtung des Geschwindigkeitsverlaufs nicht zielführend.

Die Ladung des BEV erfolgt über Ladestationen mit folgenden Ladeleistungen:

Tabelle 4.3 Betrachtete Ladeleistungen für Emissionsbewertung

Phasen	1	1	1	3	3
Stromstärke in A	10	16	32	16	32
Ladeleistung in kW	2,3	3,6	7,4	11	22

Diese Ladeleistungen sind für den Privatgebrauch sinnvolle Anlagen. Bei der Emissionsbewertung handelt es sich um eine Szenarioanalyse, weswegen nicht darauf eingegangen wird, ob das betrachtete Fahrzeug mit jeder Ladeleistung geladen werden kann. Vielmehr beschreiben die Fahrzeugparametrierungen potentiell mögliche Fahrzeuge.

Die Ladung über die Ladestation erfolgt im ersten Schritt und bei Unterversorgung durch die PV über das Stromnetz. Für die Emissionsberechnung wird ein Emissionsfaktor von $235 \frac{\text{g CO}_2}{\text{kWh}}$ angenommen. Dieser Wert basiert auf dem aktuellen Emissionsfaktor für den mittleren, deutschen Strommix [181, S. 11]. Die Stadtwerke München versorgen Privatkunden mit Strom, der einen Emissionsfaktor von $432 \frac{\text{g CO}_2}{\text{kWh}}$ aufweist. Im Mittel beläuft sich der Emissionsfaktor auf $235 \frac{\text{g CO}_2}{\text{kWh}}$. Dieser Wert kann durch Kunden mit Ökostrom-Bezug, der keine Emissionen verursacht [182], erreicht werden. Es wird daher die Annahme getroffen, dass das derzeitige Mittel aller Stromkunden in Zukunft als Emissionsfaktor für den Standard-Strommix erreicht werden kann. Aus diesem Emissionsfaktor und dem Verbrauch während des Ladevorgangs kann der CO_2 -Ausstoß ermittelt werden.

4.2.2. Ladeverhalten als Randbedingung für Emissionseinsparung

Wie vorangehend gezeigt, ist eine Steigerung des Eigenverbrauchs von PV-Energie durch eine Steuerung bei der Ladung von BEV möglich. Ein weiterer Aspekt für eine intelligente Ladestrategie wird von Freire et al. [183] angeführt. Dabei werden die Auswirkungen auf das Netz untersucht, die der Ladevorgang bei einer großen Anzahl von BEV hat. Die intelligente Ladung verhindert Lastspitzen.

Für eine effiziente Emissionseinsparung ist es erforderlich, dass das Laden des Fahrzeugs in Zeiten stattfindet, in denen erneuerbare Energie aus der PV geliefert wird. Aus diesem Grund hat das Ladeverhalten einen direkten Einfluss auf die einsparbaren Emissionen.

Wenn die Ladung stets nur bei aktivem Anstecken des BEV durch den Nutzer beginnt, geht Potential zur Nutzung von erneuerbarer Energie verloren.

Für die Analyse des Ladepotentials wird der Wochenmobilitätsplan der untersuchten Familien herangezogen. Alle Fahrten werden mit den drei definierten BEV in Kombination mit den festgelegten Ladeleistungen simuliert. Durch eine Analyse der Tagesstunden, zu denen sich das Fahrzeug am Zielpunkt „Zuhause“ befindet, kann eine Potentialabschätzung bezüglich der Ladezeiten durchgeführt werden. Dieses Ergebnis veranschaulicht Abbildung 4.6. Vor allem unter der Woche sinkt das Ladepotential in den Tagesstunden mit vorhandener PV-Energie teilweise bis auf Null. Dies ist begründet in der Abwesenheit der Nutzer von Zuhause durch ihre Berufstätigkeit bzw. verschiedene Fahrten tagsüber. Das Laden am Arbeitsplatz wird in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Eine weitere wichtige Bewertungsgröße für das Ladepotential ist die Notwendigkeit zum Laden. Dafür muss zwischen Lademöglichkeit und Ladenotwendigkeit unterschieden werden. Selbst wenn es durch das Mobilitätsverhalten nur wenige Zeitpunkte zur Ladung gibt, können diese ausreichen, um den Energiebedarf zu decken. Kessler und Bogenberger [184] zeigen in ihren Untersuchungen, dass die gefahrene Distanz zwischen Ladevorgängen häufig deutlich unter der tatsächlichen Reichweite liegt. Dazu wird der Ladezustand einer Batterie (engl. State Of Charge) (SOC) nach den Fahrten des Wochenmobilitätsplans betrachtet (Abbildung 4.7). Für diese Analyse wird von einer Ladung an einer haushaltsüblichen Schutz-Kontakt (Schuko)-Steckdose mit 3,6 kW Ladeleistung ausgegangen (Reduzierung der tatsächlichen Ladeleistung auf etwa 3 kW durch thermi-

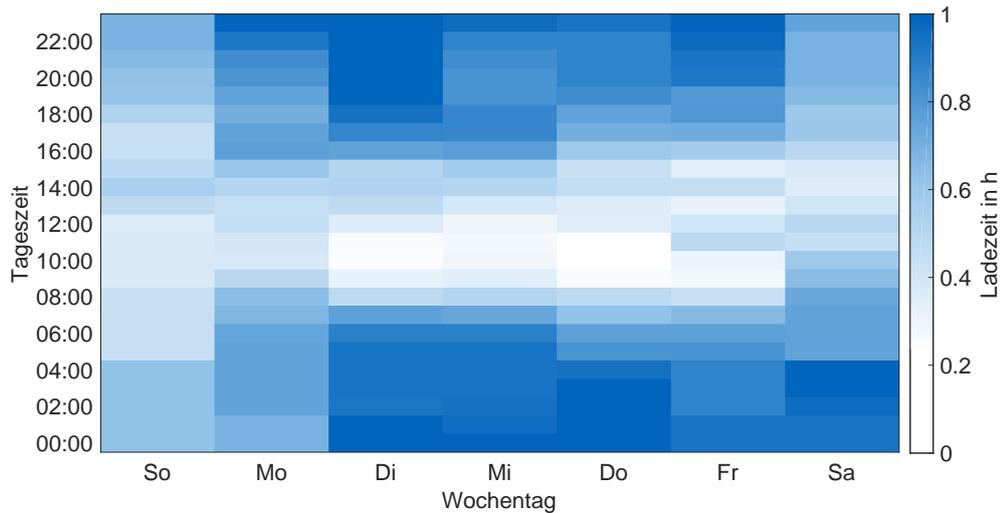


Abbildung 4.6 Mögliche mittlere Ladezeiten über alle Familien und Fahrzeugkonfigurationen gemittelt

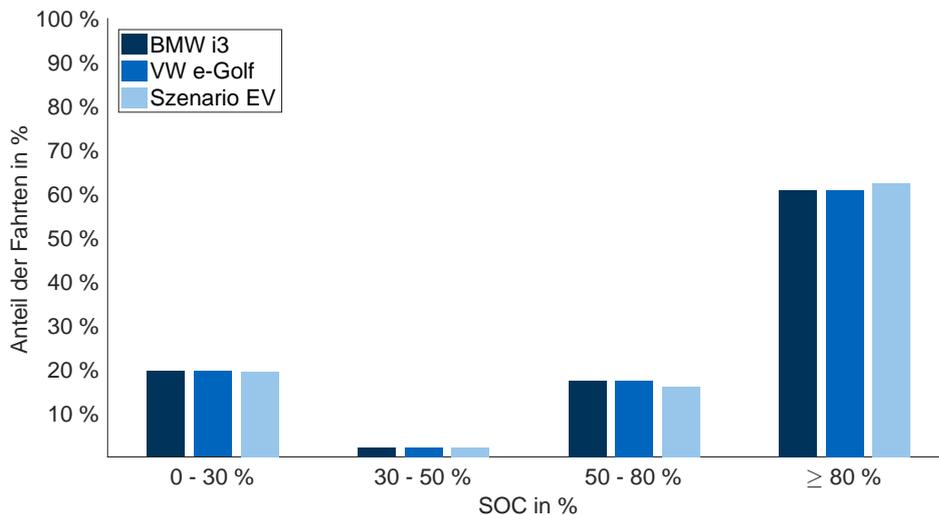


Abbildung 4.7 Verteilung der theoretischen SOC-Werte nach Fahrtende basierend auf dem Wochenmobilitätsverhalten der Familien mit einer Ladeleistung von 3,6 kW

sche Dauerlast-Grenze). Damit ist für diesen Fall keine extra Ladevorrichtung notwendig.

Basierend auf dem generischen Mobilitätsverhalten ist es häufig nicht erforderlich, dass BEV jederzeit nachzuladen. Nach mehr als 70 % der Fahrten ist der SOC für jede Fahrzeugkonfiguration noch bei mindestens 50 %. Etwa ein Fünftel der Fahrten entleeren das BEV so weit, dass eine Nachladung dringend notwendig ist bzw. dass die Fahrt theoretisch überhaupt nicht möglich gewesen wäre.

Aus diesen Randbedingungen leitet sich das weitere Vorgehen ab. Zur Emissionspotential-Abschätzung wird keine aktive Ladesteuerung verwendet, sondern eine reine nutzergesteuerte Ladung angenommen. Dadurch reduziert sich das Potential der Emissions einsparung, das auf andere Weise ausgeglichen werden kann.

4.2.3. Integration von Pufferspeichern zur Emissionseinsparung

Pufferspeicher stellen eine gute Möglichkeit dar, den Eigenverbrauch zu erhöhen, wie es auch Luthander et al. [24] zusammenfassen. Bei der Nutzung eines Pufferspeichers tritt die Problematik der nicht oder nur gering vorhandenen zeitlichen Überschneidung von PV-Energieerzeugung und Stromverbrauch in den Hintergrund.

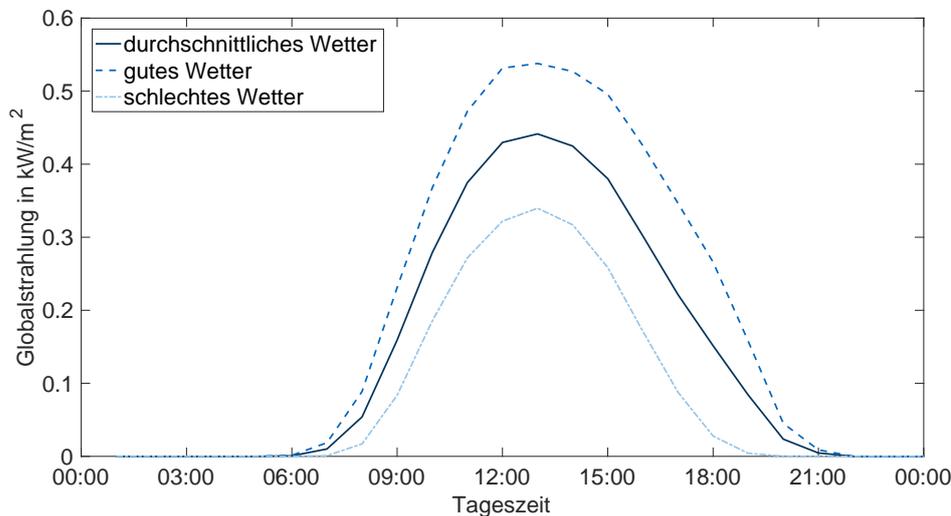


Abbildung 4.8 Darstellung der verwendeten Globalstrahlungsverläufe für die Emissionspotential-Abschätzung

Wie in Abbildung 4.8 dargestellt, werden für die Untersuchungen drei verschiedene Wetterlagen für die Energieerzeugung verwendet. Jeder Verlauf liefert von Mittag bis frühen Nachmittag die höchste Globalstrahlung und somit die höchste Leistung der PV. Um dieses Potential abzuschöpfen, kann die erzeugte erneuerbare Energie über ein Puffersystem zwischengespeichert werden.

4.3. Optimierung der Haustechnik auf verschiedene Fahrzeuganforderungen

Das CO₂-Einsparpotential hängt stark von der Größe von PV und Pufferspeicher ab. Dies wurde bereits in [185] beschrieben. Dadurch ist eine optimale Auslegung der Haustechnik auf das Mobilitätsverhalten notwendig. Für die Bewertung der optimalen Dimensionierung wird ein iteratives Vorgehen gewählt. Dazu wird ein Emissions-Kennfeld für alle Kombinationen aus PV und Pufferspeicher aufstellt, auf dessen Basis die geeignete Konfiguration bestimmt wird. Dieses Vorgehen ist grafisch in Abbildung 4.9 gezeigt.

Ausgehend vom generischen Mobilitätsverhalten des Wochenmobilitätsplans beginnt der Optimierungsablauf mit einer Analyse des Mobilitätsverhaltens. Dazu wird das BEV in einem dreiwöchigen Mobilitätsplan simuliert und die Ergebnisse der dritten Woche für die weitere Bewertung herangezogen. Durch Nutzung der dritten Woche sind Langzeiteffekte für das SOC-Verhalten möglich, weil unterschiedliche Ausgangswerte für die nächste Woche herangezogen werden. Dieses Vorgehen stellt ein realistisches SOC-

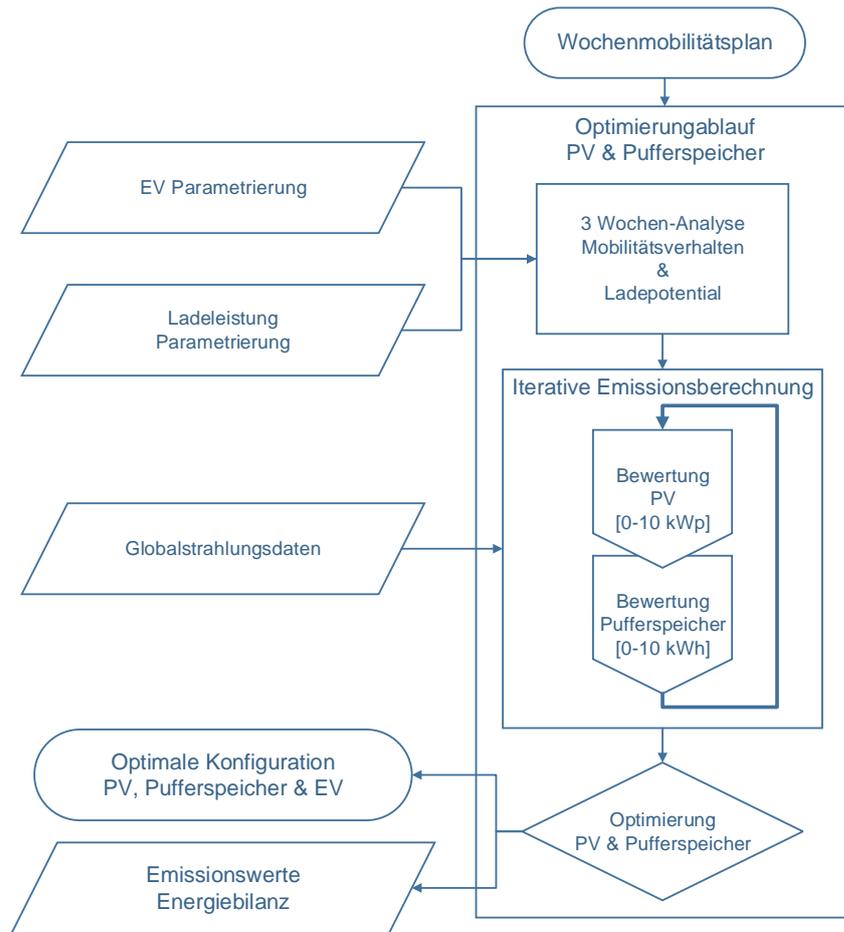


Abbildung 4.9 Graphischer Ablaufplan des Optimierungsablaufs

Verhalten sicher. Zusammen mit der Fahrzeugparametrierung und der gewählten Ladeleistung kann das jeweilige Ladepotential bestimmt werden.

Aus diesen zeitlichen Ladeenergie-Bilanzen erfolgt in Kombination mit der durch die PV generierte Energie, beschrieben durch die Globalstrahlungsverläufe, die iterative Emissionsberechnung. Dabei wird die Emissions- und Energiebilanz für jede Haustechnik-Kombination ermittelt. Wie vorangehend ausgeführt, wird das Kennfeld für PV im Bereich 0 bis 10 kW_p (dies entspricht 0 bis maximal 100 m² PV-Fläche) und für Pufferspeicher im Bereich 0 bis 10 kWh aufgespannt. Die Kombination 0 kW_p (0 m²) mit 0 kWh beschreibt dabei die Nutzung eines BEV mit Ladung über den Netzstrom.

Mit Hilfe der so generierten Emissions-Kennfelder wird dann die optimale Haustechnik-Kombination ermittelt. Für eine erweiterte und vergleichende Aussagekraft wird der Optimierungsablauf für alle Kombinationen aus Fahrzeugparametrierungen, Ladeleistungen und Wetterverhältnissen durchlaufen.

Durch die Iteration über alle Kombinationen können die optimalen Konfigurationen aus BEV und Haustechnik für die jeweilige Familie und ihre Mobilitätsanforderungen abge-

leitet werden. Des Weiteren stehen die CO₂- und Energie-Bilanzen für vergleichende Auswertungen zur Verfügung.

Die Intervallschritte des berechneten Kennfelds beschreiben die später für den Nutzer angebbare Genauigkeit für seine optimale Haustechnik. Weil die Detaillierung der Intervalle mit dem Rechenaufwand zusammenhängt, ist eine geeignete Einteilung notwendig. Dazu wurde der Rechenaufwand sowie die Aussagekraft für die weitere Verarbeitung für folgende Intervallschritte bewertet:

Tabelle 4.4 Betrachtete Intervallschritt-Kombinationen für die Berechnung eines Emissions-Kennfelds mit mittlerem Rechenaufwand

	Intervallschritte PV-Fläche in m ²	Intervallschritte Pufferspeicher in kWh	Rechenaufwand in s
Intervallkombination I	0,1	0,1	97
Intervallkombination II	1	0,5	2
Intervallkombination III	10	1	0,2

Für den Vergleich des Rechenaufwands wird der Algorithmus auf einem Windows-7-Rechner (64 Bit, i5) mit 3,6 GHz Prozessor und 64 GB Arbeitsspeicher ausgeführt. Der Prozess wird parallel auf 4 Kernen mit MATLAB R2016a berechnet.

Der Vergleich der durchschnittlichen Rechendauer pro Emissions-Kennfeld (Tabelle 4.4) zeigt, dass eine Schrittweite von 0,1 m² und 0,1 kWh nicht sinnvoll einsetzbar ist, um eine effiziente Bewertung zu ermöglichen. Unter Einbeziehung des privaten Anwendungsbereichs und den damit verbundenen Konfigurationen ist davon auszugehen, dass ein Privatanutzer nicht zwischen PV mit einem Flächenunterschied im 0,1 m²-Bereich unterscheiden wird. Bedingt durch die Bauform der Photovoltaikmodule wird die Fläche im niedrigen einstelligen Quadratmeterbereich variiert.

Die Kapazität des Pufferspeichers unterliegt während seiner Nutzungsdauer verschiedenen Prozessen, die den nutzbaren Energieinhalt leicht schwanken lassen. Daher ist eine zu granulare Teilung ebenfalls nicht zielführend. Die Intervallkombination III weist zwar eine kurze Rechenzeit auf, allerdings führen die großen Intervallschritte zu Ungenauigkeiten in der Bewertung.

Zusätzlich zu diesen Überlegungen muss beachtet werden, dass der Mobilitätswochenplan, der als zugrundeliegende Eingangsgröße verwendet wird, das Mobilitätsverhalten auf qualitative Weise beschreibt und damit eine genaue quantitative Bewertung nicht gewährleistet werden kann und auch nicht gewollt ist.

Basierend auf den Rechenzeiten sowie der kritischen Betrachtung des Anwendungsfalls wird der Optimierungsablauf mit den Intervallschritten aus Kombination II durchgeführt.

4.4. Berechnung und Validierung des Emissionspotentials

Mit dem vorangehend beschriebenen Vorgehen wird in diesem Abschnitt das Emissionspotential berechnet und validiert. Zu diesem Zweck wird näher auf den Wochenmobilitätsplan und seine Aussagekraft für das reale Mobilitätsverhalten eingegangen. Daraus wird der CO₂-Ausstoß bestimmt und das Einsparpotential abgeleitet.

4.4.1. Mobilitätsvariabilität und optimierter Wochenmobilitätsplan

Das Emissionspotential soll die tatsächlich einsparbare Menge an CO₂ für die alltägliche Mobilität beschreiben. Dies bedingt eine möglichst realistische Beschreibung des Mobilitätsbedarfs. Durch den generischen Wochenmobilitätsplan wird eine realitätsnahe qualitative Darstellung des Bewegungsverhaltens entwickelt. Bei kritischer Betrachtung des Plans verdeutlicht sich die geringe Veränderlichkeit über mehrere Wochen.

Aus diesem Grund wird die Erstellung des Wochenmobilitätsplans um eine weitere signifikante Einflussvariable erweitert. Diese beschreibt sich durch die Mobilitätsvariabilität. In Kapitel 3.4 wird bei der Darstellung der verschiedenen Zielstatistiken auf die zeitliche Variabilität bezüglich der Tageszeit und der Wochentage verwiesen. Unter Beachtung dieses veränderlichen Parameters können verschiedenen Ziele unterschiedlichen Tageszeiten und Wochentagen zugeordnet werden, abhängig von der betrachteten Woche. Dieser Einfluss zeigt sich bei Einkaufsfahrten.

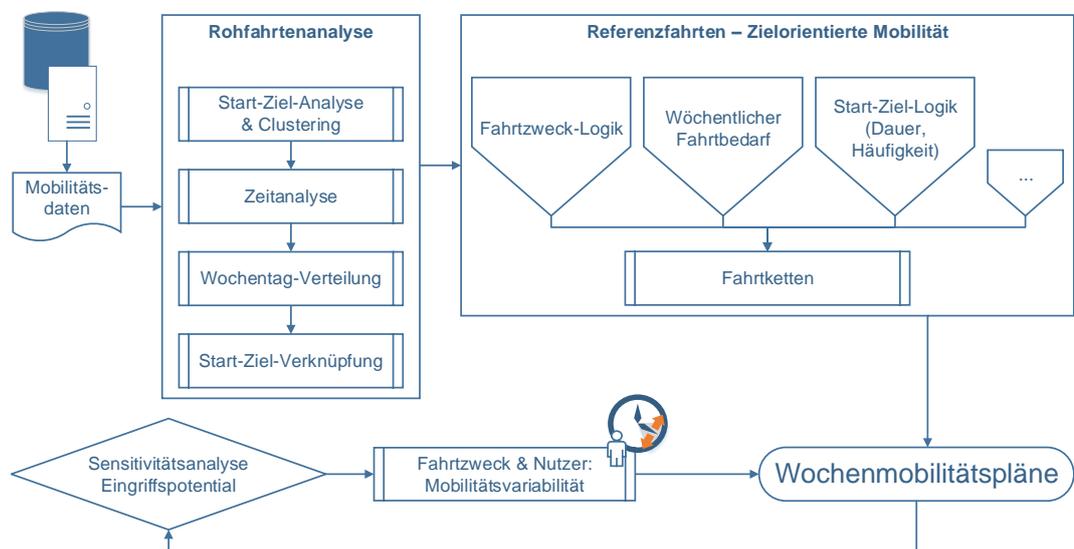


Abbildung 4.10 Graphischer Ablaufplan zur Erstellung der erweiterten Wochenmobilitätspläne

Bedingt durch den zielgerichteten Aufbau der Mobilität muss ein weiterer Einflussfaktor betrachtet werden. Die alltäglichen Mobilitätsketten weisen eine hohe Repetitivität auf, jedoch wird nicht jeden Tag die genau gleiche Fahrtenfolge zurückgelegt. Aus diesem Grund muss als Anschlussziel nicht nur das häufigste Ziel berücksichtigt werden, sondern auch alle anderen potentiellen Ziele. Daraus ergibt sich eine Wahrscheinlich-

keitsfunktion für das nächste Ziel, basierend auf den Übergangswahrscheinlichkeiten zu allen potentiellen Zielen.

Diese Betrachtungen führen zu der Notwendigkeit eines erweiterten Wochenmobilitätsplans, der eine variable Repräsentation des Mobilitätsverhaltens bietet. Das Vorgehen auf Basis des vorherigen Ablaufs ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Als Neuerung zum Basisablauf wird eine iterative Schleife hinzugefügt. Diese verwendet die statistischen Daten der Referenzfahrten-Analyse, um so eine wahrscheinlichkeitsbasierte Mobilitätsvariabilität in die Planerstellung mit einfließen zu lassen.

Da vor allem der Nutzer selbst Einfluss auf die Mobilität hat, wird eine zeitliche Verschiebung der Fahrten, die für den Nutzer akzeptabel ist, berücksichtigt. Auf diesen Aspekt wird in Kapitel 5 detailliert eingegangen.

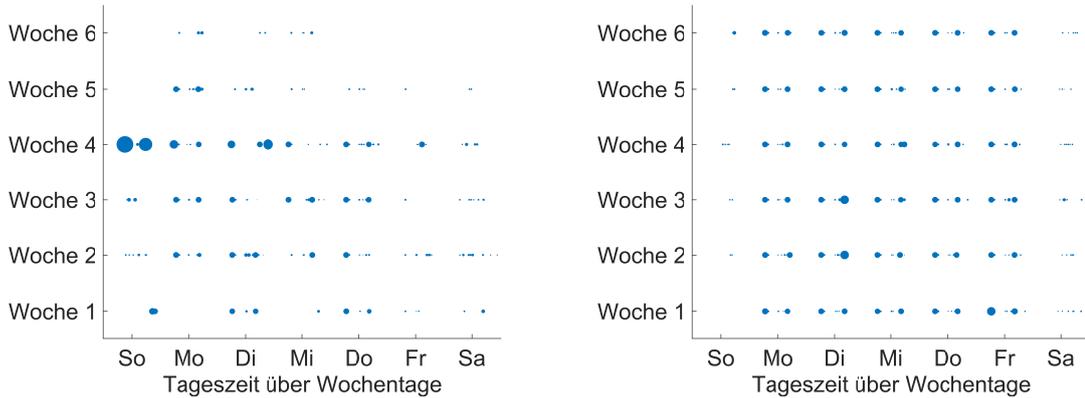
Durch die iterative Erstellung kann eine Vielzahl an verschiedenen Wochenmobilitätsplänen generiert werden, die das alltägliche Mobilitätsverhalten in einer gesamtheitlichen Art beschreiben. Weiterhin ist die zielgerichtete Mobilität Basis für die Verkettung der Fahrten. Aufgrund der Mobilitätsvariabilität können nun jedoch unterschiedliche Zeiten und Tage für einzelne Fahrten festgelegt werden. Dazu wird die Wochentagintensität verwendet. Über die Wahrscheinlichkeiten der Tage und der Wochenhäufigkeit wird eine Fahrt zufällig den entsprechenden Tagen zugeordnet.

Die nächsten Ziele werden analog bestimmt. Alle möglichen Ziele des Ausgangspunkts werden mit ihren Wahrscheinlichkeiten gewichtet. Über einen durch statistische Wahrscheinlichkeiten gesteuerten Zufallsprozess wird dann das nächste Ziel bestimmt. Die Fahrt zwischen diesen Punkten wird aus dem Pool der vorhandenen Fahrten entnommen. So kann sichergestellt werden, dass auch für gleiche Zielpunkt-Verkettungen unterschiedliche Wege Verwendung finden und so ein realistisches Verhalten abgebildet ist.

Dieses Vorgehen führt zu einer Schar an Wochenmobilitätsplänen, die in ihrer Gesamtheit mehrere generische Wochen der betrachteten Familien repräsentieren. Durch die wahrscheinlichkeitsbasierte Verkettung von Fahrten werden die Ziele entsprechend ihrer tatsächlich aufgezeichneten Häufigkeiten berücksichtigt.

Ein beispielhaftes Ergebnis der generierten Wochenmobilitätspläne ist in Abbildung 4.11 gezeigt. Dabei stellt Abbildung 4.11a einen Ausschnitt aus dem tatsächlich aufgezeichneten Wochenmuster einer Familie dar. Abbildung 4.11b veranschaulicht dazu im Vergleich einen Ausschnitt des Mobilitätsmusters, das durch die Wochenmobilitätspläne beschrieben wird. Zu erkennen ist, dass fehlende Fahrten wie gefordert aufgefüllt werden. Des Weiteren ist eine starke Gleichmäßigkeit, aufgelockert durch leichte zeitliche Varianzen und das variable Integrieren von spontanen Fahrten, über die Wochen sichtbar.

Die Fahrleistungen der einzelnen Wochenpläne zeigen eine gute Korrelation mit den Distanzen der häufigsten Fahrten (Abbildung 4.12). Analog zum Basis-Wochenmobilitätsplan wird der Zusammenhang zwischen der mittleren Laufleistung über alle generierten Wochen und der Distanz der häufigsten Fahrten untersucht und bewertet. Wie Abbil-



(a) Beispielhafter Ausschnitt des Wochenmusters aus den Rohdaten

(b) Beispielhafter Ausschnitt des Wochenmusters aus den Plandaten

Abbildung 4.11 Vergleich der Wochenmuster von Roh- und Plandaten; die jeweilige Fahrdistanz zu einer Tageszeit über Wochentage wird durch die Punktgröße beschrieben

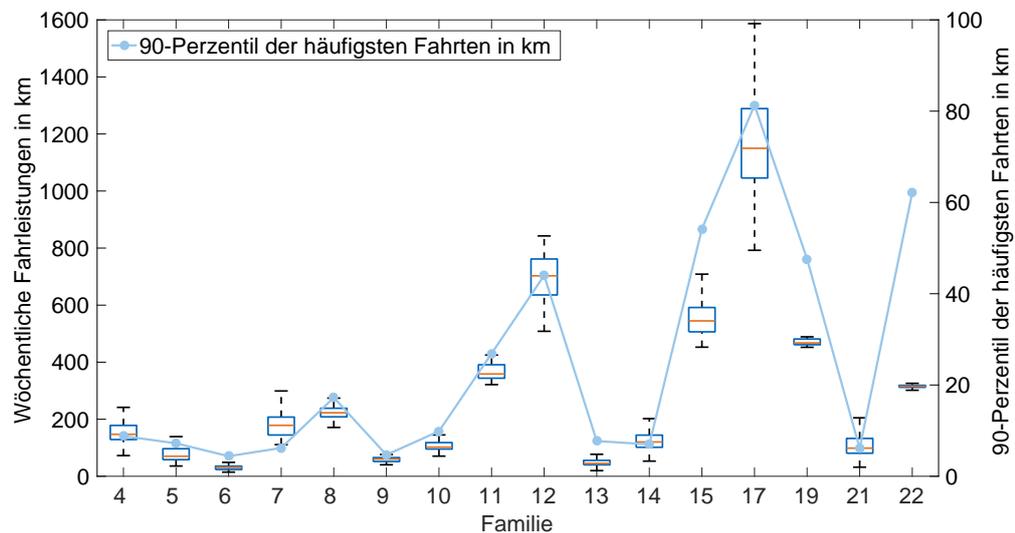


Abbildung 4.12 Wöchentliche Laufleistungen der generierten Wochenmobilitätspläne; zum Vergleich ist die Distanz der häufigsten Fahrten abgebildet

Abbildung 4.13 zeigt, liegt auch bei Betrachtung der erweiterten Wochenmobilitätspläne eine gute Korrelation mit einer Pearson-Korrelation von 89,2% vor. Als Ausreißer sind identifizierbar sind erneut Familien mit weniger aussagekräftigen Rohdaten. Werden diese aus der Betrachtung ausgenommen, ergibt sich eine Pearson-Korrelation von 99,5%.

Die resultierenden generischen Wochenmobilitätspläne können im nächsten Schritt für eine detaillierte Bewertung des CO₂-Einsparpotentials herangezogen werden.

4.4.2. Bewertung des Emissionspotentials

Nach der Erstellung der verschiedenen Wochenmobilitätspläne zur Beschreibung des alltäglichen Mobilitätsverhaltens können diese für die Emissionsberechnung verwendet werden, um so das Emissionskennfeld zu bestimmen. Dafür wird eine Herangehensweise angelehnt an die Monte-Carlo-Simulation (MC) gewählt. Um das CO₂-Einsparpoten-

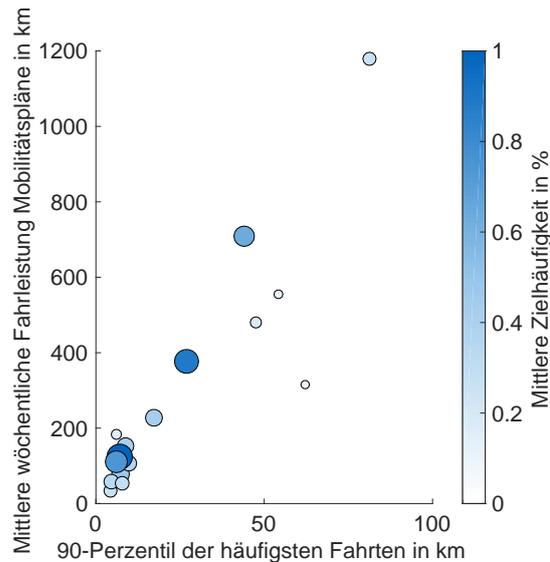


Abbildung 4.13 Korrelation zwischen mittlerer Wochenfahrleistung der Mobilitätspläne und den häufigsten Fahrdistanzen; die Größe und Farbintensität der Punkte beschreibt die absolute Häufigkeit der angefahrenen Ziele und damit die Signifikanz

tial der Familien bestimmen zu können, wird die Mobilität eines Jahres mit 52 Wochen simuliert. Ausgehend von der Ermittlung der Wochenmobilität aus Kapitel 4.3 wird dieses Verfahren 52 mal angewendet, um Vergleichswerte zu erhalten. Jede Wochensimulation geht als Ergebniswert der MC in die anschließende Bewertung ein. So kann ein Trend, basierend auf stochastischem Verhalten, identifiziert werden.

Für eine Bewertung des Emissionspotentials ist der Ausgangswert notwendig. Dieser wird im Rahmen dieser Arbeit zur besseren Vergleichbarkeit ebenfalls auf Basis der Wochenmobilitätspläne erstellt. Dazu werden die Fahrleistungen aus Abbildung 4.12 verwendet und die auftretenden Fahrten mit dem CO₂-Umrechnungsfaktor für den Treibstoff Benzin verrechnet.

Als Referenz für die wöchentlichen CO₂-Emissionen ergeben sich die mittleren Werte für die einzelnen Familien, aufgeführt in Tabelle 4.5. Diese CO₂-Emissionswerte werden zu vergleichenden Potentialanalysen verwendet.

Tabelle 4.5 Wöchentliche mittlere CO₂-Emissionen basierend auf den Wochenmobilitätsplänen der Familien

Familie	4	5	6	7	8	9	10	11
Referenz in kg CO ₂	19	9,7	4,3	22,7	28	7,3	13,2	46,4
Familie	12	13	14	15	17	19	21	22
Referenz in kg CO ₂	87,4	6,6	15,4	68,4	145,6	59,2	13,8	38,8

Für die Bewertung wird eine Potentialanalyse durchgeführt, die sich an das Pareto-Prinzip anlehnt. Das Ziel der vollständigen Emissionsreduktion, also die komplette Ladung des BEV über PV-Strom, entspricht dabei einer 100%-Lösung. Dabei ist zu beachten, dass auch bei der kompletten CO₂-Einsparung weiterhin mobilitätsbedingte Emissionen auftreten. Diese werden durch Fahrten hervorgerufen, die aufgrund der Reichweite oder

der zeitlichen Parallelität zu anderen Fahrten, mit einem ICEV zurückgelegt werden. Es entstehen auch weiterhin die durch die Verbrennung von Benzin ausgestoßenen CO₂-Emissionen.

Die vollständige Emissionseinsparung bedingt eine überproportional große Auslegung der PV- und Puffer-Installationen, was sich vor allem in den Kosten niederschlägt. Daher wird eine Grenzwert-Bewertung vorgenommen, die die optimale Konfiguration für mindestens 80 % Emissionsreduktion betrachtet, in der Annahme, dass dadurch bereits ausreichend CO₂-Emissionen eingespart werden können, ohne die Kosten für den Anwender unnötig hochzutreiben.

Durch diese Randbedingungen kann das Emissionspotential für die einzelnen Familien bestimmt und für weitergehende Untersuchungen und Korrelationsanalysen herangezogen werden.

4.5. Resultierendes Emissionspotential

Nach der Vorstellung des Vorgehens sowie der Randbedingungen für die Bewertung des Emissionspotentials wird in diesem Abschnitt vorgestellt, welche Zusammenhänge das CO₂-Einsparpotential beeinflussen. Es wird dabei auf die durch den Privatanutzer vorgegebenen und beeinflussbaren Parameter eingegangen, die durch die verbaute Haustechnik und die Mobilität beschrieben sind.

4.5.1. Emissionspotential und Haustechnik

Noch sind Pufferspeicher im Vergleich zu PV relativ selten in Privathaushalten zu finden. Aus diesem Grund wird zuerst eine Parameterstudie zu den einsparbaren CO₂-Emissionen ohne Pufferspeicher durchgeführt. Die durchschnittlichen wöchentlichen Emissionen, die sich aus der MC basierend auf den Wochenmobilitätsplänen ergeben, sind in Abbildung 4.14 dargestellt. Dabei wird das CO₂-Einsparpotential sichtbar, das aus der Substitution eines ICEV durch ein BEV resultiert. Eine komplette Reduktion ist nicht erreichbar, weil für parallel stattfindende Fahrten weiterhin ein ICEV genutzt wird. Durch die Integration einer PV für den Ladevorgang ist eine weitere Einsparung möglich. Diese fällt jedoch meist nur gering aus, weil durch die geringe Überdeckung von generierter PV-Energie und stattfindender Ladung das BEV hauptsächlich direkt aus dem Netz geladen wird. Die mittlere CO₂-Einsparung liegt dabei für den BMW i3 etwas höher als beim VW e-Golf (Abbildung 4.15). Durch die Nutzung von Netzstrom zum Laden des BEV kann im Mittel 54 % (BMW i3) bzw. 51 % (VW e-Golf) CO₂ eingespart werden. Bei zusätzlicher Nutzung der PV für die Ladung erhöht sich das Einsparpotential auf 66 % (BMW i3) bzw. 64 % (VW e-Golf).

Die Problematik der geringen Kompatibilität von PV und BEV-Ladung wird auch im Vergleich zur tatsächlich bereits verbauten PV und der optimal benötigten PV deutlich (Tabelle A.2). Bei einem relativen Vergleich (Abbildung 4.16) wird deutlich, dass PV mit etwa 40 % größerer Fläche als bereits verbaut für einen optimalen Einsatz sinnvoll sind. Nur für besonders große bzw. kleine vorhandene Installationen weicht dieser Wert ab.

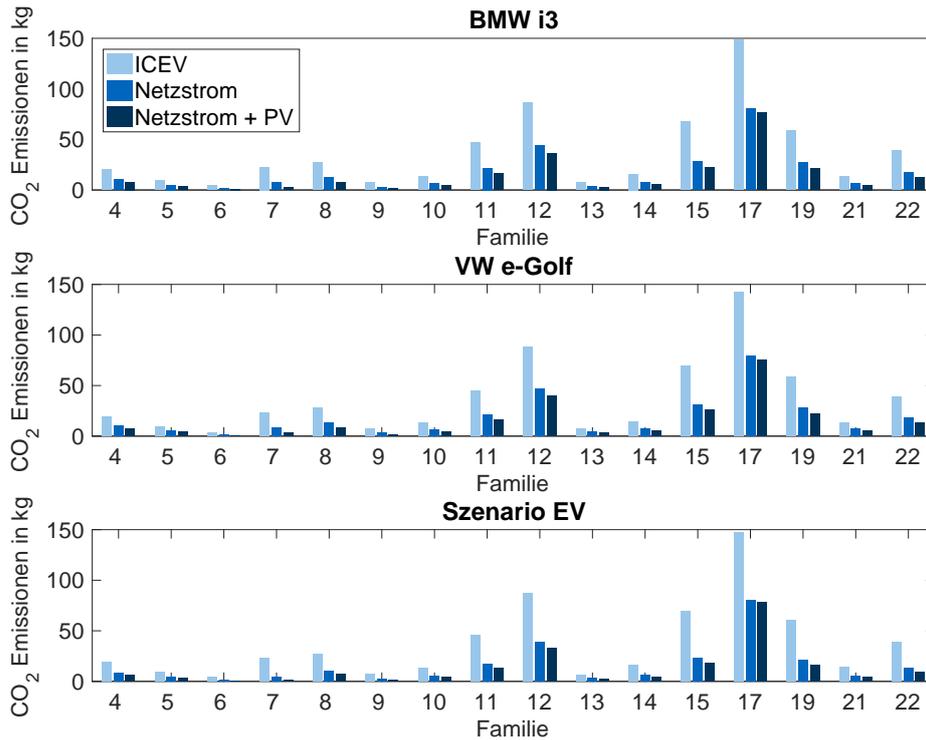


Abbildung 4.14 Durchschnittliche wöchentliche Emissionen durch Nutzung eines BEV mit Netzstrom und PV; ohne Pufferspeicher; Ladeleistung 3,6 kW

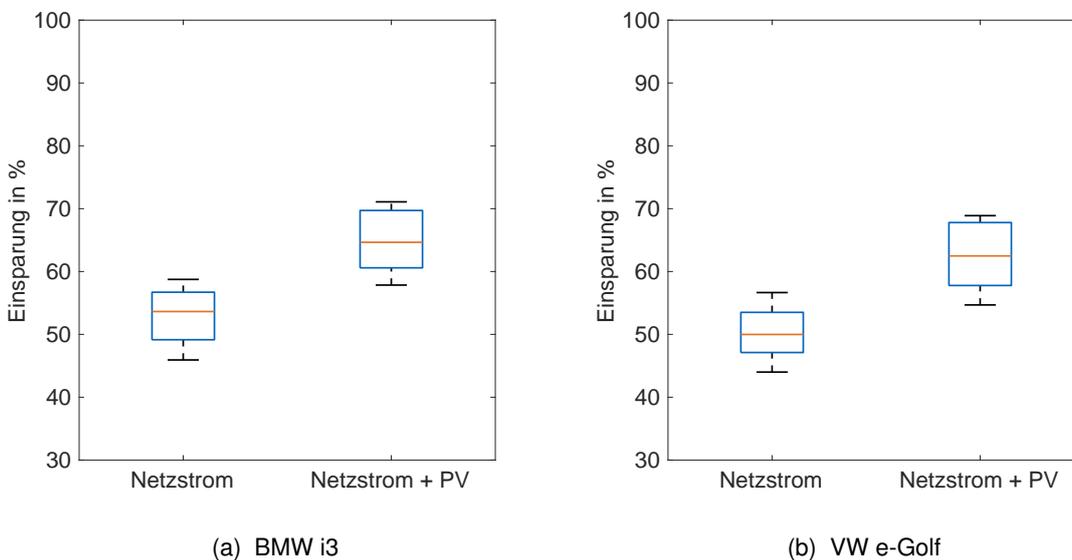


Abbildung 4.15 Prozentuales Einsparpotential durch Nutzung eines BEV mit Netzstrom und PV; ohne Pufferspeicher; Ladeleistung 3,6 kW

Wie zu sehen, wird meist eine deutlich größere PV benötigt, um noch eine sinnvolle CO₂-Einsparung bewirken zu können. Dies ist begründet in der Ladecharakteristik des BEV. Wenn es zu einer Zeit, in der von der PV Energie generiert wird, geladen werden soll, muss eine hohe Leistung direkt von der PV bereitgestellt werden.

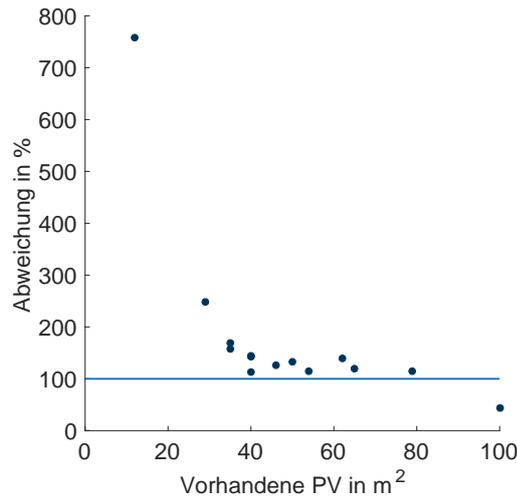


Abbildung 4.16 Prozentuale Abweichung der optimal benötigten PV im Vergleich zur bereits vorhandenen; Ladeleistung 3,6 kW

Der gleiche Effekt ist bei der Betrachtung der verschiedenen Ladeleistungen zu erkennen (Abbildung 4.17a). Das Einsparpotential sinkt, je höher die Ladeleistung ist, die von der PV zur Verfügung gestellt werden muss. Das beste Ergebnis kann mit einer haushaltsüblichen Schuko-Steckdose erreicht werden.

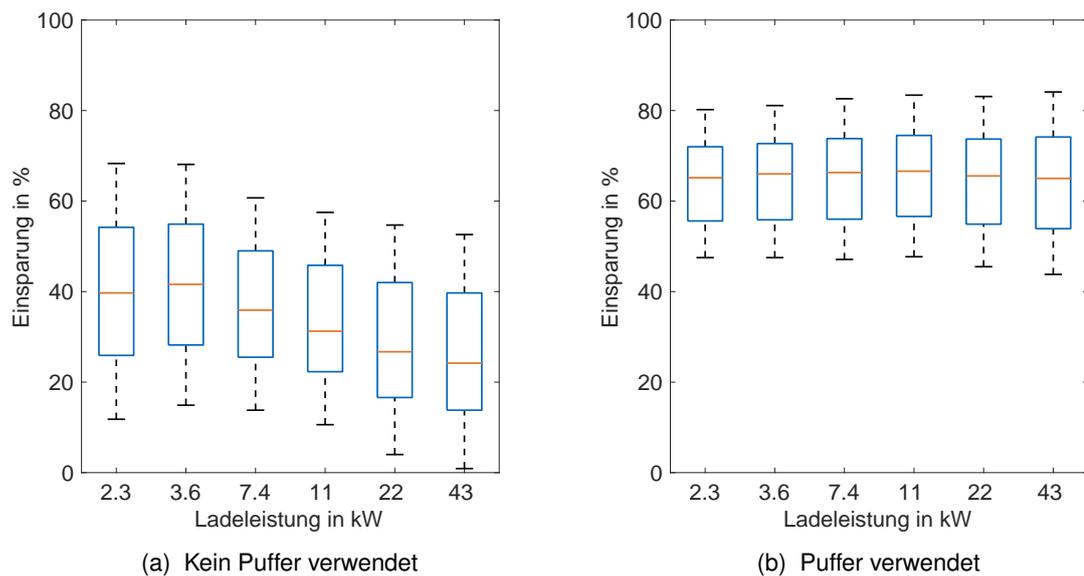
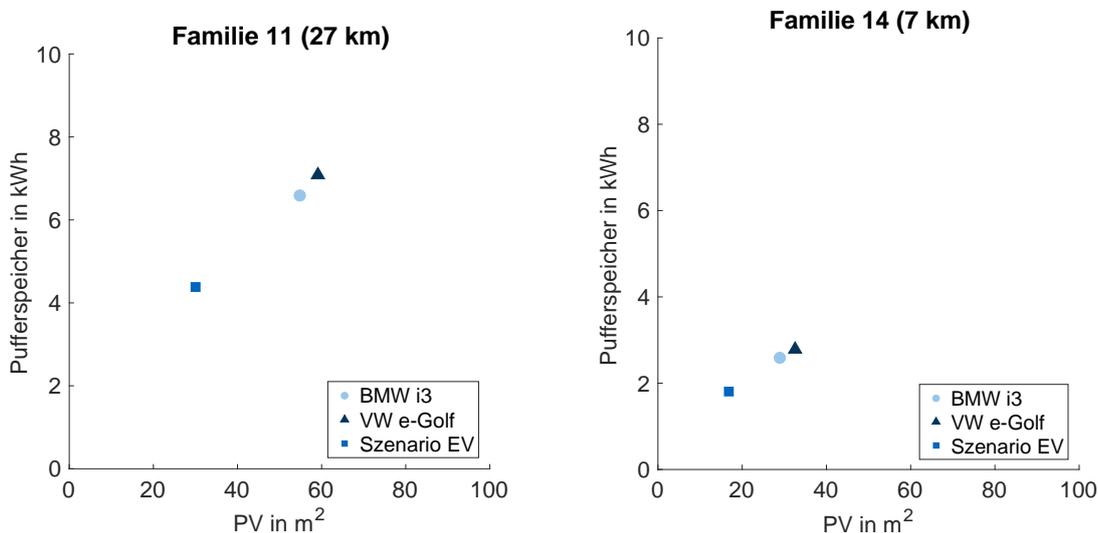


Abbildung 4.17 Einsparpotential abhängig von der Ladeleistung

Für die anschließende optimale Auslegung der Haustechnik auf das Mobilitätsverhalten der einzelnen Familien werden mittels der MC alle optimalen Konfigurationen von PV und Puffer für die jeweiligen wöchentlichen Mobilitätsverhalten bestimmt. Sobald dieser optimale Puffer mit in das System gebracht wird, steigt das mittlere Einsparpotential um mindestens 25 % an (Abbildung 4.17b). Der signifikante Unterschied zwischen den Ladeleistungen ist nicht mehr vorhanden.

Es werden für die weiteren Analysen nur noch die Ladeleistungen bis 11 kW betrachtet, weil höhere Ladeleistungen mit erheblichem finanziellen und bautechnischen Mehraufwand für Privatanutzer verbunden sind. Außerdem fällt der Einspargrad mit Ladeleistungen über 11 kW ab, weil die Leistung vermehrt vom Netz geliefert werden muss.

Bei der Analyse können zwei verschiedene Typen des optimalen Kennfeld-Schwerpunkts festgestellt werden. Familien mit überwiegend langen Fahrten bilden für die Betrachtung



(a) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen basierend auf der MC der Wochenmobilitätspläne für Familie 11, die eine häufigste Fahrdistanz von 27 km aufweist

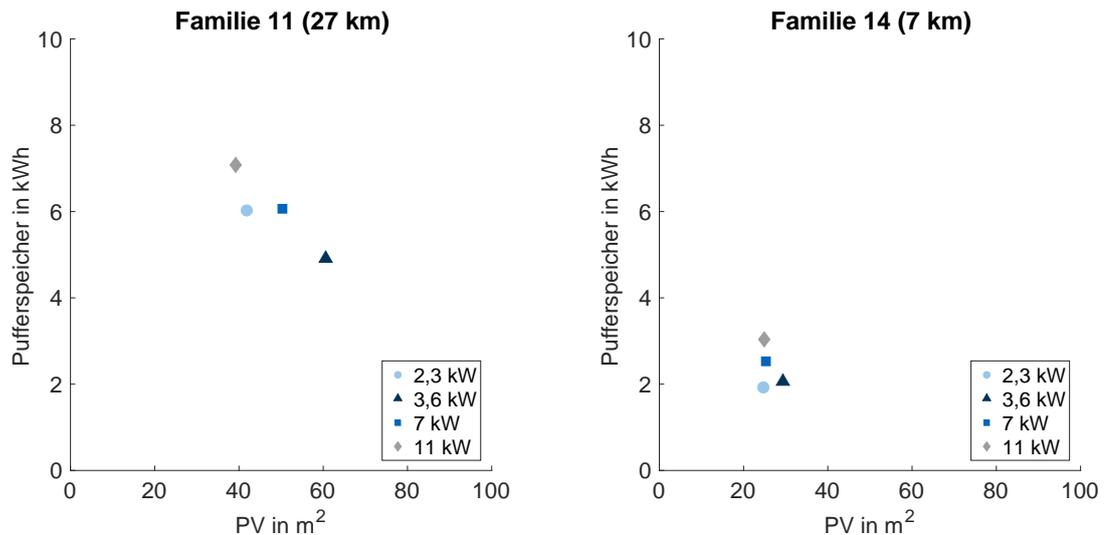
(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen basierend auf der MC der Wochenmobilitätspläne für Familie 14, die eine häufigste Fahrdistanz von 7 km aufweist

Abbildung 4.18 Beispielhafte Verteilungen der optimalen Konfigurationen basierend auf der MC der Wochenmobilitätspläne unter Einbeziehung der Ladeleistungen bis 11 kW

verschiedener Fahrzeuge Konfigurations-„Bänder“ aus (Anhang A.5). Diese beschreiben einen indirekten Zusammenhang von PV-Dimensionierung und Pufferspeicher-Kapazität. Beim Vergleich der verschiedenen BEV ist für Fahrzeuge mit geringem Verbrauch und kleiner Batteriekapazität insgesamt eine kleinere Haustechnik-Installation notwendig (Abbildung 4.18a), wobei diese ebenfalls weniger streuen.

Im Gegensatz dazu weisen Familien, die überwiegend kurze Fahrten aufweisen, ein weiter gestreutes Konfigurationsfeld auf. Dieses bewegt sich in kleineren Dimensionen (Abbildung 4.18b), weil bei einer Ladung nur wenig nachgeladen werden muss. Die Konfigurationen streuen erneut weniger, je kleiner und sparsamer das verwendete BEV ist.

Ein weiterer Faktor der Haustechnik ist die genutzte Ladeleistung. Der Einfluss der verschiedenen Ladeleistungen bis 11 kW im Konfigurationsfeld ist in Abbildung 4.19 vergleichend dargestellt. Dazu wird der Schwerpunkt der Konfigurations-Felder für die einzelnen Ladeleistungen bestimmt. Zu erkennen ist die Tendenz, dass höhere Ladeleistungen eine höhere Kapazität des Pufferspeichers erforderlich machen. Als Ausnahme ist die Ladeleistung von 2,3 kW zu nennen, wenn das Mobilitätsverhalten durch viele längere Strecken gekennzeichnet ist (Abbildung 4.19a). Durch die vergleichsweise lange Ladedauer mit dieser Leistung muss der Pufferspeicher mehr zwischenspeichern,



(a) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen basierend auf der MC der Wochenmobilitätspläne für Familie 11 (lange Strecken)

(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen basierend auf der MC der Wochenmobilitätspläne für Familie 14 (kurze Strecken)

Abbildung 4.19 Beispielhafte Verteilungen der optimalen Konfigurationen basierend auf der MC der Wochenmobilitätspläne abhängig von der genutzten Ladeleistung

um in Zeiten ohne PV-Energie das Fahrzeug ausreichend nachladen zu können. Mit einer Ladeleistung von 3,6 kW können im Mittel mit der geringsten Haustechnik optimale Einsparungen erzielt werden. Bei einem stark streuenden Mobilitätsverhalten mit vielen kurzen Strecken ist der Einfluss der verwendeten Ladeleistung gering und zeichnet sich nur in der benötigten Pufferspeicher-Kapazität aus (Abbildung 4.19b).

4.5.2. Szenario-Analyse

Für eine vergleichende Analyse wird eine Szenariobewertung für alle Familien basierend auf der Nutzung von Pufferspeichern mit einer Kapazität von 2, 5, 8 und 10 kWh durchgeführt. Die Bewertung wird für die bereits vorhandenen PV und für die optimal benötigte erstellt. Dadurch kann der Einfluss von verschiedenen großen Pufferspeicher-Systemen bestimmt werden, um so eine Einschätzung bezüglich sinnvoller Kapazitäten geben zu können.

Wie gezeigt wurde, kann bereits allein durch die Nutzung eines BEV eine deutliche Reduktion der mobilitätsbedingten CO₂-Emissionen erreicht werden. Diese kann durch die Einbringung einer PV zusätzlich gesteigert werden. Für den Vergleich der Auswirkungen eines Pufferspeichers werden folgende Familien herangezogen:

Familie 11: hohes Mobilitätsaufkommen und lange Kernfahrten, 46,4 kg CO₂ pro Woche im Durchschnitt bei Nutzung eines ICEV

Familie 14: niedriges Mobilitätsaufkommen und kurze Kernfahrten, 15,4 kg CO₂ pro Woche im Durchschnitt bei Nutzung eines ICEV

Mittels einer erneuten MC werden die aus den vorgegebenen PV-Pufferspeicher-Kombinationen die resultierenden CO₂-Emissionen bewertet.

Für Familien mit hohem Mobilitätsaufkommen und längeren Fahrten liegt ein signifikanter Einfluss abhängig von der Kapazität des verwendeten Pufferspeichers vor (Abbildung 4.20). Schon das Einbringen eines geringen Pufferspeichers von 2 kWh bewirkt

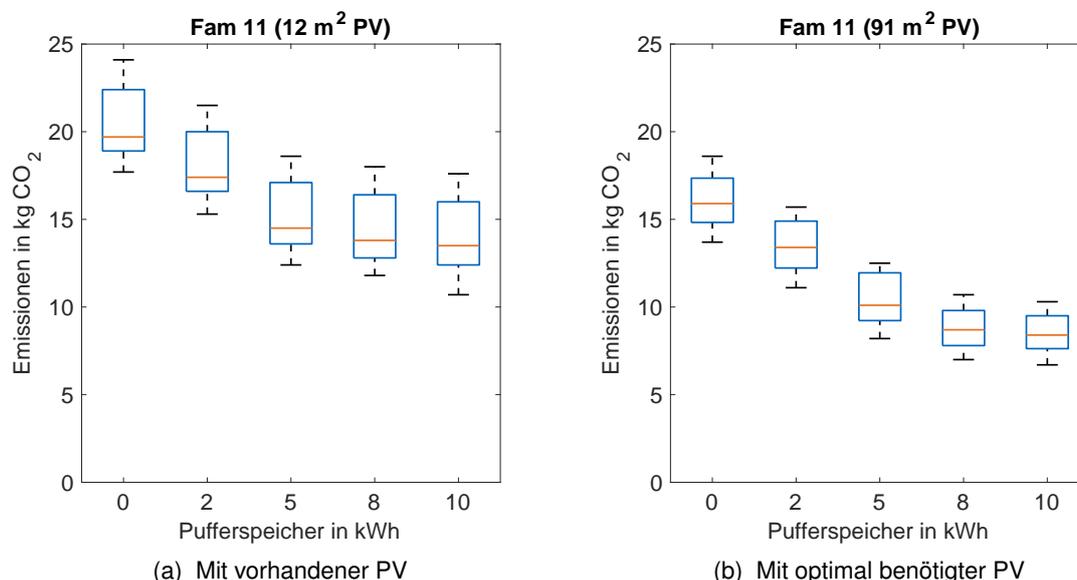


Abbildung 4.20 Emissionspotential einer Familie mit hohem Mobilitätsaufkommen und langen Kernfahrten; Fahrzeug VW e-Golf; Ladeleistung 3,6 kW

eine effektive CO₂-Einsparung. Es ist eine deutliche Wirkung der Fläche der PV zu verzeichnen, was durch die vergleichende Bewertung der optimal benötigten PV gezeigt ist (Abbildung 4.20b). Vor allem bei einem hohem Verkehrsaufkommen wird eine große PV benötigt, um das BEV direkt zu laden oder ausreichend Energie für den Pufferspeicher zur Verfügung zu stellen. Mit zunehmender Pufferspeicher-Kapazität nimmt die Rate der einsparbaren CO₂-Emissionen ab. Die Emissionen nähern sich einem Grenzwert an, der durch Fahrten beschrieben wird, die auch mit größerer Haustechnik nicht von den betrachteten BEV realisiert werden können.

Ein ähnliches Ergebnis liefert die Betrachtung des Emissionspotentials abhängig von der Pufferspeicher-Kapazität für Familien mit niedrigem Mobilitätsaufkommen und kurzen Fahrten (Abbildung 4.21). Bedingt durch die absolut gesehen niedrigere Energiemenge, die durch das Fahrzeug aufgenommen werden muss, fällt der Einfluss der optimalen PV-Fläche weniger signifikant bis überhaupt nicht ins Gewicht. Das Grenz-Reduktionspotential ist bereits mit kleineren Pufferspeicher-Kapazitäten erreicht. Insgesamt hängt das Reduktionspotential für Familien mit geringem Mobilitätsaufkommen stärker vom Vorhandensein des Pufferspeichers ab, als von der Größe der PV. Die benötigte Energie für die Ladung des BEV ist so gering, dass diese mit einer kleinen PV abgedeckt werden kann.

Bei der familienspezifischen Betrachtung des Einflusses der Ladeleistung (Abbildung 4.22) ist ein leichter Einfluss bei Familien mit hohem Mobilitätsaufkommen zu erkennen. Familien mit geringem Mobilitätsbedarf weisen keinen signifikanten Einfluss auf. So bestätigt die vorhergehende Analyse, dass bei Nutzung eines Pufferspeicher-Systems zur Ladung

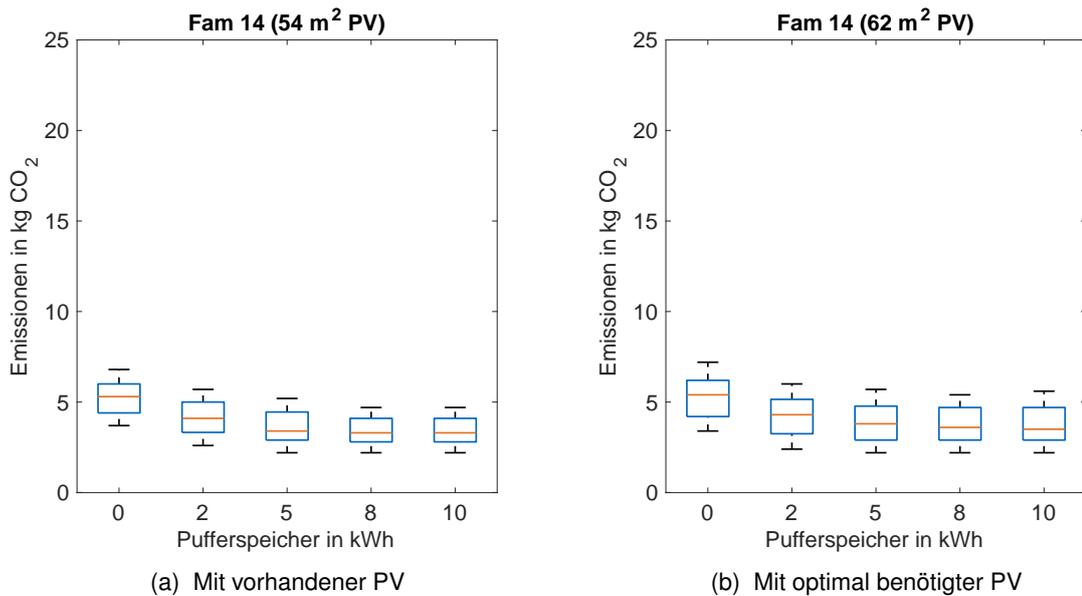


Abbildung 4.21 Emissionspotential einer Familie mit niedrigem Mobilitätsaufkommen und kurzen Kernfahrten; Fahrzeug VW e-Golf; Ladeleistung 3,6 kW

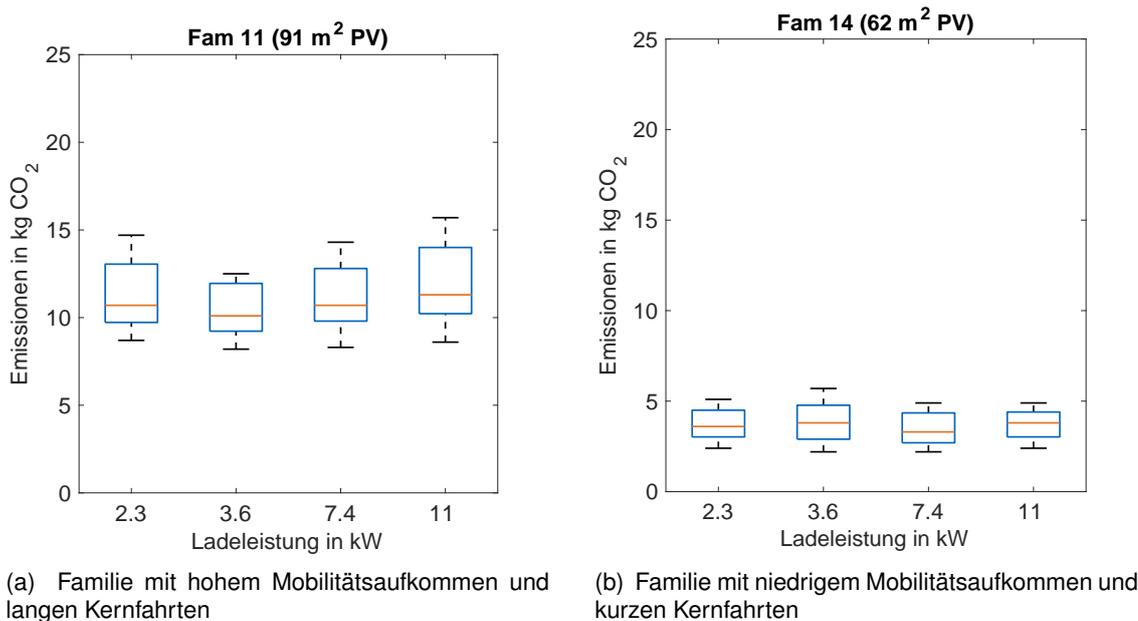


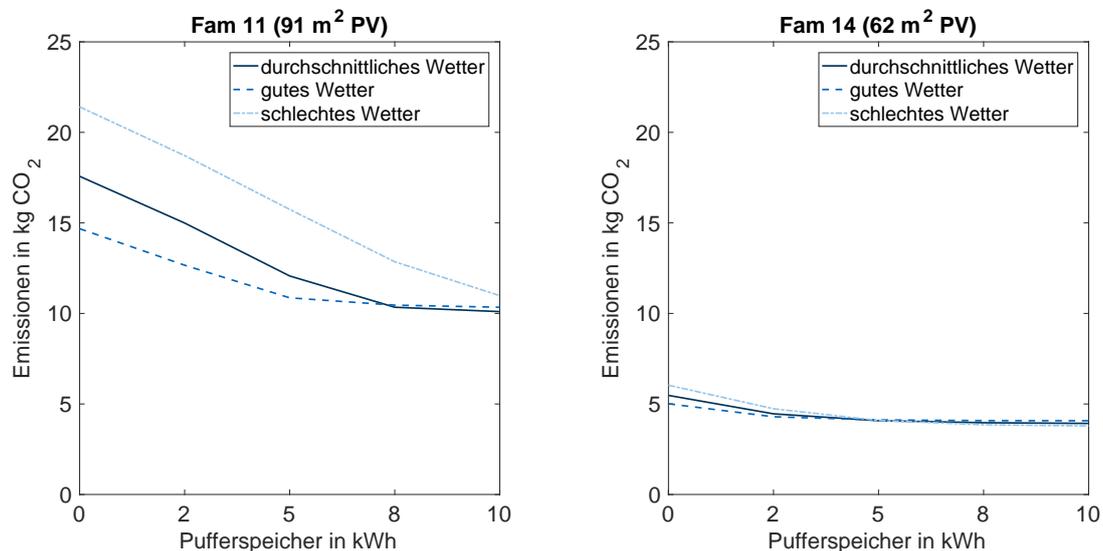
Abbildung 4.22 Einfluss der Ladeleistung auf das Emissionspotential bei einem verwendeten Pufferspeicher von 5 kWh; Fahrzeug VW e-Golf

des BEV die verwendete Ladeleistung keinen signifikanten Einfluss auf das mögliche Reduktionspotential hat.

Ein weiterer Einflussfaktor in der Bewertung des Emissionspotentials ist die Wetterabhängigkeit. Diese wird durch die Globalstrahlung beschrieben und resultiert in der Energiemenge, die durch die PV über den Tag zur Verfügung gestellt wird. Diese Energie kann dann genutzt werden, um entweder direkt das BEV oder zwischenzeitlich den Pufferspeicher aufzuladen.

Bedingt durch den Globalstrahlungsverlauf ist die absolut zur Verfügung stehende Energie bei schlechtem Wetter geringer. Dies wirkt sich in höheren absoluten Emissionswerten aus (Abbildung 4.23a), weil mehr Energie über das Netz bezogen werden muss.

Mit steigender Pufferspeicher-Kapazität wird dieser Einfluss geringer. Vor allem bei nied-



(a) Familie mit hohem Mobilitätsaufkommen und langen Kernfahrten

(b) Familie mit niedrigem Mobilitätsaufkommen und kurzen Kernfahrten

Abbildung 4.23 Einfluss des Wetters auf das Emissionspotential bei einem verwendeten Pufferspeicher von 5 kWh; Fahrzeug VW e-Golf, Ladeleistung 3,6 kW

rigem Mobilitätsaufkommen spielt der Wettereinfluss eine untergeordnete Rolle, sobald ein Pufferspeicher zur Verfügung steht (Abbildung 4.23b). Durch eine optimal große PV kann der Pufferspeicher immer ausreichend nachgeladen werden, um das BEV wieder aufzuladen.

Für eine abschließende Evaluation des Emissionspotentials durch die Nutzung von Pufferspeichern zum Laden des BEV wird die prozentuale Einsparung für alle Familien bestimmt. Für den ersten Schritt werden die MC-Ergebnisse, berechnet mit der optimal benötigten PV, auf die jeweiligen CO₂-Emissionswerte ohne Puffer normiert. Anschließend werden die möglichen prozentualen Einsparungen für die verschiedenen Pufferspeicher-Kapazitäten ermittelt. Dadurch kann der allgemeine Einfluss der Kapazität des Pufferspeichers analysiert werden. Wie in Abbildung 4.24 vergleichend für die Fahrzeuge VW e-Golf und Szenario BEV dargestellt, nimmt das Einsparpotential mit steigender Pufferspeicher-Kapazität zu. Mit steigender Pufferspeicher-Kapazität konvergiert das fahrzeugspezifische Einsparpotential, bis die maximale Einsparung erreicht ist.

Bedingt durch den geringeren Verbrauch, weist das Szenario BEV absolut betrachtet geringere Emissionen auf. Dadurch fallen die prozentualen Einsparungen allein durch den Pufferspeicher ebenfalls kleiner aus als bei einem Fahrzeug, das einen höheren Verbrauch hat und damit ein höheres Reduktionspotential. Die Konvergenz an die maximal mögliche prozentuale CO₂-Einsparung ist bei dem effizienten BEV stärker ausgeprägt.

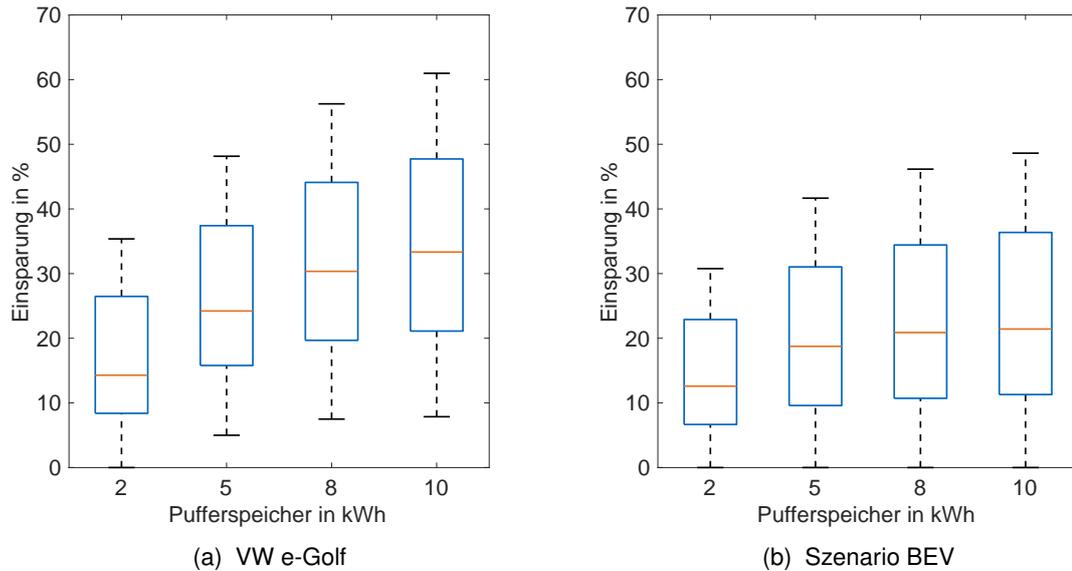


Abbildung 4.24 Prozentuales Emissionspotential abhängig vom verwendeten Pufferspeicher; optimale PV, Ladeleistung 3,6 kW

Dies ist ebenfalls in dem insgesamt geringeren Energiebedarf des effizienteren BEV begründet.

Im zweiten Schritt wird die Emissionseinsparung auf den CO₂-Ausgangswert normiert, der aus der Wochenmobilität und der Nutzung eines ICEV resultiert. Bei dieser Betrachtung werden alle Fahrten, die sich durch die Wochenmobilitätspläne ergeben, mit dem Emissionsfaktor für das ICEV verrechnet. Dazu wird erneut die für jede Familie im Mittel optimale PV-Fläche verwendet und eine Ladeleistung von 3,6 kW angesetzt. Wie bereits in Abbildung 4.14 zu erkennen, ist durch die Nutzung eines energieeffizienten BEV, in diesem Fall das Szenario BEV, insgesamt ein höheres Reduktionspotential gegenüber der Nutzung eines ICEV zu erreichen. Dieses Ergebnis zeigt sich auch in der Evaluation des gesamten Einsparpotentials, das in Abbildung 4.25 vergleichend für die Fahrzeuge VW e-Golf und Szenario BEV dargestellt ist. Ausgehend von der möglichen CO₂-Einsparung durch Nutzung des BEV mit Ladung über die PV und Ausgleich über den Netzstrom ist ein steigendes Emissionspotential mit zunehmender Kapazität des verwendeten Pufferspeichers gegeben. Durch den konvergierenden Einfluss des Pufferspeichers auf das CO₂-Einsparpotential ist auch bei der absoluten Betrachtung eine obere Grenze für die Reduktion gegeben. Diese wird durch die verbrauchsbedingten Unterschiede für energieeffiziente BEV schneller erreicht, wodurch ein kleineres Pufferspeicher-System bereits sichtbare CO₂-Einsparungen bewirkt.

Zur weiteren Vergleichsmöglichkeit wird das mittlere Einsparpotential gezeigt, das erreicht werden kann, wenn das verwendete BEV nicht über eigenerzeugte erneuerbare Energie geladen wird, sondern die Ladeenergie vollständig aus dem Netz bezogen wird. Dafür wird erneut der Emissionsfaktor des Stromnetzes verrechnet. Erneut zeigt sich in dieser Bewertung ein signifikanter Einfluss auf die reduzierbare CO₂-Menge, wenn eine eigene Haustechnik-Installation zur Ladung verwendet wird.

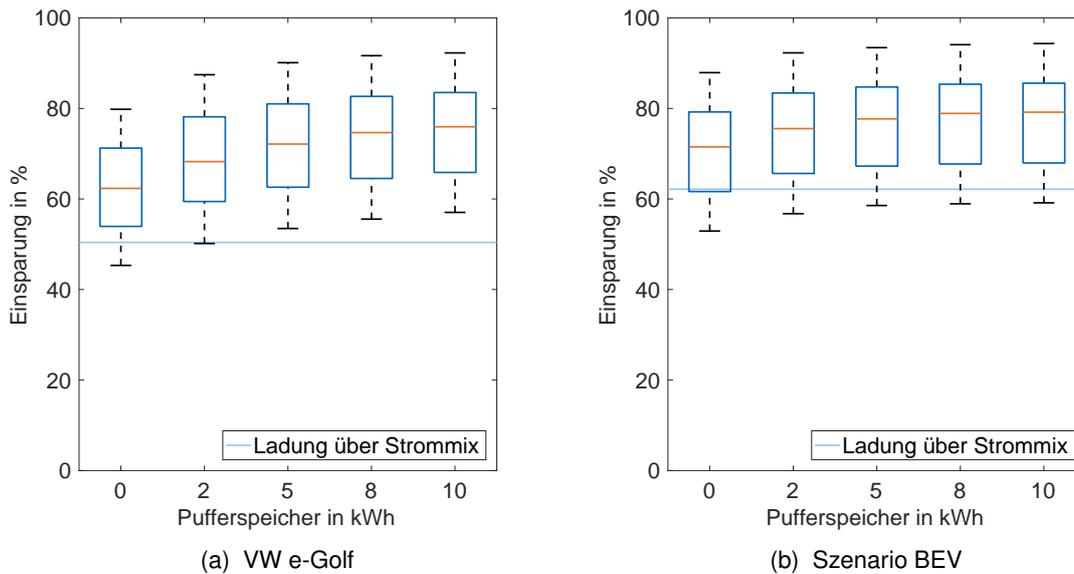


Abbildung 4.25 Prozentuales Emissionspotential abhängig vom verwendeten Pufferspeicher bezogen auf die Verwendung eines ICEV für die alltägliche Mobilität; optimale PV, Ladeleistung 3,6 kW

Das mittlere Einsparpotential unter Berücksichtigung der Kombination aus optimaler PV mit den verschiedenen Pufferspeicher-Kapazitäten zeigt keine Abhängigkeit von der Fahrzeugkonfiguration (Tabelle 4.6). Alle Fahrzeuge erreichen CO₂-Einsparungen von deut-

Tabelle 4.6 Mittlere CO₂-Einsparpotentiale abhängig von der verwendeten Pufferspeicher-Kapazität für die betrachteten Fahrzeug-Konfigurationen

	Pufferspeicher-Kapazität				
	0 kWh	2 kWh	5 kWh	8 kWh	10 kWh
BMW i3	66 %	71 %	73 %	75 %	76 %
VW e-Golf	63 %	69 %	72 %	74 %	75 %
Szenario BEV	70 %	74 %	75 %	76 %	76 %

lich über 70% im Vergleich zu den Emissionen, die durch die alltägliche Mobilität mit einem ICEV erzeugt werden, wenn ein Pufferspeicher-System von mindestens 5 kWh verwendet wird.

4.6. Diskussion des Emissionspotentials

Die Analyse der resultierenden Emissionen unter Berücksichtigung von eigenerzeugter erneuerbarer Energie zeigt ein effektives Potential zur Senkung der CO₂-Menge auf. Trotzdem sind teils große Schwankungen der einsparbaren CO₂-Emissionen vorhanden. Diese erklären sich aus dem individuell variierendem Mobilitätsverhalten, das auf den Wochenmobilitätsplänen basiert.

Durch spontane Routenwahl und Fahrtantrittszeiten verschieben sich die möglichen Energieflüsse. In der Folge können einzelne Fahrten nicht mehr von dem BEV zurückgelegt werden. Durch das schwankende Mobilitätsaufkommen über die verschiedenen Wochen

ist eine konkrete Dimensionierungsangabe für die optimale PV und den optimalen Pufferspeicher nicht möglich. Es kann nur eine Größenordnung gegeben werden, die in einigen Wochen ausreicht und in anderen Wochen über das Stromnetz unterstützt werden muss. Als Alternative kann über die Szenariobewertung das theoretisch mögliche Potential zur Emissionsreduktion vorgeschlagen werden, wenn der Nutzer seine Haustechnik-Installation in einer bestimmten Größenordnung wählt und einsetzt.

Bis zu 70 % der reduzierbaren Emissionen werden allein durch die Nutzung eines BEV mit einer im Mittel optimal großen PV erreicht. Das sind nochmals mindestens 10 % mehr als durch alleinigen Umstieg auf ein BEV mit Netzstrom-Ladung erzielt werden kann. Dabei spielt die Annahme, dass das BEV keine direkten Emissionen ausstößt, eine entscheidende Rolle. Emissionen, die bei der Herstellung der Fahrzeuge entstehen, werden in dieser Arbeit vernachlässigt.

Allgemein zu erkennen ist, dass bis zu einer Pufferspeicher-Kapazität von 8 kWh das CO₂-Einsparpotential gesteigert werden kann. Für größere Pufferspeicher ist kein oder ein nur mehr geringes weiteres Einsparpotential vorhanden. Dies ist zum einen den Fahrten zuzuschreiben, die auch weiterhin mit einem ICEV zurückgelegt werden. Zum anderen bewirken längere Fahrten, dass der SOC so weit herabgesetzt wird, dass das Fahrzeug nicht mehr komplett über den Pufferspeicher geladen werden kann. In diesem Fall muss die restliche Energie über den Netzstrom bezogen werden. Dadurch ergibt sich die Emissionsmenge, die auch mit signifikant vergrößerter Haustechnik nicht mehr effizient reduziert werden kann. Diese Restmenge kann nur von BEV mit deutlich höherer elektrischer Reichweite kombiniert mit dem vollständigen Verzicht auf ICEV gesenkt oder komplett beseitigt werden.

Um die erreichbare CO₂-Reduktion in einen wirtschaftlichen Kontext zu stellen, werden die Emissionspotentiale mit den Anschaffungskosten in Zusammenhang gesetzt. Für eine nutzerspezifisch subjektive Bewertung der notwendigen Haustechnik-Installationen wird eine weitere Szenario-Analyse vorgenommen. Wie bereits vorangehend beschrieben, sind die Preise für PV und Pufferspeicher einem starken Wandel unterzogen und werden in den kommenden Jahren noch weiter abnehmen. Dafür werden folgende Preisentwicklungen angenommen:

Tabelle 4.7 PV-Preise für Szenario-Bewertung (Preise für Komplettlösungen; mit $10 \frac{\text{m}^2}{\text{kW}_p}$)

Szenario	Preis in $\frac{\text{€}}{\text{kW}_p}$	Preis in $\frac{\text{€}}{\text{m}^2}$
(1)	1300	130
(2)	750	75
(3)	500	50

Die Preise gelten für die Komplettlösung, die der Privatanutzer erwirbt. Die Szenarien (1) und (A) beschreiben den Preis für aktuell auf dem Markt verfügbare Anlagen. Für die Szenarien (2) und (3) sowie (B) und (C) werden die Preisentwicklungen für die kommenden Jahre angenommen.

Tabelle 4.8 Pufferspeicher-Preise für Szenario-Bewertung (Preise für Komplettlösungen)

Szenario	Preis in $\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$
(A)	1200
(B)	500
(C)	300

Zu beachten ist hierbei, dass vor allem bei der Betrachtung der Preisentwicklung für das Pufferspeicher-System nicht mit der gleichen Entwicklung wie für Batteriezellen für die Automobilindustrie gerechnet werden kann. Dies liegt unter anderem an dem Umstand, dass in dieser Betrachtung das Komplettsystem zugrunde gelegt wird und somit immer ein Anteil für zusätzliche Hardware und Einbau berechnet werden muss. Zusätzlich können Automobilhersteller direkt beim Batteriehersteller beziehen, wohingegen der Privatnutzer ein Endprodukt, das dadurch teurer ist, erwirbt. Trotzdem sinken auch die Preise für Pufferspeicher-Systeme, wenn der Marktpreis insgesamt abnimmt.

Analog zur Emissionsbewertung werden die Ergebnisse der MC einer wirtschaftlichen Bewertung unterzogen. Für alle optimalen Konfigurationen von PV und Pufferspeicher, die sich aus den Wochenmobilitätsplänen ergeben, werden die Kosten für die Preisszenarien ermittelt.

Für Familien mit hohem Mobilitätsaufkommen (Abbildung 4.26) ist eine Neuanschaffung von PV und Pufferspeicher für ein Fahrzeug wie den VW e-Golf derzeit, beschrieben durch Szenario (1A,) keine attraktive wirtschaftliche Option. Die Anschaffungskosten be-

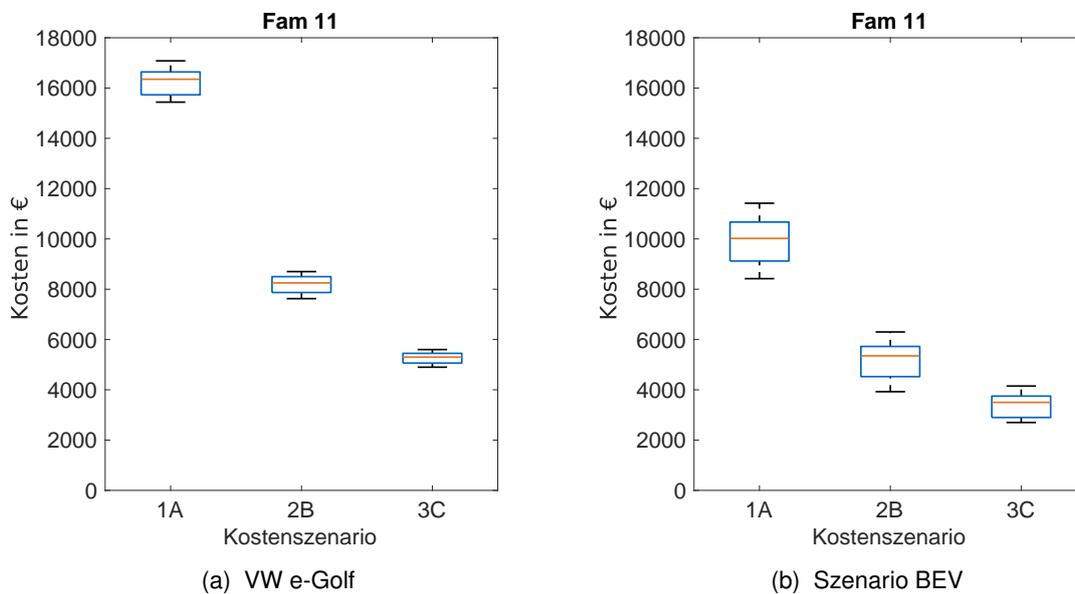


Abbildung 4.26 Preis-Szenarien für eine Familie mit hohem Mobilitätsaufkommen

wegen sich in Bereichen von deutlich über 15000 €. Diese Aufwendungen sind in Kombination mit den hohen Anschaffungskosten für das BEV für Privatnutzer nicht rentabel. Ein anderes Bild ergibt sich, wenn sich die Effizienz der genutzten BEV verbessert und die Preise für die Haustechnik deutlich sinken, wie es durch Szenario (3C) beschrieben

wird. In diesem Fall kann sogar für Familien mit hohem Mobilitätsaufkommen mit unter 4000 € Kosten für eine Neuinstallation eine optimale Emissionseinsparung erreicht werden.

Familien mit niedrigem Mobilitätsaufkommen benötigen insgesamt kleinere Anlagen, was sich in geringeren Anschaffungskosten niederschlägt (Abbildung 4.27). Weil absolut be-

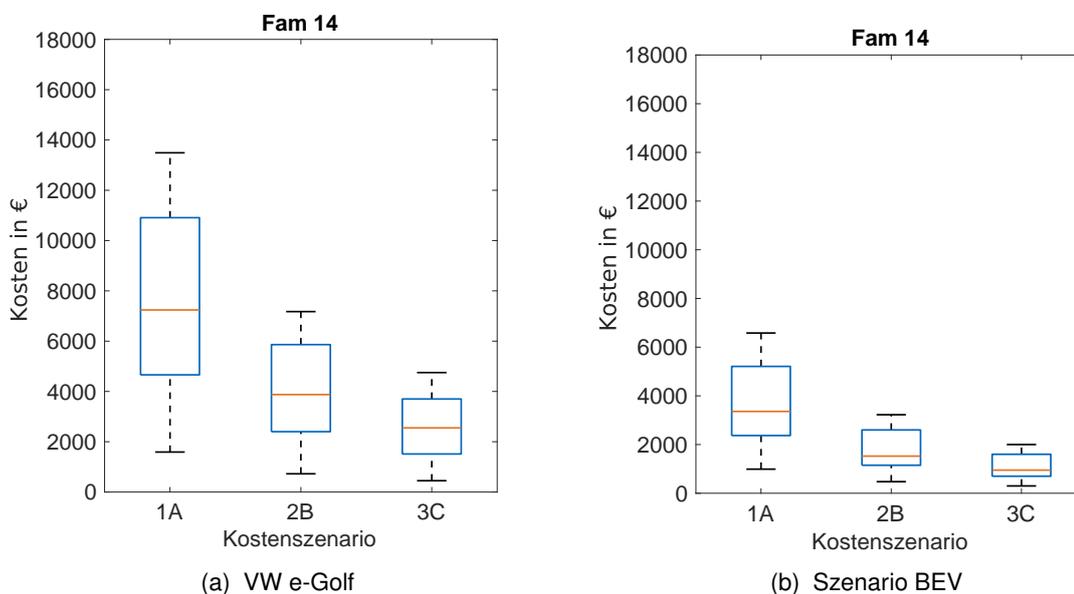


Abbildung 4.27 Preis-Szenarien für eine Familie mit niedrigem Mobilitätsaufkommen

trachtet weniger gefahren wird, ist anzunehmen, dass die Bereitschaft für derzeitige Anschaffungen in Höhe von 8000 bis 10000 € nicht gegeben ist. Erst durch die zukünftige Preisentwicklung fallen die Kosten unter 3000 €, sodass die Preisbelastung akzeptabel wird.

Für die vergleichende Diskussion der wirtschaftlich sinnvollen Haustechnik-Installationen wird abschließend die Szenariobewertung für die Pufferspeicher-Kapazitäten durchgeführt. Es wird erneut unterschieden zwischen der bereits vorhandenen PV, die in diesem Fall keine weiteren Kosten verursacht, und der optimal benötigten PV, die mit den Szenariokosten veranschlagt wird. Zusätzlich wird jeweils der Zukauf eines Pufferspeicher-Systems betrachtet.

Bei der Betrachtung der Kostenszenarien für die jeweilige optimale PV ist, bedingt durch die durchgängig großen Flächen der PV, ein hohes Kostenniveau für derzeitige Anlagen festzustellen (Abbildung 4.28). Aufgrund der großen bereits vorhandenen Verbreitung von PV und der anzunehmenden weiteren Kostensenkung ist das durch die Szenariobewertung vorliegende Potential für die Verwendung einer PV als positiv zu betrachten. Mit einer maximalen Investitionssumme von 5000 € ist für alle Mobilitätsbedürfnisse in Zukunft ein optimales CO₂-Reduktionsergebnis erreichbar.

Für eine zusätzliche CO₂-Reduktion über die Nutzung der PV-Energie hinausgehend, müssen die Anschaffungspreise für Pufferspeicher-Systeme kritisch betrachtet werden.

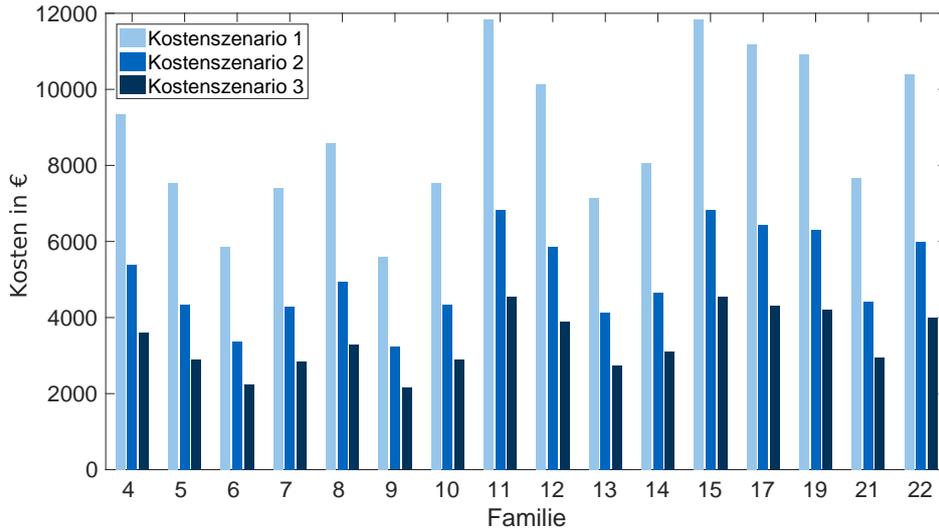


Abbildung 4.28 Anschaffungspreise für optimale PV der jeweiligen Familie basierend auf den Szenario-Preisen

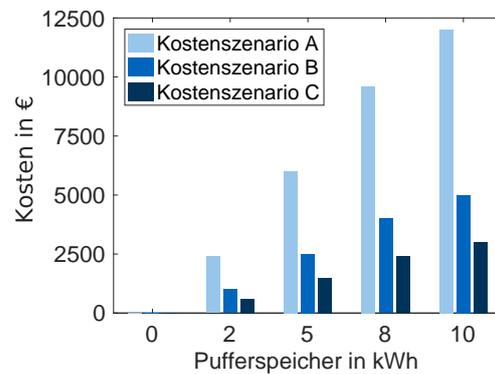


Abbildung 4.29 Anschaffungspreise für verschiedene Pufferspeicher-Kapazitäten basierend auf den Szenario-Preisen

Bedingt durch die vorgegebenen Pufferspeicher-Kapazitäten und die angenommenen Preise können feste Anschaffungspreise kalkuliert werden (Abbildung 4.29).

Sind große Pufferspeicher zu den derzeitigen Preisen noch vollkommen uninteressant, können bereits mit dem angenommenen Szenario (B) ausreichend groß dimensionierte Pufferspeicher für unter 5000 € erworben werden. Damit können Neuanschaffungen von PV und Pufferspeicher-Systemen für die CO₂-Emissionsreduktion in Verbindung mit Elektromobilität für unter 10000 € erworben werden. Diese Kosten für ein kombiniertes System sind in Anbetracht der derzeitigen Preise für PV in vergleichbarer Höhe und können als theoretisch akzeptabel eingeschätzt werden.

5. Nutzerakzeptanz – Emissionsoptimale Handlungsempfehlungen

Neben der rein technischen Machbarkeit und Effizienz der Nutzung von erneuerbarer Energie aus einer eigenen PV in Kombination mit einem Pufferspeicher zur Durchführung der alltäglichen Mobilität mit einem BEV ist auch der Faktor Mensch ein wesentlicher Bestandteil des zukünftigen Erfolgs. Darum ist es notwendig, die Nutzerakzeptanz und Verbraucherbereitschaft zu untersuchen, um somit die Eignung des Konzepts für den Markt bewerten zu können. Um auch diesen Aspekt in dieser Arbeit zu berücksichtigen, wird zuerst darauf eingegangen, wie die Nutzerakzeptanz erfasst und analysiert werden kann. Anschließend wird die Umfrage vorgestellt, die im Rahmen der Untersuchungen durchgeführt wurde. Aus der Interpretation dieser Ergebnisse werden Maßnahmen für die konkret untersuchten Familien abgeleitet. Aus diesen lassen sich generelle Empfehlungen entwickeln, die abschließend diskutiert werden.

5.1. Ermittlung der Nutzerakzeptanz

Den Nutzer in die technische Bewertung miteinzubeziehen bietet vor allem bei einem individuellen Thema wie der Mobilität großes Potential für eine kritische Einschätzung der theoretischen Effizienz. Ein wichtiger Schritt für eine Erhöhung der Akzeptanz ist es, den Nutzer konkret zu informieren, welche Auswirkungen sein Verhalten hat.

Brazil et al. [186] und Taniguchi et al. [187] nutzen dies, indem sie Personen die Emissionsinformationen ihres Bewegungsverhaltens zur Verfügung stellen. Dadurch ändert sich die individuelle Einstellung und die Akzeptanz für emissionsfreiere Alternativen steigt.

Einen ähnlichen Weg gehen Moon und Park [188]. Sie verbinden den individuellen Fahrtweg mit Kosten, wobei die verschiedenen VM durch unterschiedliche gesellschaftliche Kostensätze charakterisiert sind. Bei diesem Ansatz ist es das Ziel, das individuelle Kostenminimum zu finden.

Vanier und Trippe [189] zeigen aber auch, dass Nutzer nur schwer von einem VM-Typ zu einem anderen wechseln wollen. Hier bietet Elektromobilität eine Chance, weil das grundlegende VM „eigenes Fahrzeug“ nicht gewechselt werden muss.

Besonders das Thema der Elektromobilität bedarf einer detaillierten Akzeptanzuntersuchung, wie es beispielsweise Götz et al. [190] durchgeführt haben. Sie zeigen durch Umfrageergebnisse, dass es ein großes Potential für Elektromobilität gibt. Dieses wird durch hohe Akzeptanzwerte gestützt. Sie zeigen jedoch auch, dass die Bevölkerung in der Elektromobilität zugeneigt, abgeneigt oder neutral gegenüberstehend eingeteilt werden kann. Es wird der starke Einfluss der Umweltrelevanz und der Kosten herausgestellt.

Vor allem mit einer wirtschaftlichen Verbesserung der Elektromobilität kann die Akzeptanz deutlich gesteigert werden.

Fazel [191] untersucht im Kontext der Elektromobilität die Nutzerakzeptanz unter Berücksichtigung der Nutzungsform des Carsharing. Er verwendet dazu ein schriftliches Umfragedesign über eine Online-Umfrage. Dadurch wird ein großer Antwort-Pool aufgebaut, der für die weitergehenden Untersuchungen herangezogen werden kann.

Wie Frenzel et al. [192] herausstellen, befassen sich Untersuchungen zur Akzeptanz der Elektromobilität mit tatsächlichen BEV-Besitzern, die der Gruppe der Early Adopter zugeordnet werden können. Aus diesem Grund ist es schwierig, Akzeptanzhemmnisse derjenigen Personen zu bewerten, die sich nicht als direkter Fan der Elektromobilität einordnen. Um auch neutrale und skeptische Personen für die Elektromobilität zu gewinnen, müssen Anregungen und Kritikpunkte der Early Adopter in der weiteren technischen, wirtschaftlichen und politischen Entwicklung berücksichtigt werden.

Für eine detaillierte und tiefer gehende Analyse der Nutzerakzeptanz fassen Jonuschat et al. [193] Untersuchungen zur Akzeptanz von Elektromobilität in Kombination mit V2G-Integration zusammen. Sie zeigen, dass es eine große Anzahl an wissenschaftlichen Studien zur Akzeptanz von BEV gibt, aber das Thema Netzintegration und Ladeeigenschaften im Kontext der Nutzerakzeptanz nicht abgedeckt wird.

Das Gesamtkonzept der Verknüpfung von Elektromobilität mit Ladung über eine eigene PV mit angeschlossenen Pufferspeicher-System wird in der Wissenschaft noch nicht in Bezug auf die Nutzerakzeptanz behandelt. Aus diesem Grund wird dieser Faktor in dieser Arbeit untersucht.

5.2. Vorgehen zur Bestimmung der Nutzerakzeptanz

Für die Bestimmung der Nutzerakzeptanz für das Konzept der Kombination von Elektromobilität mit Ladung über PV-Energie und Pufferspeicher wurden unter anderem folgende Leitfragen definiert:

- Wie umweltbewusst zeigen sich die Befragten allgemein und bezüglich Mobilität?
- Welche Ladestrategie, bezugnehmend auf die entstehenden Emissionen, präferieren die Teilnehmer?
- Welche Bereitschaft ergibt sich im Hinblick auf das Lade- und Mobilitätsverhalten für die Einbindung von Solarstrom?
- Welche Maßnahmen fungieren als Anreiz und welche Eingriffe werden als zu einschränkend empfunden für die Umsetzung der Verkehrsvariante?
- Welche Rolle spielt die monetäre Komponente unter den Befragten für die Umsetzung?

- Wie geeignet erweist sich ein BEV mit/ohne Solarversorgung als Erst- oder Zweitwagen?
- Wie schneidet die emissionsfreie Elektrovariante im Vergleich zum herkömmlichen Pkw ab?
- Welche Fahrzeugeigenschaften wirken als Hemmnis für einen Kauf und welche Anreize können die Attraktivität bezüglich einer Anschaffung erhöhen?

Bei der Datenerhebung wird eine quantitative Herangehensweise gewählt. Dazu wird ein internetbasierter Fragebogen entwickelt, der anonyme Antworten ermöglicht und über einen Link einfach verbreitet werden kann. So können viele Teilnehmer gewonnen werden und gleichzeitig ist eine schnelle und günstige Datenerhebung möglich. Eine ausführliche Darstellung der Umfrage mit umfangreichen Ergebnissen ist in [197] zu finden. Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse in den Kontext dieser Arbeit eingeordnet.

Die Teilnehmer der Umfrage sind aktive und potentielle Autofahrer, unabhängig von der derzeit genutzten Antriebsart. Für die Teilnahme ist es unerheblich, ob die Person bereits in einem Eigenheim wohnt oder nicht.

Der Fragebogen besteht aus 51 Fragen, zusammengefasst in acht Blöcken. Zu Beginn wird der Teilnehmer über Motivation und Hintergrund informiert und erhält eine kurze Anleitung. Die Thematik der Elektromobilität in Kombination mit einer PV-Pufferspeicherladung wird vorgestellt. Außerdem erfolgt ein Hinweis auf die damit verbundene CO₂-arme Fahrweise.

Nach den einleitenden soziodemographischen Fragen werden Details zum aktuellen Mobilitätsverhalten erfragt. Anschließend werden zwei Szenarien vorgestellt und die Einstellungen dazu abgefragt:

Szenario 1: BEV als Zweitwagen

In diesem Szenario steht die Bereitschaft zur emissionsreduzierten Mobilität im Mittelpunkt. Als Randbedingungen werden definiert:

- das BEV dient als Zweitwagen
- das Erstfahrzeug ist ein ICEV
- das BEV braucht nicht für tägliche Arbeitswege (mindestens 8 Stunden außer Haus) genutzt werden
- für gelegentliche Arbeitswege sowie alle anderen Wege kann das BEV genutzt werden
- PV kann installiert werden

Zusätzlich dazu wird abgefragt, welche PV der Teilnehmer wählen würde, um sein BEV zu laden. Dabei spielen Kosten und qualitatives Emissionspotential die entscheidende

Rolle. Den letzten Teil in diesem Szenario bilden Fragen zum Ladeverhalten sowie Anforderungen und Auswirkungen der Solarstromintegration.

Szenario 2: BEV mit Pufferspeicher

Es gelten die gleichen Randbedingungen wie in Szenario 1, jedoch kann nun noch ein stationärer Pufferspeicher genutzt werden, um so eine Unabhängigkeit von der PV zu erreichen. Der Teilnehmer kann sich hier auch gegen einen Pufferspeicher entscheiden. Dadurch wird abgefragt, in wie weit die Bereitschaft besteht, sich emissionsoptimal fortzubewegen, auch wenn dies mit weiteren Kosten verbunden ist.

Im letzten Teil der Umfrage werden Anreize und Einstellungen zur emissionsoptimalen Mobilität detailliert erfragt. Dabei wird auf die Abhängigkeit vom PV-Ertrag und die Restriktionen aus beschränkter Reichweite und Ladeverhalten eingegangen.

Über einen Zeitraum von drei Wochen wird die Umfrage über verschiedene Plattformen im Internet online geschaltet. Insgesamt können 80 Umfragebögen gewonnen werden, von denen 55 vollständig auswertbar sind. Anhand der soziodemographischen Antworten kann die Stichprobengruppe als heterogen charakterisiert werden. Die vollständig ausgefüllten Bögen werden für die Bewertung der Nutzerakzeptanz und die kritische Einordnung der theoretischen Ergebnisse der Emissionsbewertung herangezogen.

5.3. Empfehlungen basierend auf untersuchten Familien

Wie in Kapitel 4 ausgeführt wird, hängt das Emissionspotential der Familien von der genutzten Haustechnik ab. Grundvoraussetzung ist eine ausreichend dimensionierte PV. Eine weitere signifikante Einsparung kann durch die Nutzung eines Pufferspeichers gewonnen werden. Wie vorangehend vorgestellt, wird das Emissionspotential anhand eines dreistufigen Vorgehens bewertet:

BEV

Bei allen Familien kann durch die Nutzung eines BEV anstatt eines ICEV die Emission von CO₂ abhängig vom genutzten Fahrzeugtyp um mindestens 50 % reduziert werden. Um direkte Emissionen signifikant einzusparen, ist für alle Familien ein BEV sinnvoll.

BEV mit Ladung durch PV

Die zusätzliche Nutzung einer PV, um das BEV zu laden, verbessert das Einsparpotential nur dann wesentlich, wenn die PV knapp unter der maximal für Privatanutzer möglichen Größe von 10 kW_p dimensioniert ist. Nur dann kann sichergestellt werden, dass in den kurzen Zeiten, in denen sich Ladenachfrage und PV-Energie überdecken, ausreichend Energie direkt von der PV zur Verfügung gestellt werden kann.

BEV mit Ladung durch PV und Pufferspeicher

Dieser Nachteil der Ladung über PV kann durch die zusätzliche Nutzung eines Pufferspeicher-Systems für alle Familien behoben werden. Bereits die Nutzung eines kleinen Pufferspeichers von 2 kWh erreicht eine deutliche weitere Einsparung. Für Familien mit hohem Mobilitätsaufkommen und langen Strecken empfiehlt sich ein Pufferspeicher mit mindestens 5 kWh.

Als weiterer wesentlicher Faktor beeinflusst das Mobilitätsverhalten das Emissionspotential. Weil der tatsächliche Mobilitätsbedarf nur schwer beeinflusst werden kann, bietet sich vor allem im Zusammenhang mit der temporären Verfügbarkeit der PV-Energie eine zeitliche Variabilität verschiedener Fahrten an. Der Frage der möglichen Verschiebbarkeit von verschiedenen Fahrten wird in der Umfrage nachgegangen. Abbildung 5.1 zeigt die Verteilung für die mögliche zeitliche Variabilität verschiedener Fahrtzwecke. Der

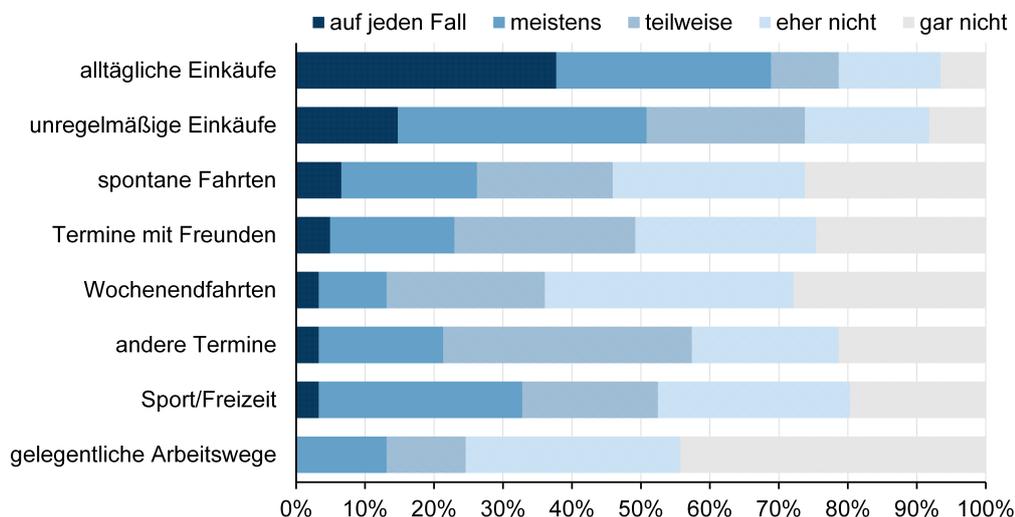


Abbildung 5.1 Umfrageergebnisse zur Akzeptanz für zeitliche Verschiebbarkeit von Fahrten verschiedener Fahrtzwecke: *Inwieweit wären Sie bereit, folgende Tätigkeiten in die Früh- oder Abendstunden zu legen, wenn die Batterie dafür tagsüber laden könnte?* (n=55)

Fahrtzweck des alltäglichen Arbeits- bzw. Ausbildungswegs wurde nicht explizit genannt, weil für diese Fahrtzwecke bedingt durch äußere Einflüsse wenig bis keine Variabilität möglich ist.

Zu sehen ist, dass in den meisten Fällen die Bereitschaft, Fahrten in die Früh- oder Abendstunden zu verlegen, nicht in dem Maße gegeben ist, dass das Mobilitätsverhalten wesentlich verändert werden kann. Einziges Potential bilden alltägliche Einkaufsfahrten, die mit fast 70 % meistens oder immer verlegt werden können, um das BEV mit PV-Energie zu laden.

Diese Tendenz zeigt sich auch in der Frage nach dem gewünschten und zufriedenstellenden SOC für verschiedene Fahrtzwecke (Abbildung 5.2). Für die alltäglichen Einkaufsfahrten ist mit deutlichem Unterschied zu allen anderen Fahrtzwecken ein geringerer SOC ausreichend, um ein zufriedenstellendes Sicherheitsgefühl für das Mobilitätsverhalten gewährleisten zu können.

Aus diesem Grund wird im Modell zur Erstellung des Wochenmobilitätsplans die Mobilitätsvariabilität für alltägliche Einkaufsfahrten berücksichtigt. Dazu werden Fahrten mit der Charakteristik von alltäglichen Einkaufsfahrten, die sich durch eine streuende Verteilung über die Woche mit breiter Aufenthaltswahrscheinlichkeit und kurzer Aufenthaltsdauer pro Tag auszeichnen, möglichst an das Ende des Tages geschoben. So kann die Wahrscheinlichkeit einer direkten PV-Ladung zu sonnenreicheren Stunden erhöht werden.

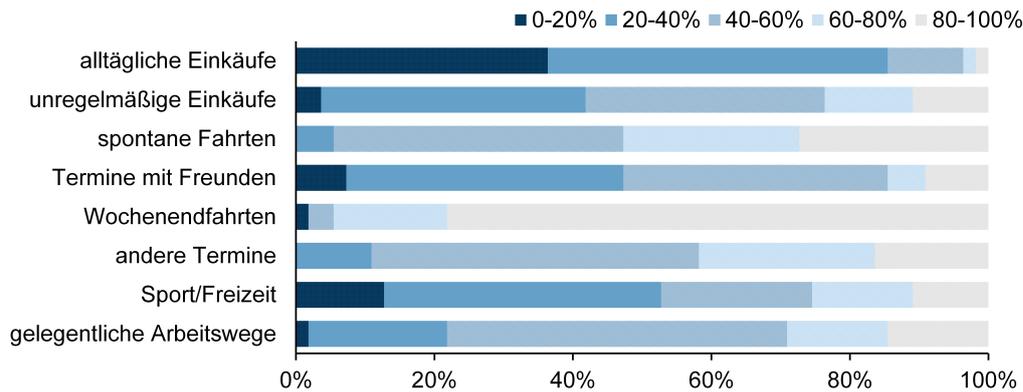


Abbildung 5.2 Umfrageergebnisse zum gewünschten Ladezustand des BEV für Fahrten verschiedener Fahrtzwecke: *Mit welchem SOC der Batterie würden Sie sich bei den folgenden Fahrtzwecken zufrieden geben?* (n=55)

Die zugrundeliegende Empfehlung, ein Pufferspeicher-System zur Ladung des BEV zu nutzen, wird durch weitere Umfrageergebnisse gestützt. Die Teilnehmer werden befragt, in wie weit das Interesse besteht, die tägliche Mobilität generell mit weniger CO₂-Ausstoß zu bewältigen. Wie aus der Darstellung der Umfrageergebnisse in Abbildung 5.3 hervor-

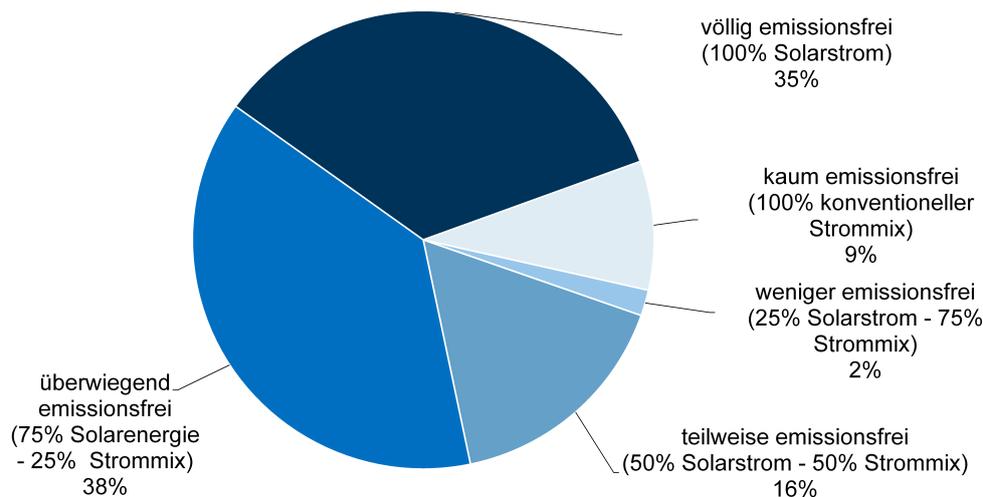


Abbildung 5.3 Umfrageergebnisse zur umgesetzten Ladestrategie: *Welche Ladestrategie würden Sie, im Hinblick auf die Umweltbelastung, mit dem Kauf eines BEV präferieren?* (n=55)

geht, würden fast drei Viertel der Teilnehmer eine mindestens überwiegend emissionsfreie Ladestrategie verfolgen und damit zu mindestens 75% auf eigenproduzierte Solarenergie für die Ladung zurückgreifen. Dieses Ergebnis zeigt eine große Bereitschaft für das Konzept der kombinierten BEV-Ladung mit PV und Pufferspeicher. Kostenaspekte bleiben hierbei vorerst explizit unberücksichtigt.

Bei einer weiteren Befragung zur Einschätzung der Nutzungsoption des BEV im Vergleich zu einem ICEV zeigt sich das weitere Potential der Unterstützung durch erneuerbare Energie (Abbildung 5.4). Die Nutzung eines ICEV als alleinige Antriebsoption für alle Fahrzeuge im Haushalt wird mit einer durchschnittlichen Note von 2,35 bewertet, wobei 60% der Teilnehmer die Note 2 oder besser für die Tauglichkeit für die alltägliche

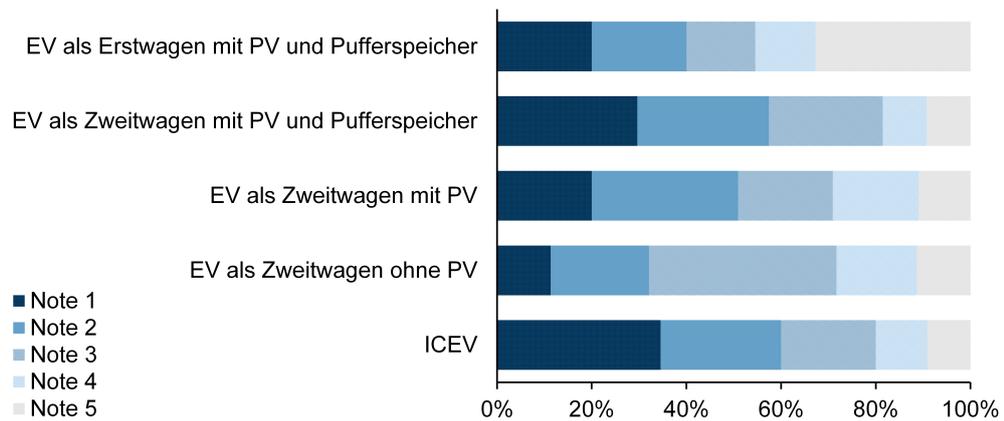


Abbildung 5.4 Umfrageergebnisse zur Bewertung des BEV-Einsatzes: *Folgend finden Sie verschiedenen Optionen von Fahrzeugen und deren Betrieb. Bewerten Sie diese in ihrer Gesamtheit mit den Noten 1-5 (1=beste Option, 5=schlechteste Option).* (n=55)

Mobilität vergeben. Ein BEV als Zweitwagen mit Ladung über den Netzstrom verschlechtert sich in der Bewertung auf einen Schnitt von 2,96. Erst mit der schrittweisen Kombination mit PV und Pufferspeicher für das BEV als Zweitfahrzeug verbessert sich die Bewertung wieder auf einen Schnitt von 2,41, die damit auf vergleichbarem Niveau liegt, wie die Nutzung eines ICEV als Zweitwagen. Es zeigt sich aber auch, dass das Konzept BEV mit PV und Pufferspeicher noch nicht als alleiniges Erstfahrzeug akzeptiert ist. Diese Mobilitätsoption ist mit einem Schnitt von 3,18 und mit über 30 % Bewertung mit Note 5 (schlechteste Option) nicht für den Alltagsgebrauch geeignet.

5.4. Ableitung von allgemeingültigen Empfehlungen

Die theoretischen Untersuchungen können mit den Ergebnissen der Umfrage kritisch betrachtet werden. Daraus lassen sich allgemeine Empfehlungen ableiten, die sich dann im nächsten Schritt auf weitere, an dem Gesamtkonzept interessierte Privatnutzer anwenden lassen.

Als wesentliche Empfehlung ist zu nennen, dass der Mobilitätsbedarf ein signifikanter Faktor für die Dimensionierung von PV und Pufferspeicher ist. Als Vergleichsgröße kann dabei die Fahrdistanz der häufigsten Fahrten, übersetzt in den Mobilitätsradius, herangezogen werden.

Bei der Analyse der Mobilitätsabhängigkeit für die optimale PV-Auslegung (Abbildung 5.5) sind zwei Cluster unterscheidbar. Für Familien mit kurzen häufigsten Fahrtstrecken unter 20 km und damit einem niedrigen Mobilitätsradius zeigt sich eine optimale PV-Größe von circa 60 m². Weisen Familien einen hohen Mobilitätsradius und häufigste Fahrtstrecken von deutlich über 20 km auf, schwankt die optimale PV-Fläche zwischen 80 und 90 m². Damit kann eine erste allgemeine Empfehlung für die Größe einer sinnvollen PV basierend auf dem eigenen Mobilitätsradius ausgesprochen werden. Mit dieser Dimensionierung wird die Versorgung des BEV sichergestellt. Für eine konstant ermöglichte Versorgung des restlichen Haushalts mit PV-Energie muss die Fläche dementsprechend

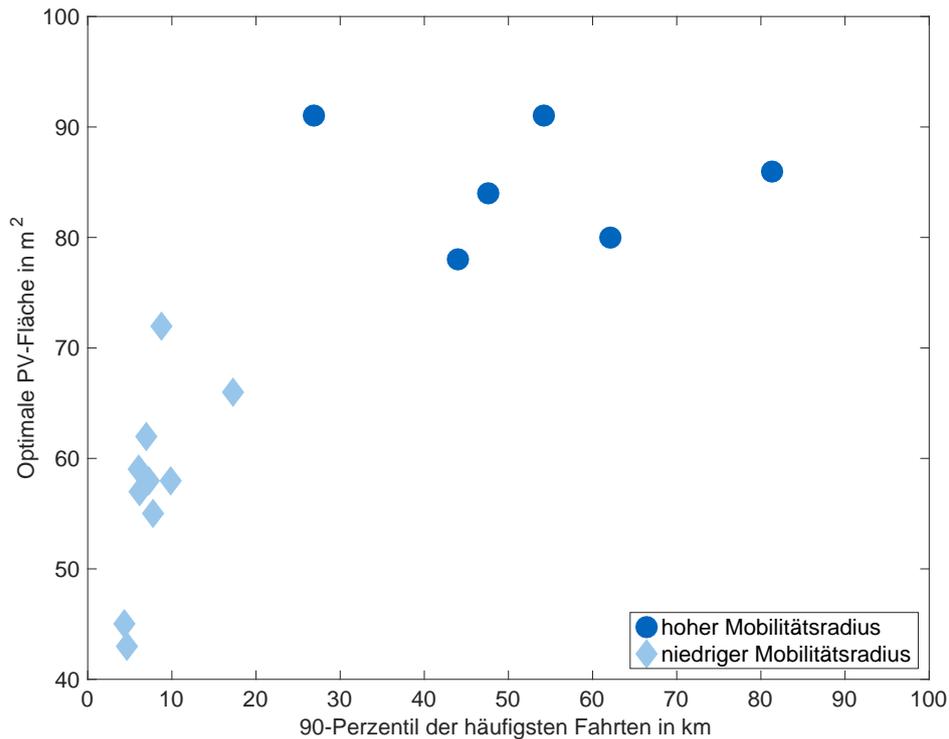


Abbildung 5.5 Clusteranalyse der optimal benötigten PV-Fläche abhängig von der häufigsten Fahrdistanz

größer gewählt werden. Diese vorgeschlagene Dimensionierung zielt auf einen Eigenverbrauch von annähernd 100 % ab, wobei für die Ladung des BEV möglichst selten zusätzlicher Netzstrom bezogen werden muss. In Zeiten geringerer Ladung steht der Strom dem restlichen Haushalt zur Verfügung.

Analog zur Analyse der optimalen PV-Fläche kann auch eine allgemeine Empfehlung für die Anschaffung eines sinnvollen Pufferspeicher-Systems gegeben werden. Wenn Fahrten allgemein kurz sind oder wenig gefahren wird, ist die Anschaffung eines Pufferspeichers nicht zwingend notwendig. Allein schon durch die Ladung über Netzstrom und PV kann eine deutliche CO₂-Reduktion erreicht werden.

Um die Energie aus der PV effizienter zu nutzen, bietet sich die Integration eines Pufferspeichers an. Wie auch aus der Analyse der einzelnen Familien hervorgeht, benötigen Familien mit kleinem Mobilitätsradius einen kleinen Pufferspeicher, um zufriedenstellende Emissionseinsparungen erreichen zu können. Dieses Ergebnis zeigt sich erneut in der Clusteranalyse abhängig vom Mobilitätsradius, die in Abbildung 5.6 dargestellt ist. Für Familien mit niedrigem Mobilitätsradius bis 30 km eignen sich Pufferspeicher mit einer Kapazität bis zu 5 kWh für eine optimale Emissionseinsparung. Familien mit weiteren häufigen Fahrtstrecken können ihr Fahrzeug mit Pufferspeichern mit einer Kapazität von 5 bis 8 kWh emissionsoptimal laden. Diese Kapazität reicht meist aus, um die über den Tag benötigte Reichweite auch bei Vielfahrern wieder aufzuladen.

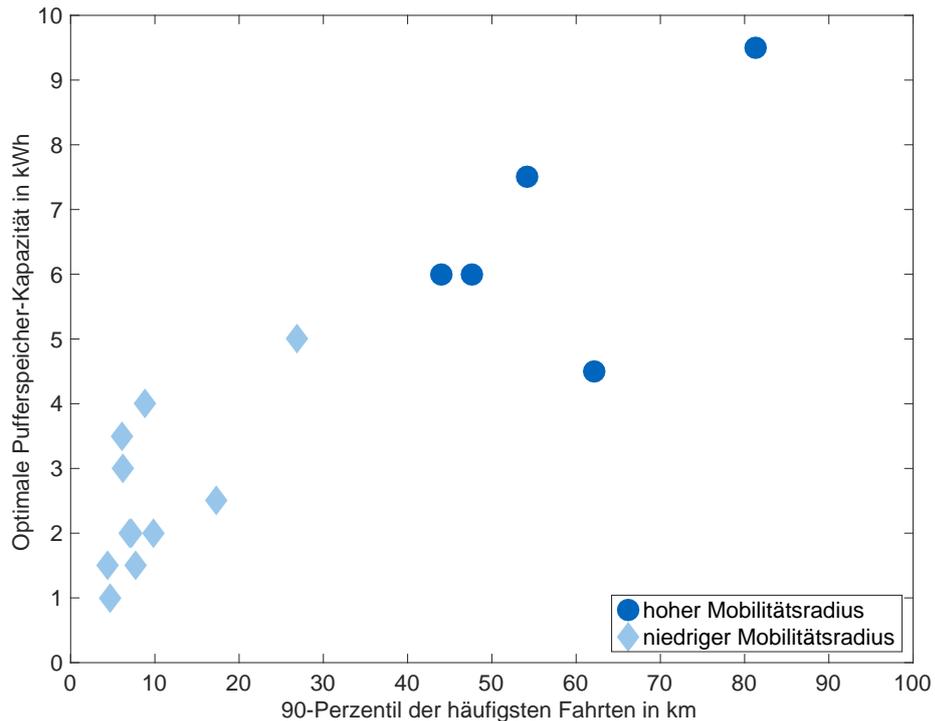


Abbildung 5.6 Clusteranalyse der optimal benötigten Pufferspeicher-Kapazität abhängig von der häufigsten Fahrdistanz

Zu beachten ist bei den Clusteranalysen zu PV und Pufferspeicher, dass mittlere Werte für die einzelnen Familien zum Vergleich verwendet werden. Es besteht damit eine temporäre Über- oder Unterversorgung an einzelnen Tagen. Das bedeutet, dass an Tagen mit starker Mobilität und schlechtem Wetter die Ladung durch den Bezug von Netzstrom unterstützt werden muss. An Tagen mit weniger Fahrten und hohem PV-Ertrag steht diese Energie weiteren Haushaltsverbrauchern für den Eigenverbrauch zur Verfügung. Allgemein bietet sich das Ziel an, eine möglichst große PV zu verbauen. Eine großflächige PV erzielt die effizientesten Ergebnisse, wenn sie mit einem großen Pufferspeicher kombiniert wird, weil dann ein hoher Eigenverbrauch durch die Ladung des BEV ermöglicht wird. Selbst wenn das BEV gerade nicht geladen wird, ergibt sich in Zukunft weiteres großes Potential zur Emissionseinsparung, indem andere Verbraucher im Haushalt über den Pufferspeicher versorgt werden.

Nach der allgemeinen Einschätzung für sinnvolle Dimensionierungen für PV und Pufferspeicher ist das verwendete Ladesystem eine ebenfalls nicht zu unterschätzende Kostenkomponente für den Privatanwender. Die theoretischen Analysen zeigen, dass es für die Ladung über PV ohne ein zusätzliches Pufferspeicher-System nicht sinnvoll ist, ein teures Ladesystem anzuschaffen. Die hohen Ladeleistungen sind über die PV-Anlage nicht realisierbar. Wenn das Ziel besteht, möglichst eigenproduzierte erneuerbare Energie zu laden, ist die optimale Ladeleistung über die haushaltsübliche Schuko-Steckdose mit 3,6 kW erreicht.

Bei Verwendung eines Pufferspeichers zur Ladung des BEV ist kein signifikanter Unterschied zwischen den Ladeleistungen erkennbar. In beiden Fällen ist die Anschaffung eines teuren Ladesystems nicht notwendig. Die Investitionssumme kann vielmehr auf die teure Komponente Pufferspeicher übertragen werden. Durch eine Vergrößerung in der Kapazität sind größere Einsparpotentiale zu verzeichnen.

Als weiterer kritischer Punkt steht die Einsatzfähigkeit des BEV für die Bewältigung aller Mobilitätsbedürfnisse zur Betrachtung. Die theoretische Analyse ergibt eine gute Eignung von BEV für ländliche Mobilitätsbedürfnisse. Dieser theoretischen Bewertung steht die subjektive Einschätzung und Unsicherheit der Nutzer gegenüber. Aus diesem Grund wird eine schrittweise Nutzung des Konzepts Elektromobilität mit Ladung über PV und Pufferspeicher empfohlen. Der Vergleich der Nutzerbereitschaft von BEV als Zweitwagen im Vergleich zur Nutzung als Erstfahrzeug zeichnet sich durch eine stark positive Tendenz hin zum Zweitfahrzeug aus (Abbildung 5.7). Aus diesem Grund lässt sich die

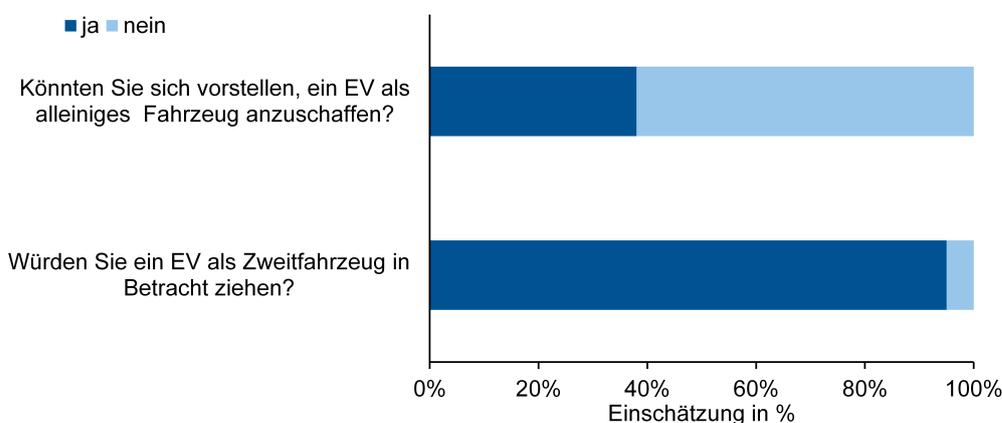


Abbildung 5.7 Umfrageergebnisse zur Bereitschaft ein BEV als alleiniges Erstfahrzeug oder als zusätzlichen Zweitwagen zu verwenden (n=55)

Empfehlung aussprechen, das Konzept der Ladung eines BEV über Energie aus einer PV mit Nutzung eines Pufferspeicher-Systems für die Zweitwagenmobilität zu nutzen und dies schrittweise weiter auszubauen. So kann die Akzeptanz durch die erfolgreiche Nutzung gesteigert werden.

5.5. Nutzerakzeptanz als einschränkende Größe

Mit den im vorangehenden Abschnitt entwickelten Empfehlungen kann der CO₂-Ausstoß signifikant reduziert werden. Die Menge der eingesparten Emissionen hängt damit direkt von der Bereitschaft der Nutzer ab, das Konzept umzusetzen und in die notwendigen Installationen zu investieren. Dieser Aspekt zeigt die Grenzen des Systems auf. Vor allem unter der Voraussetzung der aktuellen Preislage für Hausinstallation und BEV ist eine flächendeckende Attraktivität nicht gegeben.

Dieses Ergebnis zeigt auch die Befragung zur aktuellen Bereitschaft zur Umsetzung des Konzepts (Abbildung 5.8). Während die Idee der Ladung eines BEV mit Energie aus PV und Pufferspeicher generell als attraktiv angesehen wird, wird von 71 % der Umfrage-

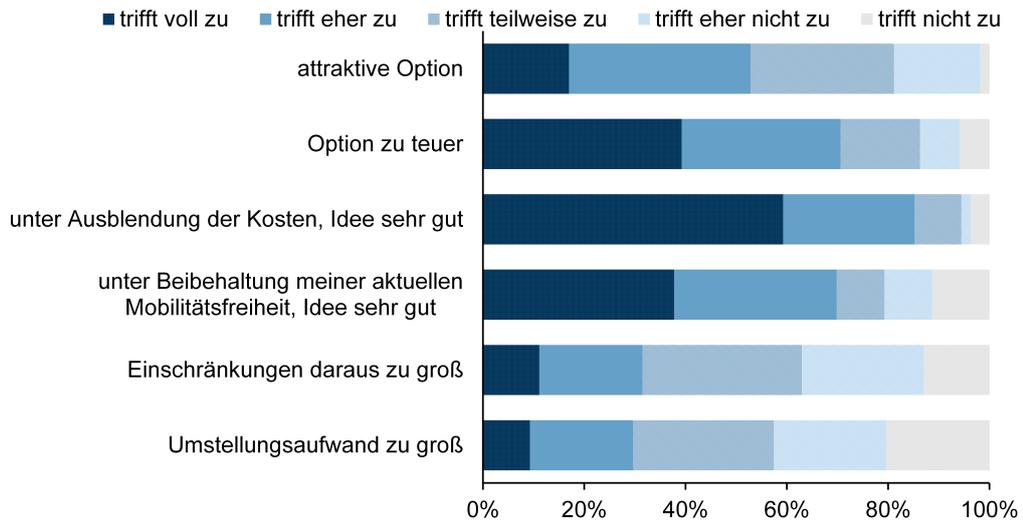


Abbildung 5.8 Umfrageergebnisse zur Bereitschaft zur Umsetzung des Gesamtkonzepts: *Wie würden Sie Ihre aktuelle Bereitschaft zur Nutzung eines BEV und Ladung mit eigenproduziertem Solarstrom einschätzen* (n=55)

Teilnehmer diese Mobilitäts-Option als zu teuer bewertet. Nur wenn die Kosten vernachlässigt werden sehen sich 85 % der Teilnehmer bereit, dieses Konzept umzusetzen.

Weiterhin ist es für 70 % der Teilnehmer wichtig, dass sie nicht in ihrer Mobilitätsfreiheit eingeschränkt werden, wenn sie ein BEV nutzen. Die Belastung und die Einschränkungen, die sich durch die Umstellung auf ein BEV und den daraus resultierenden Ladeaufwand ergeben, werden als gering bis unerheblich eingeschätzt.

Unter Berücksichtigung der Konzept-Implementierung als Zweitwagen-Mobilität ist eine Akzeptanzbewertung unter diesem Gesichtspunkt notwendig. Die Ergebnisse zur Bewertung des BEV als Zweitfahrzeug zusätzlich zu einem ICEV sind in Abbildung 5.9 aufgeführt. Die Investitionslast, die sich aus PV, Pufferspeicher und BEV ergibt, steht

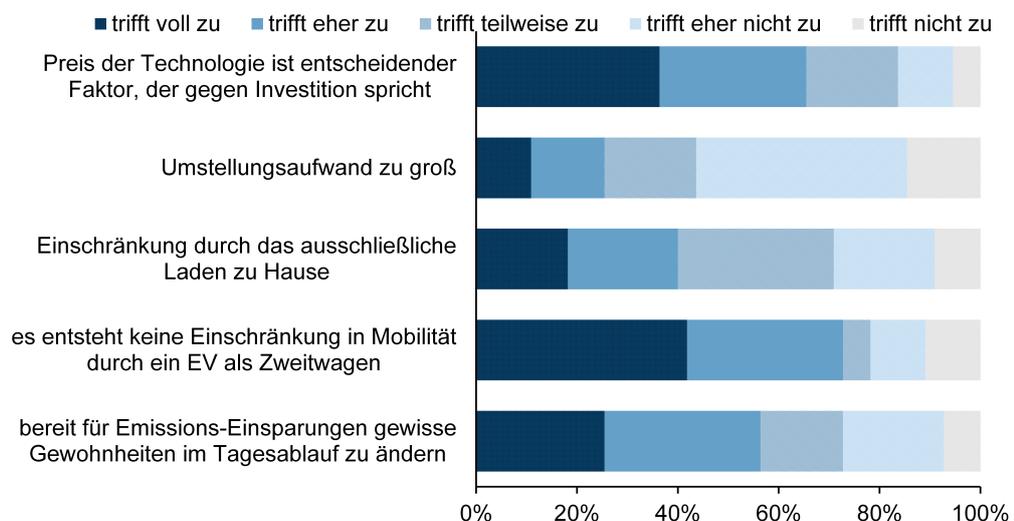


Abbildung 5.9 Umfrageergebnisse zur Einschätzung des Konzepts BEV als Zweitfahrzeug: *Wie stehen Sie zu den folgenden Aussagen, wenn es sich bei dem BEV inklusive PV nach wie vor um ein zusätzliches Fahrzeug zum ICEV handelt?* (n=55)

erneut gegen eine sofortige Umsetzung der Technologie. Als weiteres Problem kann in diesem Fall die ausschließliche Ladung des BEV zu Hause gesehen werden, wenn nur dann erneuerbare Energie geladen werden kann.

Insgesamt befürchten nur knapp über 20 % der befragten Personen eine Einschränkung in ihrem Mobilitätsverhalten durch den Einsatz eines BEV als Zweitwagen. Es kann deshalb von einer mehrheitlichen Akzeptanz des Konzepts ausgegangen werden.

Ein wesentlicher Aspekt der Nutzerakzeptanz ist die Bereitschaft, sich auf die Randbedingungen des neuen Konzepts einzulassen und das Ziel der Emissionseinsparungen proaktiv verfolgen zu wollen. Die Umfrageergebnisse ergeben, dass mehr als 50 % der befragten Personen bereit sind, ihr Verhalten anzupassen, um ihr BEV mit erneuerbaren Energien zu laden

Mit der Untersuchung des Mobilitätsverhaltens, der Eigenenergieversorgung durch PV und Pufferspeicher und der Nutzerakzeptanz für das Konzept ist die gesamtheitliche Betrachtung abgeschlossen. Damit kann für Privatanutzer in ländlichen Regionen, abhängig von dem jeweiligen charakteristischen Mobilitätsbedarf, ein hohes Potential zur Einsparung von CO₂-Emissionen bescheinigt werden.

6. Diskussion

In diesem Kapitel erfolgt eine kritische Betrachtung des Gesamtkonzepts mit der Vorstellung von möglichen Verbesserungen und zukünftigen Entwicklungen.

Diese Arbeit zeigt ein hohes Potential zur Emissionseinsparung für die private Mobilität im ländlichen Raum. Durch die Nutzung einer eigenen PV kann ein BEV mit deutlich reduzierten CO₂-Emissionen geladen werden. Durch den Einsatz eines Pufferspeichers kann die Problematik der geringen zeitlichen Überschneidung von Ladebedarf und Sonnenenergie gelöst werden. Trotzdem weist das Vorgehen zur Bestimmung des Emissionspotentials einige Schwächen und Nachteile auf, die damit die Grenzen des technischen Systems beschreiben.

Die Emissionsbewertung basiert auf der Beschreibung des Mobilitätsverhaltens. Dieses wird über generische Wochenmobilitätspläne definiert, die sich wahrscheinlichkeitsbasiert aus den aufgezeichneten Fahrdaten zusammensetzen. Damit unterliegt die Grundlage für die Bewertung einer Ungenauigkeit, weil durch dieses Vorgehen kein tatsächlich stattgefundenes Mobilitätsverhalten abgebildet wird. Durch diesen Umstand ist das Gesamtkonzept in der Hinsicht angreifbar, dass kein reales Abbild gewährleistet werden kann.

Andererseits ergibt sich durch dieses Vorgehen ein weiteres Betrachtungsfeld. Werden nur tatsächliche Fahrten berücksichtigt, kann auch nur für dieses Verhalten eine Evaluation stattfinden. Durch das qualitative Modell ist es möglich, dass keine realen Fahrten benötigt werden. Für den Emissionshaushalt ist es nicht zwingend notwendig zu wissen, welche Strecke genau befahren oder an welchem Punkt der Straße geparkt wurde. Durch die generische Beschreibung von Fahrthäufigkeiten und die Einbeziehung der häufigsten Fahrdistanzen ist es möglich, das Vorgehen auf Haushalte anzuwenden, von denen keine realen Fahrten vorliegen.

Ein weiterer Nachteil des generischen Mobilitätsmodells ist die ungenaue Aussage über die konkreten Verbräuche. Diese sind die Grundlage für den Emissionsausstoß. Weil kein Fahrprofil im Wochenmobilitätsplan hinterlegt ist, kann der Verbrauch und damit die Menge an ausgestoßenem CO₂ nur über einen distanzabhängigen Ansatz ermittelt werden. Hierdurch ergibt sich eine Ungenauigkeit, weil der Verbrauch wesentlich vom Fahrprofil abhängt. Dieser Aspekt bietet sich als zusätzlicher Parameter in der Mobilitätsbeschreibung an und kann in einer zukünftigen weiteren Entwicklung zu genaueren Ergebnissen in der Emissionsbewertung führen. Dabei ist es zum Beispiel möglich, zeitliche Unterschiede in den Verkehrsflüssen mit zu berücksichtigen.

Durch die qualitative Beschreibung des Mobilitätsverhaltens ist es notwendig, alle weiteren Analysen darauf aufzubauen. Dabei ist zu beachten, dass durch zu detaillierte oder zu hoch aufgelöste nachgeschaltete Schritte eine Genauigkeit vorgegeben wird, die durch die zu Grunde liegenden Annahmen nicht geleistet werden kann. Energiemodelle für PV, Pufferspeicher und Ladevorgang sind daher als einfache konstante Ener-

gieflüssen beschrieben. Die hinterlegten und genutzten Wetterdaten sind nur durch drei verschiedene Strahlungsverläufe hinterlegt. Für das Evaluationsmodell bedeutet das, dass Effekte wie Alterung, unterschiedliche Wirkungsgrade über den Ladeprozess oder Abhängigkeiten von Einbauparametern nicht betrachtet werden. Die Integration dieser Aspekte ist unter dem Gesichtspunkt der Ausgangslage, des daraus folgenden Parametrierungsaufwands und des Bestrebens, das Emissionspotential möglichst vergleichbar zu bewerten, nicht zielführend.

Bei der Untersuchung der einsparbaren Emissionen betrachtet das entwickelte Vorgehen nur die direkten Emissionen, die durch das Mobilitätsverhalten entstehen. Emissionen aus Produktion und Vertrieb werden nicht in die Vergleiche mit einbezogen. Dies stellt eine Schwäche in der Vergleichbarkeit dar, die jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden kann. Eine Bewertung der Nachhaltigkeit von BEV wurde von Reuter [194] vorgenommen.

Bei der Kostenbetrachtung werden für die zu beschaffenden Hausinstallationen jeweils zwei zukünftige Szenarien zusätzlich zu den derzeitigen Preisen herangezogen. Diese Kostenszenarien können nicht garantiert werden, erscheinen jedoch anhand der zu erwartenden Preisentwicklungen als sinnvoll. Der erhöhte Anschaffungspreis für ein BEV wird nicht explizit mit verrechnet. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass die Akzeptanz für BEV bei potentiellen Nutzern so weit ausgeprägt ist, dass sie sich das Fahrzeug anstatt eines ICEV anschaffen. Die Ergebnisse dieser Arbeit erhöhen den Anreiz durch die sich bei der Nutzung eines BEV ergebenden Vorteile.

Ein weiterer Faktor, der die zukünftige Kostenbetrachtung wesentlich beeinflussen kann, sind Emissions-Strafzahlungen. Die aktuelle Gesetzgebung sieht Strafzahlungen für Fahrzeughersteller vor, wenn deren im Umlauf befindliche Fahrzeugflotte die geltenden Emissionsgrenzwerte überschreitet [195]. Wenn jedoch auch die Emissionen von Privathaushalten bilanziert und einer Grenzwert-Analyse unterzogen werden, sind die Kosten für eine CO₂-senkende Haustechnik leichter vertretbar. Vor allem, wenn bereits eine PV vorhanden ist, ist die Investition in ein Pufferspeicher-System eine sinnvolle Ergänzung.

Für einen möglichst hohen Eigenverbrauch der erneuerbaren Energie ist in der Ladestrategie der vorliegenden Betrachtung keine Ladung außerhalb des eigenen Zuhauses vorgesehen. Dies führt zur Reduktion der möglichen Fahrten bzw. dem Ausweichen auf ein ICEV für Fahrketten, die außerhalb der Reichweite des BEV liegen. In diesem Szenario liegt demnach noch Potential zur weiteren Emissionseinsparung. Unter Berücksichtigung des Kundenwunsches, das BEV auch an anderen Orten als Zuhause mit erneuerbarer Energie zu laden, besteht für Arbeitgeber, aber auch für Supermärkte und Einkaufszentren die Notwendigkeit, sich über die Kombination von Elektromobilität mit erneuerbarer Energie Gedanken zu machen.

Eine Grundvoraussetzung für die vorliegende Arbeit ist die Verfügbarkeit von Mobilitätsdaten, die zur Analyse und Bewertung verwendet werden können. Um zukünftige Untersuchungen zur Emissionseinsparung durchführen zu können, ist die Unterstützung der Nutzer notwendig. Damit ist ein Nachteil des vorgestellten Systems, dass eine ho-

he Nutzerbereitschaft zur Datenfreigabe vorliegen muss. In der durchgeführten Online-Umfrage wird dieser Aspekt bereits ermittelt. Mit einer Zustimmung von 78 % (38 % „auf jeden Fall“; 40 % „vielleicht“; n=55) aller Befragten, ihre Mobilitätsdaten beispielsweise ihrem Energieversorger zur Verfügung zu stellen, um somit erneuerbare Energie effizienter nutzen zu können, kann das Vorgehen als umsetzbar betrachtet werden.

7. Zusammenfassung

Nicht nur Automobilhersteller oder große Betriebe müssen sich über den Energieverbrauch und die daraus resultierenden Emissionen Gedanken machen. Der private Sektor mit einem hohen Energieverbrauch und einem immer stärker wachsenden Mobilitätsbedürfnis trägt in wesentlichem Maße zu den ausgestoßenen Emissionen bei. Aus diesem Grund ist es auch für Privatanutzer sinnvoll, sich über die Möglichkeiten zur CO₂-Reduktion zu informieren.

In dieser Arbeit wird ein Bewertungskonzept vorgestellt, in wie weit Privatanutzer im ländlichen Raum durch innovative Mobilitätskonzepte Emissionen reduzieren können. Dabei wird die Nutzung eines BEV mit Ladung von eigenproduzierter erneuerbarer Energie als Mittel zur CO₂-Reduktion vorgeschlagen.

Im Stand der Wissenschaft werden Arbeiten vorgestellt, die die Kombination von erneuerbarer Energie und Elektromobilität untersucht haben. Der Eigenverbrauch erneuerbarer Energien zeigt an dieser Stelle ein hohes Potential zur Emissionsreduktion. Eine Möglichkeit dazu ist die Nutzung einer PV. Dadurch muss die temporäre Abhängigkeit von der Sonnenenergie beachtet werden.

Aus diesen Randbedingungen ergibt sich das Vorgehen, das in dieser Arbeit vorgestellt ist. In einem ersten Schritt wird das Mobilitätsverhalten im ländlichen Raum analysiert. Die hierfür benötigten Mobilitätsdaten werden mit einer eigens entwickelten Android-App erfasst.

Die Mobilitätsanalyse dient zur allgemeinen Einschätzung der Eignung von Elektromobilität bezüglich der Mobilitätsanforderungen im ländlichen Raum. Es wird gezeigt, dass sich ein Großteil der Fahrten auf einen Radius von unter 50 km pro Tag um den Heimatort beschränken. Diese Distanzen können bereits von derzeitigen BEV ohne Probleme bewältigt werden. Als weiterer wichtiger Einflussfaktor wird die Repetitivität von Fahrten identifiziert. Durch diese Charakteristik können häufige Fahrten bestimmt werden. Diese dienen als Eingangsparameter für die Beschreibung des Mobilitätsverhaltens .

Das Ziel der Mobilitätsanalyse ist die Erstellung eines Mobilitätsplans, der in vergleichbarer Weise den Mobilitätsbedarf einer Familie für eine Woche beschreibt. Dazu werden die aufgezeichneten Mobilitätsdaten anhand ihrer Zeit- und Verkettungscharakteristik wahrscheinlichkeitsbasiert als Fahrten in einem Wochenmobilitätsplan hinterlegt. Durch dieses Vorgehen steht ein generischer Mobilitätsplan zur Verfügung, der für die Emissionsbewertung herangezogen werden kann.

Um das mögliche Potential zur Emissionsreduktion abschätzen zu können, werden mittels einer MC mehrere Wochenmobilitätspläne für die jeweiligen Familien generiert. Für diese Erstellung werden die statistischen Kennwerte der Mobilitätsdaten genutzt, die damit eine realistische Verteilung der Fahrten über verschiedene Wochen ergibt.

Durch die Betrachtung verschiedener Fahrzeuge, Ladeleistungen und Wetterverhältnisse kann für die jeweiligen Wochen eine optimale Konfiguration von PV und Pufferspeicher errechnet werden. Ziel dieser Konfiguration ist es, möglichst viel CO₂ einzusparen, indem das BEV entweder direkt über die PV oder aber über Energie aus dem Pufferspeicher geladen wird. In Zeiten, in denen durch die PV Energie generiert wird, aber das BEV nicht geladen werden muss, wird die Energie dem Pufferspeicher zugeführt.

In einer anschließenden Szenario-Analyse wird die Auswirkung eines unterschiedlich großen Pufferspeichers auf das Emissionspotential untersucht. Es wird gezeigt, dass bereits die Nutzung eines kleinen Pufferspeichers von 2 kWh Kapazität ein großes Potential zur Emissionseinsparung bietet. Familien mit häufigen langen Fahrten erreichen optimale Emissionseinsparungen mit Pufferspeicher-Kapazitäten von 5 bis 8 kWh.

Insgesamt können durch die Nutzung eines BEV mit Ladung über PV und Pufferspeicher, abhängig vom verwendeten Fahrzeugmodell, im Mittel bis zu 75 % der CO₂-Emissionen im Vergleich zur Nutzung eines ICEV eingespart werden.

Für eine kritische Einordnung dieser Einsparungen, werden die dafür notwendigen Kostenaufwendungen diskutiert. Vor allem mit den zu erwartenden Preisentwicklungen für Batterien, die sich auf die Anschaffung des Pufferspeichers auswirken, können optimale CO₂-Einsparungen für unter 5000 € erzielt werden.

Für eine realistische Bewertung des Emissionspotentials wird abschließend die Nutzerakzeptanz betrachtet. Für diese Untersuchung wurde eine Umfrage durchgeführt. Es wird gezeigt, dass eine große Bereitschaft für die Nutzung eines BEV mit Ladung über PV und Pufferspeicher besteht. Vor allem der Aspekt der Emissionsfreiheit stößt auf große Akzeptanz. Dennoch zeigt die Umfrage auch Hemmnisse auf: Diese begründen sich in den hohen Investitionskosten und in der zu erwartenden Einschränkung des Mobilitätsverhaltens durch die Ladenotwendigkeit.

Die Arbeit endet mit dem Vorschlag von allgemeinen Empfehlungen zur Dimensionierung von PV und Pufferspeicher in Abhängigkeit des Mobilitätsverhaltens. Das BEV mit PV und Pufferspeicher in der Nutzung als Zweitfahrzeug wird als effiziente und attraktive Option vorgeschlagen, die schrittweise ausgebaut werden kann. Abschließend wird auf die Wichtigkeit der Nutzerakzeptanz für das Emissionspotential eingegangen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Anteile der Treibhausgase an den Emissionen (berechnet in CO ₂ -Äquivalenten) 2014; Gesamt: 902 Millionen Tonnen [3]	1
Abbildung 1.2	PV in Deutschland – Installierte Leistung pro Quadratkilometer [11]	3
Abbildung 2.1	Aufstellung der jährlichen Emissionen für verschiedene alltägliche Bereiche in den Vereinigten Staaten von Amerika [17]	6
Abbildung 2.2	Vergleich der mittleren CO ₂ -Emissionen pro Haushalt aus tatsächlichen Verbräuchen und der Szenario-Analyse [19]	6
Abbildung 2.3	Zusammensetzung der jährlichen CO ₂ -Emissionen des durchschnittlichen Haushalts in vier Ländern [20]	7
Abbildung 2.4	Vergleich der Verläufe von Stromverbrauch, generierter PV-Energie und Eigenverbrauch während einer Sommerwoche [22]	8
Abbildung 2.5	Zusammenhang von Stockwerken sowie Haushaltsenergieverbrauch auf den Eigenverbrauchsanteil [22]	9
Abbildung 2.6	Energieverläufe von Haushalt in Kombination mit PV und BEV [29] .	10
Abbildung 2.7	Verteilung der Nutzungshäufigkeit von PV in verschiedenen Gebäudetypen [36]	12
Abbildung 2.8	Graphische Darstellung der im Gesamtsystem relevanten Abläufe und Einflussfaktoren	14
Abbildung 3.1	Darstellung der Raum-Zeit-Geographie nach Hägerstrand [49]	16
Abbildung 3.2	Darstellung des Einflusses von Stillstandszeiten auf den Wechsel zwischen VM [78]	18
Abbildung 3.3	Darstellung typischer Geschwindigkeitsverläufe für verschiedene VM [78]	19
Abbildung 3.4	Darstellung der unterschiedlichen Typen zur Aktivitätsuntersuchung [82]	20
Abbildung 3.5	Einfluss der Wegwahl auf die Mobilitätsprädiktion [130]	22
Abbildung 3.6	Altersverteilung aller Teilnehmer im Flottenversuch; Zeitpunkt September 2013	24
Abbildung 3.7	Übersicht der Anteile der verschiedenen Familienkonstellationen im Flottenversuch (Kind jünger als 15 Jahre, Jugendlicher zwischen 15 und 25 Jahren); Zeitpunkt September 2013	24
Abbildung 3.8	Übersicht der Anteile der verschiedenen Beschäftigungskonstellationen im Flottenversuch; Zeitpunkt September 2013	25
Abbildung 3.9	Ansicht des Hauptbildschirms der im Flottenversuch zur Mobilitätsdatenaufzeichnung verwendeten Smartphone-Applikation (links) sowie der Ansicht zum Starten und Beenden der Aufzeichnung mit Elektromobilitätseinschätzung nach Beenden der Fahrt (rechts)	26
Abbildung 3.10	Ansicht des Fahrtenbuchs in chronologischer Aufzählung (links) und der Fahrtdetails zu einer einzelnen Fahrt (rechts)	27

Abbildung 3.11	Ansicht der Statistiken zum Mobilitätsverhalten: Zeitverteilung (links) und Aufenthaltshäufigkeit (rechts)	28
Abbildung 3.12	Ablauf zur automatisierten VM-Erkennung aus Fahrprofil-Rohdaten	29
Abbildung 3.13	Umfrageergebnisse zum Mobilitätsverhalten bezüglich der ÖPNV-Anbindung für tägliche Wege: <i>Wie schätzen Sie die Erreichbarkeit mit dem ÖPNV ein?</i> (n=34)	30
Abbildung 3.14	Umfrageergebnisse zum Mobilitätsverhalten bezüglich der ÖPNV-Nutzung für tägliche Wege: <i>Wie häufig nutzen Sie den ÖPNV?</i> (n=23)	30
Abbildung 3.15	Umfrageergebnisse zum Mobilitätsverhalten bezüglich verwendeten VM und Wetterverhältnissen: <i>Welche VM nutzen Sie normalerweise auf Ihrem Hinweg zur Arbeit/Ausbildungsplatz/Schule? Bitte geben Sie dabei die übliche, zeitliche Reihenfolge aller VM an, die Sie für diesen Weg benutzen.</i> (n=33)	31
Abbildung 3.16	Umfrageergebnisse zum Mobilitätsverhalten bezüglich der ÖPNV-Bewertung für tägliche Wege: <i>Bitte geben Sie zu folgenden Aussagen Ihre Einschätzung.</i> (n=22)	31
Abbildung 3.17	Graphische Darstellung der Zensus2011 Ergebnisse zum Anteil der Eigentümerquote in Bayern in Prozent [142]	32
Abbildung 3.18	Graphische Darstellung der Zensus2011 Ergebnisse zum Anteil der freistehenden Wohngebäude in Bayern in Prozent [143]	32
Abbildung 3.19	Mobilitätsverhalten bezüglich der benötigten Reichweite rund um den Fixpunkt der Heimatstadt; es wird jeweils das 75-, 95- sowie 99-Perzentil der Mobilitätsausdehnung betrachtet: Kartographische Darstellung der benötigten Reichweite (Kartendaten: Map data ©2016 GeoBasis-DE/BKG (©2009), Google)	34
Abbildung 3.20	Mobilitätsverhalten bezüglich der benötigten Reichweite rund um den Fixpunkt der Heimatstadt; es wird jeweils das 75-, 95- sowie 99-Perzentil der Mobilitätsausdehnung betrachtet: Kumulative Häufigkeit der benötigten Reichweite	34
Abbildung 3.21	Mobilitätsverhalten bezüglich der kumulierten benötigten Reichweite	35
Abbildung 3.22	Auswirkungen von häufigen Fahrten bezüglich der kumulierten benötigten Reichweite	36
Abbildung 3.23	Auswertung der Rohdaten der Mobilitätsaufzeichnung bezüglich logischer Muster im Bewegungsverhalten	38
Abbildung 3.24	Auswertung der Rohdaten der Mobilitätsaufzeichnung bezüglich Wochenlaufleistung und häufigsten Fahrten	39
Abbildung 3.25	Graphische Auswertungen einer beispielhaften Zielstatistik zum Zielort „Zuhause“	41
Abbildung 3.26	Graphische Auswertungen einer beispielhaften Zielstatistik zum Zielort „Arbeit“	42
Abbildung 3.27	Graphische Auswertungen einer beispielhaften Zielstatistik zum Zielort „Einkaufen“	43

Abbildung 3.28	Graphischer Ablaufplan zur Erstellung des Wochenmobilitätsplans..	44
Abbildung 3.29	Basierend auf den statistischen Auswertung werden innerhalb der Aufbau-logik fehlende Fahrten im Wochenmobilitätsplan aufgefüllt, um so das Zielverhalten abbilden zu können.....	45
Abbildung 3.30	Vergleich der Wochenfahrleistungen der einzelnen Familien nach Rohdaten sowie Mobilitätsplan; zum weiteren Vergleich ist erneut die Distanz der häufigsten Fahrten abgebildet.....	46
Abbildung 3.31	Zusammenhang zwischen häufigsten Distanzen und der Laufleistung nach dem Wochenmobilitätsplan; die Größe und Farbintensität der Punkte beschreibt die absolute Häufigkeit der angefahrenen Ziele und damit die Signifikanz.....	47
Abbildung 4.1	Durchschnittlicher Strompreis für einen Haushalt in $\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ 2006 bis 2016; Jahresverbrauch von 3.500 kWh; ©BDEW [148].....	49
Abbildung 4.2	Darstellung der Anschaffungskosten für verschiedene Hausspeicher; Werte: [159], [160].....	52
Abbildung 4.3	Qualitative Darstellung des technischen Wirkungsgrads $\eta_{PV,t}$ einer PV abhängig vom Neigungswinkel sowie der Ausrichtung der Anlage; der maximale technische Wirkungsgrad wird bei komplett südlicher Ausrichtung und einem Neigungswinkel von etwa 35° erreicht [165, S. 53-59] und entspricht dem durch Material und Bauart erreichbaren Wirkungsgrad; je dunkler die Farbintensität, desto höher der Wirkungsgrad.....	54
Abbildung 4.4	Eigenverbrauchs-Anteil für ungesteuerte und intelligente Ladung (3,5 kW Ladeleistung, 4 kW _p -PV) [167].....	55
Abbildung 4.5	Eigenverbrauchs-Anteil abhängig von der Verfügbarkeit eines Pufferspeichers und Ladestrategie [170].....	55
Abbildung 4.6	Mögliche mittlere Ladezeiten über alle Familien und Fahrzeugkonfigurationen gemittelt.....	59
Abbildung 4.7	Verteilung der theoretischen SOC-Werte nach Fahrtende basierend auf dem Wochenmobilitätverhalten der Familien mit einer Ladeleistung von 3,6 kW.....	59
Abbildung 4.8	Darstellung der verwendeten Globalstrahlungsverläufe für die Emissionspotential-Abschätzung.....	60
Abbildung 4.9	Graphischer Ablaufplan des Optimierungsablaufs.....	61
Abbildung 4.10	Graphischer Ablaufplan zur Erstellung der erweiterten Wochenmobilitätspläne.....	63
Abbildung 4.11	Vergleich der Wochenmuster von Roh- und Plandaten; die jeweilige Fahrdistanz zu einer Tageszeit wird durch die Punktgröße beschrieben.....	65
Abbildung 4.12	Wöchentliche Laufleistungen der generierten Wochenmobilitätspläne; zum Vergleich ist die Distanz der häufigsten Fahrten abgebildet.....	65

Abbildung 4.13	Korrelation zwischen mittlerer Wochenfahrleistung der Mobilitätspläne und den häufigsten Fahrdistanzen; die Größe und Farbin- tensität der Punkte beschreibt die absolute Häufigkeit der ange- fahrenen Ziele und damit die Signifikanz	66
Abbildung 4.14	Durchschnittliche wöchentliche Emissionen durch Nutzung eines BEV mit Netzstrom und PV; ohne Pufferspeicher; Ladeleistung 3,6 kW	68
Abbildung 4.15	Prozentuales Einsparpotential durch Nutzung eines BEV mit Netz- strom und PV; ohne Pufferspeicher; Ladeleistung 3,6 kW	68
Abbildung 4.16	Prozentuale Abweichung der optimal benötigten PV im Vergleich zur bereits vorhandenen; Ladeleistung 3,6 kW	69
Abbildung 4.17	Einsparpotential abhängig von der Ladeleistung	69
Abbildung 4.18	Beispielhafte Verteilungen der optimalen Konfigurationen basie- rend auf der MC der Wochenmobilitätspläne unter Einbeziehung der Ladeleistungen bis 11 kW	70
Abbildung 4.19	Beispielhafte Verteilungen der optimalen Konfigurationen basie- rend auf der MC der Wochenmobilitätspläne abhängig von der ge- nutzten Ladeleistung	71
Abbildung 4.20	Emissionspotential einer Familie mit hohem Mobilitätsaufkommen und langen Kernfahrten; Fahrzeug VW e-Golf; Ladeleistung 3,6 kW ..	72
Abbildung 4.21	Emissionspotential einer Familie mit niedrigem Mobilitätsaufkom- men und kurzen Kernfahrten; Fahrzeug VW e-Golf; Ladeleistung 3,6 kW	73
Abbildung 4.22	Einfluss der Ladeleistung auf das Emissionspotential bei einem verwendeten Pufferspeicher von 5 kWh; Fahrzeug VW e-Golf	73
Abbildung 4.23	Einfluss des Wetters auf das Emissionspotential bei einem ver- wendeten Pufferspeicher von 5 kWh; Fahrzeug VW e-Golf, Lade- leistung 3,6 kW	74
Abbildung 4.24	Prozentuales Emissionspotential abhängig vom verwendeten Puf- ferspeicher; optimale PV, Ladeleistung 3,6 kW	75
Abbildung 4.25	Prozentuales Emissionspotential abhängig vom verwendeten Puf- ferspeicher bezogen auf die Verwendung eines ICEV für die all- tägliche Mobilität; optimale PV, Ladeleistung 3,6 kW	76
Abbildung 4.26	Preis-Szenarien für eine Familie mit hohem Mobilitätsaufkommen ...	78
Abbildung 4.27	Preis-Szenarien für eine Familie mit niedrigem Mobilitätsaufkommen	79
Abbildung 4.28	Anschaffungspreise für optimale PV der jeweiligen Familie basie- rend auf den Szenario-Preisen	80
Abbildung 4.29	Anschaffungspreise für verschiedene Pufferspeicher-Kapazitäten basierend auf den Szenario-Preisen	80
Abbildung 5.1	Umfrageergebnisse zur Akzeptanz für zeitliche Verschiebbarkeit von Fahrten verschiedener Fahrtzwecke: <i>Inwieweit wären Sie be- reit, folgende Tätigkeiten in die Früh- oder Abendstunden zu legen, wenn die Batterie dafür tagsüber laden könnte?</i> (n=55)	85

Abbildung 5.2	Umfrageergebnisse zum gewünschten Ladezustand des BEV für Fahrten verschiedener Fahrtzwecke: <i>Mit welchem SOC der Batterie würden Sie sich bei den folgenden Fahrtzwecken zufrieden geben?</i> (n=55)	86
Abbildung 5.3	Umfrageergebnisse zur umgesetzten Ladestrategie: <i>Welche Ladestrategie würden Sie, im Hinblick auf die Umweltbelastung, mit dem Kauf eines BEV präferieren?</i> (n=55)	86
Abbildung 5.4	Umfrageergebnisse zur Bewertung des BEV-Einsatzes: <i>Folgend finden Sie verschiedenen Optionen von Fahrzeugen und deren Betrieb. Bewerten Sie diese in ihrer Gesamtheit mit den Noten 1-5 (1=beste Option, 5=schlechteste Option).</i> (n=55)	87
Abbildung 5.5	Clusteranalyse der optimal benötigten PV-Fläche abhängig von der häufigsten Fahrdistanz.....	88
Abbildung 5.6	Clusteranalyse der optimal benötigten Pufferspeicher-Kapazität abhängig von der häufigsten Fahrdistanz	89
Abbildung 5.7	Umfrageergebnisse zur Bereitschaft ein BEV als alleiniges Erstfahrzeug oder als zusätzlichen Zweitwagen zu verwenden (n=55) ...	90
Abbildung 5.8	Umfrageergebnisse zur Bereitschaft zur Umsetzung des Gesamtkonzepts: <i>Wie würden Sie Ihre aktuelle Bereitschaft zur Nutzung eines BEV und Ladung mit eigenproduziertem Solarstrom einschätzen</i> (n=55)	91
Abbildung 5.9	Umfrageergebnisse zur Einschätzung des Konzepts BEV als Zweitfahrzeug: <i>Wie stehen Sie zu den folgenden Aussagen, wenn es sich bei dem BEV inklusive PV nach wie vor um ein zusätzliches Fahrzeug zum ICEV handelt?</i> (n=55)	91

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1 Vergleich von Median, Mittelwert sowie Maximalwert der benötigten Reichweiten der 75-, 95-, 99-Perzentile von gefilterter sowie gewichteter Mobilität.....	37
Tabelle 3.2 Vorkommenshäufigkeit des Ziels „Zuhause“ in den Rohdaten der Familien	40
Tabelle 4.1 Vergleich der relativen Anschaffungskosten für verschiedene Hauspeicher; Stand 2016	52
Tabelle 4.2 Fahrzeugparametrierungen für Emissionsbewertung	57
Tabelle 4.3 Betrachtete Ladeleistungen für Emissionsbewertung	57
Tabelle 4.4 Betrachtete Intervallschritt-Kombinationen für die Berechnung eines Emissions-Kennfelds mit mittlerem Rechenaufwand	62
Tabelle 4.5 Wöchentliche mittlere CO ₂ -Emissionen basierend auf den Wochenmobilitätsplänen der Familien	66
Tabelle 4.6 Mittlere CO ₂ -Einsparpotentiale abhängig von der verwendeten Pufferspeicher-Kapazität für die betrachteten Fahrzeug-Konfigurationen.....	76
Tabelle 4.7 PV-Preise für Szenario-Bewertung (Preise für Komplettlösungen; mit $10 \frac{\text{m}^2}{\text{kW}_p}$)	77
Tabelle 4.8 Pufferspeicher-Preise für Szenario-Bewertung (Preise für Komplettlösungen).....	78

Formelzeichen

a_{PV}	m^2	Fläche der PV
E_0	W/m^2	Solarkonstante; $1367 W/m^2$
G	W/m^2	Globalstrahlung
h	-	aktuelle Tagesstunde in UTC
I	W/m^2	Sonneneinstrahlung
n_{doy}	-	Tag des Jahres
p_c	%	Bedeckungsgrad durch Wolken
$p_{c,l}$	%	Bedeckungsgrad durch Wolken auf tiefem Niveau
$p_{c,m}$	%	Bedeckungsgrad durch Wolken auf mittlerem Niveau
$p_{c,h}$	%	Bedeckungsgrad durch Wolken auf hohem Niveau
P_{PV}	kW	Leistung der PV
T_k	-	Transmissionskoeffizient
γ	rad	Höhenwinkel der Sonne über dem Horizont (Winkel zwischen Sonneneinstrahlung und horizontaler Ebene)
δ	rad	Sonnendeklinationwinkel (Winkel zwischen Sonnenzenit und Äquator)
η_{PV}	-	Anlagenwirkungsgrad der PV, bedingt durch Zelltechnologie
$\eta_{PV,t}$	-	Wirkungsgrad der PV, bedingt durch Ausrichtung und Neigung
λ	rad	Geographische Länge (West positiv, Ost negativ)
φ	rad	Geografische Breite (Nord positiv, Süd negativ)
ω	rad	Stundenwinkel der Sonne (Winkel zwischen dem geografischen Winkel der Sonne und dem Meridian)

Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeine Deutsche Automobil-Club.....	57
AP	Aufenthaltspunkt	16
BEV	Elektrofahrzeug (engl. Battery Electric Vehicle).....	2
CO₂	Kohlenstoffdioxid	1
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz.....	49
GIS	Geoinformationssystem	16
GPS	Global Positioning System.....	15
ICEV	konventionelles Verbrennerfahrzeug (engl. Internal Combustion Engine Vehicle).....	56
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change.....	1
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau	54
kW_p	Kilowatt Peak (maximale Leistung der PV).....	50
MC	Monte-Carlo-Simulation	65
MiD	Mobilität in Deutschland.....	54
OBD	On-Board-Diagnose	26
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr.....	30
Pkw	Personenkraftwagen.....	5
PV	Photovoltaik-Anlage	2
SchuKo	Schutz-Kontakt	58
SOC	Ladezustand einer Batterie (engl. State Of Charge).....	58
TZ	Teilzeit Arbeitsstelle	23
VM	Verkehrsmittel.....	16
VZ	Vollzeit Arbeitsstelle	23
V2G	Vehicle-2-Grid.....	10

Literaturverzeichnis

- [1] J. Cham, *Thesis Word Count vs. Time*, 2016, URL: <http://phdcomics.com/comics/archive.php?comid=1915>, [Online] abgerufen am: 21.04.2017.
- [2] I. P. on Climate Change, *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report*, hrsg. von O. Edenhofer u. a., Cambridge University Press, 2014.
- [3] Umweltbundesamt, *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland: Kohlendioxid-Emissionen*, 2016, URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#textpart-4>, [Online] abgerufen am: 07.12.2016.
- [4] F. Creutzig, P. Jochem, O. Y. Edelenbosch, L. Mattauch, D. P. v. Vuuren, D. McCollum und J. Minx, „Transport: A roadblock to climate change mitigation?“, *Science*, Bd. 350, Nr. 6263, S. 911–912.
- [5] B. Wolf, „0.1 Wohnen und Mobilität: Die Zukunft der Energieversorgung“, *Moderne Elektronik im Kraftfahrzeug IV*, Bd. 4, S. 1.
- [6] W. Zimmer, F. Hülsmann und K. Havers, *Stadt der Zukunft - Lebenswerte Innenstädte durch emissionsfreien Verkehr*, Working Paper, Öko-Institut e.V., 2014.
- [7] E. Verheijen und J. Jabben, „Effect of electric cars on traffic noise and safety“, *Bilthoven: RIVM*.
- [8] G. Wilkerson, R. Khalili und S. Schmid, „Urban Mobility Scaling: Lessons from “Little Data”“, *IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, eprint: 1401.0207.
- [9] D. Newman, P. Wells, C. Donovan, P. Nieuwenhuis und H. Davies, „Urban, suburban or rural: where is the best place for electric vehicles?“, *International Journal of Automotive Technology and Management*, Bd. 14, Nr. 3/4, S. 306.
- [10] H. Hanabusa und R. Horiguchi, „A Study of the Analytical Method for the Location Planning of Charging Stations for Electric Vehicles“, *Lecture Notes in Computer Science*, S. 596–605.
- [11] Strom-Report.de, *Infografik Photovoltaik in Deutschland von Strom-Report.de*, 2014, URL: <http://strom-report.de/strom-vergleich/#photovoltaik-deutschland>, [Online] abgerufen am: 07.12.2016.
- [12] H. Wirth und K. Schneider, „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland“, *Fraunhofer ISE*.
- [13] M. Wagner, K. Schönsteiner und T. Hamacher, „Impacts of Photovoltaics and Electromobility on the Singaporean Energy Sector“, *Energy Procedia*, Bd. 25, S. 126–134.
- [14] V. Wesselak und S. Voswinckel, *Photovoltaik - Wie Sonne zu Strom wird*, Springer Berlin Heidelberg, 2012.

- [15] P. Wittenbrink, „Carbon Footprint - Konzept und Ansätze zur Messung der CO₂-Emissionen“, *essentials Green Logistics - Konzept, aktuelle Entwicklungen und Handlungsfelder zur Emissionsreduktion im Transportbereich*, S. 5–11.
- [16] A. Druckman und T. Jackson, „The carbon footprint of UK households 1990-2004: A socio-economically disaggregated, quasi-multi-regional input-output model“, *Ecological Economics*, Bd. 68, Nr. 7, S. 2066–2077.
- [17] C. L. Weber und H. S. Matthews, „Quantifying the global and distributional aspects of American household carbon footprint“, *Ecological Economics*, Bd. 66, Nr. 2-3, S. 379–391.
- [18] S. Bin und H. Dowlatabadi, „Consumer lifestyle approach to US energy use and the related CO₂ emissions“, *Energy Policy*, Bd. 33, Nr. 2, S. 197–208.
- [19] A. Druckman und T. Jackson, „The bare necessities: How much household carbon do we really need?“, *Ecological Economics*, Bd. 69, Nr. 9, S. 1794–1804.
- [20] A. C. Kerkhof, R. M. Benders und H. C. Moll, „Determinants of variation in household CO₂ emissions between and within countries“, *Energy Policy*, Bd. 37, Nr. 4, S. 1509–1517.
- [21] S. Perry, J. Klemeš und I. Bulatov, „Integrating waste and renewable energy to reduce the carbon footprint of locally integrated energy sectors“, *Energy*, Bd. 33, Nr. 10, S. 1489–1497.
- [22] A. Strzalka, N. Alam, E. Duminil, V. Coors und U. Eicker, „Large scale integration of photovoltaics in cities“, *Applied Energy*, Bd. 93, S. 413–421.
- [23] D. Masa-Bote, M. Castillo-Cagigal, E. Matallanas, E. Caamaño-Martín, A. Gutiérrez, F. Monasterio-Huelín und J. Jiménez-Leube, „Improving photovoltaics grid integration through short time forecasting and self-consumption“, *Applied Energy*, Bd. 125, S. 103–113.
- [24] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson und J. Palm, „Photovoltaic self-consumption in buildings: A review“, *Applied Energy*, Bd. 142, S. 80–94.
- [25] G. Mellios, C. Samaras und L. Ntziachristos, *Projection of CO₂ emissions from road transport*, Techn. Ber., 2011.
- [26] B. Metz, S. Solomon, L. Kuijpers, S. O. Andersen, O. Davidson, J. Pons, D. de Jager, T. Kestin, M. Manning, L. Meyer u. a., „Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues related to hydrofluorocarbons and perfluorocarbons“, S. 194.
- [27] M. Ringel, „Elektromobilität als Absatzmarkt für Strom aus Erneuerbaren Energien: Möglichkeiten und Grenzen des Geschäftsmodells "Grüne Mobilität"“, *Marketing Erneuerbarer Energien*, S. 299–316.
- [28] J. Munkhammar, P. Grahn und J. Widén, „Quantifying self-consumption of on-site photovoltaic power generation in households with electric vehicle home charging“, *Solar Energy*, Bd. 97, S. 208–216.

- [29] J. Munkhammar, J. D. Bishop, J. J. Sarralde, W. Tian und R. Choudhary, „Household electricity use, electric vehicle home-charging and distributed photovoltaic power production in the city of Westminster“, *Energy and Buildings*, Bd. 86, S. 439–448.
- [30] E. Dütschke, A.-G. Paetz und J. Wesche, „Integration Erneuerbarer Energien durch Elektromobilität - inwieweit sind Konsumenten bereit, einen Beitrag zu leisten?“, *uwf*, Bd. 21, Nr. 3-4, S. 233–242.
- [31] C. Weiss, B. Chlond, M. Heilig und P. Vortisch, „Capturing the Usage of the German Car Fleet for a One Year Period to Evaluate the Suitability of Battery Electric Vehicles - A Model based Approach“, *Transportation Research Procedia*, Bd. 1, Nr. 1, S. 133–141.
- [32] R. Witzig, „Wirkungsmodellierung von Maßnahmen zur Reduktion von Energiebedarf und CO₂-Emissionen im Personenverkehr: Potentialabschätzung von Elektromobilität und Emissionshandel“, Dissertation, Fachgebiet für Siedlungsstruktur und Verkehrsplanung: Technische Universität München, 2011.
- [33] Bundesregierung, *Energiewende - CO₂-Emission*, 2014, URL: <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Lexikon/EnergieLexikon/C/2013-09-18-co2-emission.html>, [Online] abgerufen am: 13.12.2016.
- [34] M. D. Galus, G. Georges und R. A. Waraich, *Abschlussbericht des Projekts ARTEMIS: Abating Road emissions Through Efficient (electric) Mobility - Interactions with the electric System*, Techn. Ber., Zürich, 2012.
- [35] S. Kleinhüchelkotten, H.-P. Neitzke und S. Moser, *Repräsentative Erhebung von Pro-Kopf-Verbräuchen natürlicher Ressourcen in Deutschland (nach Bevölkerungsgruppen)*, hrsg. von ECOLOG-Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung, Bd. 2016, 39, Umweltbundesamt, 2016.
- [36] M. Frondel, M. Andor, N. Ritter, S. Sommer, C. Vance, P. Matuschek und M. Ute, *Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2011-2013*, Techn. Ber., Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI) und forsa Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbH, 2015.
- [37] D. Fuentes, L. Gonzalez-Abril, C. Angulo und J. Ortega, „Online motion recognition using an accelerometer in a mobile device“, *Expert Systems with Applications*, Bd. 39, Nr. 3, S. 2461–2465.
- [38] G. Hache, E. Lemaire und N. Baddour, „Mobility change-of-state detection using a smartphone-based approach“, *2010 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Apr. 2010, S. 43–46.
- [39] D. Karantonis, M. Narayanan, M. Mathie, N. Lovell und B. Celler, „Implementation of a Real-Time Human Movement Classifier Using a Triaxial Accelerometer for Ambulatory Monitoring“, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, Bd. 10, Nr. 1, S. 156–167.

- [40] J. Lester, T. Choudhury und G. Borriello, *A Practical Approach to Recognizing Physical Activities*, Springer-Verlag, 2006, S. 1–16.
- [41] G. Lyons, K. Culhane, D. Hilton, P. Grace und D. Lyons, „A description of an accelerometer-based mobility monitoring technique“, *Medical Engineering & Physics*, Bd. 27, Nr. 6, S. 497–504.
- [42] M. J. Mathie, B. G. Celler, N. H. Lovell und A. C. F. Coster, „Classification of basic daily movements using a triaxial accelerometer“, *Medical & Biological Engineering & Computing*, Bd. 42, Nr. 5, S. 679–687.
- [43] N. Shoval, G. K. Auslander, T. Freytag, R. Landau, F. Oswald, U. Seidl, H.-W. Wahl, S. Werner und J. Heinik, „The use of advanced tracking technologies for the analysis of mobility in Alzheimer’s disease and related cognitive diseases“, *BMC Geriatrics*, Bd. 8, Nr. 1, S. 7.
- [44] M. C. Gonzalez, C. A. Hidalgo und A.-L. Barabási, „Understanding individual human mobility patterns“, *Nature*, Bd. 453, S. 479–482, eprint: 0806.1256.
- [45] F. Giannotti, M. Nanni, D. Pedreschi, F. Pinelli, C. Renso, S. Rinzivillo und R. Trasarti, „Unveiling the complexity of human mobility by querying and mining massive trajectory data“, *The VLDB Journal*, Bd. 20, Nr. 5, S. 695–719.
- [46] E. Murakami und D. Wagner, „Can using global positioning system (GPS) improve trip reporting?“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 7, Nr. 2-3, S. 149–165.
- [47] A. Noulas, S. Scellato, R. Lambiotte, M. Pontil und C. Mascolo, „A tale of many cities: universal patterns in human urban mobility“, eprint: 1108.5355.
- [48] M. Sester, U. Feuerhake, C. Kuntzsch und L. Zhang, „Revealing Underlying Structure and Behaviour from Movement Data“, *KI - Künstliche Intelligenz*, Bd. 26, Nr. 3, S. 223–231.
- [49] T. Hägerstrand, „What About People in Regional Science?“, *Papers in Regional Science*, Bd. 24, Nr. 1, S. 7–24.
- [50] S.-L. Shaw, H. Yu und L. S. Bombom, „A Space-Time GIS Approach to Exploring Large Individual-based Spatiotemporal Datasets“, *Transactions in GIS*, Bd. 12, Nr. 4, S. 425–441.
- [51] P. R. Stopher und S. P. Greaves, „Household travel surveys: Where are we going?“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 41, Nr. 5, S. 367–381.
- [52] T. Pollok, E. Szczechowicz, C. Matrose, A. Schnettler, G. Stöckl, G. Kerber, M. Lödl und R. Witzmann, „Flottenversuch Elektromobilität-Netzmanagementstrategien mittels elektrifizierter Fahrzeugflotten“, *VDE-Kongress 2010*, VDE VERLAG GmbH, 2010.
- [53] Y. Asakura und T. Iryo, „Analysis of tourist behaviour based on the tracking data collected using a mobile communication instrument“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 41, Nr. 7, S. 684–690.

- [54] S. Mavoia, M. Oliver, K. Witten und H. M. Badland, „Linking GPS and travel diary data using sequence alignment in a study of children’s independent mobility“, *International Journal of Health Geographics*, Bd. 10, Nr. 1, S. 64.
- [55] C. A. Quiroga und D. Bullock, „Travel time studies with global positioning and geographic information systems: an integrated methodology“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 6, Nr. 1-2, S. 101–127.
- [56] K. Farrahi und D. Gatica-Perez, „Discovering routines from large-scale human locations using probabilistic topic models“, *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.* Bd. 2, Nr. 1, S. 1–27.
- [57] Y. Byon, A. Shalaby und B. Abdulhai, „Travel Time Collection and Traffic Monitoring Via GPS Technologies“, *2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*.
- [58] Y. Asakura und E. Hato, „Tracking survey for individual travel behaviour using mobile communication instruments“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 12, Nr. 3-4, S. 273–291.
- [59] J. Ritzer und M. Lienkamp, „Erfassung von Positions- und Bewegungsdaten von Fahrzeugen mit Hilfe von Smartphones“, *Smartphones unterstützen die Mobilitätsforschung - Neue Einblicke in das Mobilitätsverhalten durch Wege-Tracking*, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014.
- [60] X. Wu, K. N. Brown und C. J. Sreenan, *Analysis of Smartphone User Mobility Traces for Opportunistic Data Collection*, Techn. Ber., 2012, Mobile Data Challenge 2012 (by Nokia) Workshop, Juni 2012.
- [61] E. Mok, G. Retscher und C. Wen, „Initial test on the use of GPS and sensor data of modern smartphones for vehicle tracking in dense high rise environments“, *2012 Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation, and Location Based Service (UPINLBS)*.
- [62] P. Nitsche, P. Widhalm, S. Breuss und P. Maurer, „A Strategy on How to Utilize Smartphones for Automatically Reconstructing Trips in Travel Surveys“, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Bd. 48, S. 1033–1046.
- [63] P. Pluvinet, J. Gonzalez-Feliu und C. Ambrosini, „GPS Data Analysis for Understanding Urban Goods Movement“, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Bd. 39, S. 450–462.
- [64] Y. Liu, C. Kang, S. Gao, Y. Xiao und Y. Tian, „Understanding intra-urban trip patterns from taxi trajectory data“, *Journal of Geographical Systems*, Bd. 14, Nr. 4, S. 463–483.
- [65] B. Jäger, R. Schawohl, W. Christl, F. Bachmann, M. Hann, J. Betz, C. Frank und M. Lienkamp, *VEM - Virtuelle Elektromobilität im Taxi- und Gewerbeverkehr München: neuartiger Ansatz zur Untersuchung von technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten einer elektrifizierten Fahrzeugflotte*, Abschlussbericht, Technische Universität München, Juni 2016.

- [66] P. Gonzalez, J. Weinstein, S. Barbeau, M. Labrador, P. Winters, N. Georggi und R. Perez, „Automating mode detection for travel behaviour analysis by using global positioning systems-enabled mobile phones and neural networks“, *IET Intelligent Transport Systems*, Bd. 4, Nr. 1, S. 37.
- [67] N. Schuessler und K. W. Axhausen, „Processing Raw Data from Global Positioning Systems Without Additional Information“, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Bd. 2105, Nr. -1, S. 28–36.
- [68] P. Widhalm, P. Nitsche und N. Brandie, „Transport mode detection with realistic Smartphone sensor data“, *Pattern Recognition (ICPR), 2012 21st International Conference on*, 2012, S. 573–576.
- [69] D. Xu, G. Song, P. Gao, R. Cao, X. Nie und K. Xie, *Transportation Modes Identification from Mobile Phone Data Using Probabilistic Models*, Springer-Verlag, 2011, S. 359–371.
- [70] S. Reddy, M. Mun, J. Burke, D. Estrin, M. Hansen und M. Srivastava, „Using mobile phones to determine transportation modes“, *TOSN*, Bd. 6, Nr. 2, S. 1–27.
- [71] H. Gong, C. Chen, E. Bialostozky und C. T. Lawson, „A GPS/GIS method for travel mode detection in New York City“, *Computers, Environment and Urban Systems*, Bd. 36, Nr. 2, S. 131–139.
- [72] L. Liao, D. J. Patterson, D. Fox und H. Kautz, „Learning and inferring transportation routines“, *Artificial Intelligence*, Bd. 171, Nr. 5-6, S. 311–331.
- [73] J. Wu, C. Jiang, D. Houston, D. Baker und R. Delfino, „Automated time activity classification based on global positioning system (GPS) tracking data“, *Environmental Health*, Bd. 10, Nr. 1, S. 101.
- [74] L. Stenneth, O. Wolfson, P. S. Yu und B. Xu, „Transportation mode detection using mobile phones and GIS information“, *Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems - GIS '11*.
- [75] Y. Zheng, Q. Li, Y. Chen, X. Xie und W.-Y. Ma, „Understanding mobility based on GPS data“, *Proceedings of the 10th international conference on Ubiquitous computing - UbiComp '08*.
- [76] Y. Zheng, L. Liu, L. Wang und X. Xie, „Learning transportation mode from raw gps data for geographic applications on the web“, *Proceeding of the 17th international conference on World Wide Web - WWW '08*.
- [77] Y. Zheng, Y. Chen, Q. Li, X. Xie und W.-Y. Ma, „Understanding transportation modes based on GPS data for web applications“, *ACM Transactions on the Web*, Bd. 4, Nr. 1, S. 1–36.
- [78] L. Zhang, S. Dalyot, D. Eggert und M. Sester, „Multi-stage approach to travel-mode segmentation and classification of GPS traces“, *ISPRS Workshop on Geospatial Data Infrastructure*, 2008, S. 87–93.

- [79] J. Wolf, R. Guensler und W. Bachman, „Elimination of the Travel Diary: Experiment to Derive Trip Purpose from Global Positioning System Travel Data“, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Bd. 1768, S. 125–134.
- [80] Y. Zheng, L. Zhang, X. Xie und W.-Y. Ma, „Mining interesting locations and travel sequences from GPS trajectories“, *Proceedings of the 18th international conference on World wide web - WWW '09*.
- [81] J. Du und L. Aultman-Hall, „Increasing the accuracy of trip rate information from passive multi-day GPS travel datasets: Automatic trip end identification issues“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 41, Nr. 3, S. 220–232.
- [82] K. Ellegård, „A time-geographical approach to the study of everyday life of individuals – a challenge of complexity“, *GeoJournal*, Bd. 48, Nr. 3, S. 167–175.
- [83] Q. Wang, H. Huo, K. He, Z. Yao und Q. Zhang, „Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in Chinese cities“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 13, Nr. 5, S. 289–297.
- [84] B. Y. Liaw, „Fuzzy Logic Based Driving Pattern Recognition for Driving Cycle Analysis“, *Journal of Asian Electric Vehicles*, Bd. 2, Nr. 1, S. 551–556.
- [85] B. Adornato, R. Patil, Z. Filipi, Z. Baraket und T. Gordon, „Characterizing naturalistic driving patterns for Plug-in Hybrid Electric Vehicle analysis“, *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Institute of Electrical und Electronics Engineers, Sep. 2009, S. 655–660.
- [86] E. Ericsson, „Variability in urban driving patterns“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 5, Nr. 5, S. 337–354.
- [87] K. G. Goulias, „Longitudinal analysis of activity and travel pattern dynamics using generalized mixed Markov latent class models“, *Transportation Research Part B: Methodological*, Bd. 33, Nr. 8, S. 535–558.
- [88] G. Andrienko, N. Andrienko und S. Wrobel, „Visual analytics tools for analysis of movement data“, *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, Bd. 9, Nr. 2, S. 38.
- [89] G. Andrienko und N. Andrienko, „Poster: Dynamic time transformation for interpreting clusters of trajectories with space-time cube“, *2010 IEEE Symposium on Visual Analytics Science and Technology*.
- [90] J. Biagioni und J. Krumm, „Days of Our Lives: Assessing Day Similarity from Location Traces“, *Lecture Notes in Computer Science*, S. 89–101.
- [91] K. Ahn, H. Rakha, A. Trani und M. Van Aerde, „Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels“, *Journal of Transportation Engineering*, Bd. 128, Nr. 2, S. 182–190.
- [92] M. André, R. Joumard, R. Vidon, P. Tassel und P. Perret, „Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars“, *Atmospheric Environment*, Bd. 40, Nr. 31, S. 5944–5953.

- [93] K. Chen, W. Wang, H. Chen, C. Lin, H. Hsu, J. Kao und M. Hu, „Motorcycle emissions and fuel consumption in urban and rural driving conditions“, *Science of The Total Environment*, Bd. 312, Nr. 1-3, S. 113–122.
- [94] E. Ericsson, „Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 6, Nr. 5, S. 325–345.
- [95] A. Fotouhi und G. M. Montazeri, „An Investigation on Vehicle’s Fuel consumption and Exhaust Emissions in Different Driving Conditions“, *International Journal of Environmental Research*, Bd. 6, Nr. 1, S. 61–70.
- [96] B. A. Holmén und D. A. Niemeier, „Characterizing the effects of driver variability on real-world vehicle emissions“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 3, Nr. 2, S. 117–128.
- [97] R. Kumar, B. Durai, W. Saleh und C. Boswell, „Comparison and evaluation of emissions for different driving cycles of motorcycles: A note“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 16, Nr. 1, S. 61–64.
- [98] V. Manzoni, D. Maniloff, K. Kloeckl und C. Ratti, „Transportation mode identification and real-time CO₂ emission estimation using smartphones“, *SENSEable City Lab, Massachusetts Institute of Technology*, nd.
- [99] K. Nesamani und K. Subramanian, „Impact of Real-World Driving Characteristics on Vehicular Emissions“, *JSME International Journal Series B*, Bd. 49, Nr. 1, S. 19–26.
- [100] W. Ochieng u. a., „Integration of GPS and dead reckoning for real-time vehicle performance and emissions monitoring“, English, *GPS Solutions*, Bd. 6, Nr. 4, S. 229–241.
- [101] H. Rakha und Y. Ding, „Impact of Stops on Vehicle Fuel Consumption and Emissions“, *Journal of Transportation Engineering*, Bd. 129, Nr. 1, S. 23–32.
- [102] B. Afotey, M. Sattler, S. P. Mattingly und V. C. P. Chen, „Statistical Model for Estimating Carbon Dioxide Emissions from a Light-Duty Gasoline Vehicle“, *Journal of Environmental Protection*, Bd. 04, Nr. 08, S. 8–15.
- [103] M. André und M. Rapone, „Analysis and modelling of the pollutant emissions from European cars regarding the driving characteristics and test cycles“, *Atmospheric Environment*, Bd. 43, Nr. 5, S. 986–995.
- [104] A. Cappiello, I. Chabini, E. Nam, A. Lue und M. Abou Zeid, „A statistical model of vehicle emissions and fuel consumption“, *Proceedings. The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*.
- [105] M. Shafie-Pour und A. Tavakoli, „On-Road Vehicle Emissions Forecast Using IVE Simulation Model“, *International Journal of Environmental Research*, Bd. 7, Nr. 2, S. 367–376.

- [106] H. Wang, L. Fu, Y. Zhou und H. Li, „Modelling of the fuel consumption for passenger cars regarding driving characteristics“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 13, Nr. 7, S. 479–482.
- [107] H. Helms, M. Pehnt, U. Lambrecht und A. Liebich, „Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions“, *18th International Symposium Transport and Air Pollution*, 2010.
- [108] C. Lorf, R. F. Martínez-Botas, D. A. Howey, L. Lytton und B. Cussons, „Comparative analysis of the energy consumption and CO₂ emissions of 40 electric, plug-in hybrid electric, hybrid electric and internal combustion engine vehicles“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 23, S. 12–19.
- [109] P. Plötz, S. Funke und P. Jochem, *Real-world fuel economy and CO₂ emissions of plug-in hybrid electric vehicles*, Working Paper, Fraunhofer ISI, 2015.
- [110] M. De Gennaro, E. Paffumi, H. Scholz und G. Martini, „Analysis and assessment of the electrification of urban road transport based on real-life mobility data“, *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*.
- [111] T. Gnann, P. Plötz, F. Zischler und M. Wietschel, *Elektromobilität im Personenwirtschaftsverkehr – eine Potenzialanalyse*, Working Paper, Fraunhofer ISI, 2012.
- [112] J. Lohrer und M. Lienkamp, „An approach for predicting vehicle velocity in combination with driver turns“, *Automotive and Engine Technology*, Bd. 1, Nr. 1-4, S. 27–33.
- [113] M. Elhenawy, H. Chen und H. A. Rakha, „Dynamic travel time prediction using data clustering and genetic programming“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 42, S. 82–98.
- [114] W. Yin, P. Murray-Tuite, S. V. Ukkusuri und H. Gladwin, „An agent-based modeling system for travel demand simulation for hurricane evacuation“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 42, S. 44–59.
- [115] M. D. Ribeiro, A. M. Larrañaga, J. Arellana und H. B. Cybis, „Influence of GPS and Self-reported Data in Travel Demand Models“, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Bd. 162, S. 467–476.
- [116] S. Isaacman, R. Becker, R. Cáceres, M. Martonosi, J. Rowland, A. Varshavsky und W. Willinger, „Human mobility modeling at metropolitan scales“, *Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services - MobiSys '12*.
- [117] X. Lu, E. Wetter, N. Bharti, A. J. Tatem und L. Bengtsson, „Approaching the Limit of Predictability in Human Mobility“, *Scientific Reports*, Bd. 3.
- [118] A. Sadilek und J. Krumm, „Far Out: Predicting Long-Term Human Mobility“.
- [119] A. M. Semeida, „Derivation of travel demand forecasting models for low population areas: the case of Port Said Governorate, North East Egypt“, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, Bd. 1, Nr. 3, S. 196–208.

- [120] C. Song, Z. Qu, N. Blumm und A.-L. Barabási, „Limits of Predictability in Human Mobility“, *Science*, Bd. 327, Nr. 5968, S. 1018–1021.
- [121] D. Ashbrook und T. Starner, „Using GPS to learn significant locations and predict movement across multiple users“, *Personal and Ubiquitous Computing*, Bd. 7, Nr. 5, S. 275–286.
- [122] J. Bowman und M. Ben-Akiva, „Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Bd. 35, Nr. 1, S. 1–28.
- [123] P. S. Castro, D. Zhang und S. Li, *Urban Traffic Modelling and Prediction Using Large Scale Taxi GPS Traces*, Springer-Verlag, 2012, S. 57–72.
- [124] Y. Chon, H. Shin, E. Talipov und H. Cha, „Evaluating mobility models for temporal prediction with high-granularity mobility data“, *2012 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications*.
- [125] J. Krumm und A. J. B. Brush, „Learning Time-Based Presence Probabilities“, *Pervasive Computing*, S. 79–96.
- [126] V. Etter, M. Kafsi, E. Kazemi, M. Grossglauser und P. Thiran, „Where to go from here? Mobility prediction from instantaneous information“, *Pervasive and Mobile Computing*, Bd. 9, Nr. 6, S. 784–797.
- [127] J. Krumm, R. Caruana und S. Counts, „Learning Likely Locations“, *Lecture Notes in Computer Science*, S. 64–76.
- [128] W. Mathew, R. Raposo und B. Martins, „Predicting future locations with hidden Markov models“, *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing - UbiComp '12*.
- [129] A. Monreale, F. Pinelli, R. Trasarti und F. Giannotti, „Where Next: a Location Predictor on Trajectory Pattern Mining“, *Proceedings of the 15th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining - KDD '09*.
- [130] W. Recker, „A bridge between travel demand modeling and activity-based travel analysis“, *Transportation Research Part B: Methodological*, Bd. 35, Nr. 5, S. 481–506.
- [131] S. Scellato, M. Musolesi, C. Mascolo, V. Latora und A. T. Campbell, „NextPlace: A Spatio-temporal Prediction Framework for Pervasive Systems“, *Pervasive Computing*, S. 152–169.
- [132] T. M. T. Do und D. Gatica-Perez, „Contextual conditional models for smartphone-based human mobility prediction“, *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing - UbiComp '12*.
- [133] N. Eagle und A. S. Pentland, „Eigenbehaviors: identifying structure in routine“, *Behavioral Ecology and Sociobiology*, Bd. 63, Nr. 7, S. 1057–1066.
- [134] P. Naghshtabrizi, J. Kristinsson, H. Yu und R. McGee, „Distance Until Charge prediction and fuel economy impact for Plug-in Hybrid Vehicles“, *Proceedings of the 2011 American Control Conference*.

- [135] A. Vij und K. Shankari, „When is big data big enough? Implications of using GPS-based surveys for travel demand analysis“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Bd. 56, S. 446–462.
- [136] M. Kugler, C. Frank, S. Osswald, M. Miramontes, J. Kinigadner und M. Lienkamp, *sun2car@GAP - Untersuchung des Kundenannahmeverhaltens zur Integration von Erneuerbarer Energie in Elektrofahrzeuge innerhalb der e-GAP Modellkommune Garmisch-Partenkirchen*, Abschlussbericht, Technische Universität München, Feb. 2016.
- [137] M. Kugler, S. Osswald, C. Frank und M. Lienkamp, „Mobility Tracking System for CO₂ Footprint Determination“, *Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '14*.
- [138] M. Vogt und S. Bongard, *Treiber und Hemmnisse bei der Anschaffung von Elektroautos - Ergebnisse der Nutzerbefragung von elektromobilitätsinteressierten Personen im Rahmen der Begleit- und Wirkungsforschung*, Ergebnispapier, Frankfurt: Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW), 2015.
- [139] Haufe, *Betankung von Elektroautos in der gemeinschaftlichen Tiefgarage*, 2013, URL: https://www.haufe.de/immobilien/verwalterpraxis/betankung-von-elektroautos-in-der-gemeinschaftlichen-tiefgarage_idesk_PI9865_HI3548745.html, [Online] abgerufen am: 25.10.2016.
- [140] *Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Wohnungseigentumsgesetzes und des Bürgerlichen Gesetzbuchs zur Förderung der Barrierefreiheit und Elektromobilität*, Antrag der Länder Bayern, Sachsen und Hessen, 2016, URL: <http://www.bundesrat.de/bv.html?id=0340-16>, [Online] abgerufen am: 25.10.2016.
- [141] J. Bögel, F. Mesecke und C. Schult, „Gebäude- und Wohnungsbestand in Deutschland“, *Zensus 2011*, Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2015.
- [142] *Eigentümerquote für Bayern*, Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014, URL: <https://ergebnisse.zensus2011.de/#MapContent:09,W247>, [Online] abgerufen am: 25.10.2016.
- [143] *Anteil der freistehenden Wohngebäude für Bayern*, Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2014, URL: <https://ergebnisse.zensus2011.de/#MapContent:09,G157>, [Online] abgerufen am: 25.10.2016.
- [144] J. Neubauer und E. Wood, „The impact of range anxiety and home, workplace, and public charging infrastructure on simulated battery electric vehicle lifetime utility“, *Journal of Power Sources*, Bd. 257, S. 12–20.
- [145] N. Rauh, T. Franke und J. F. Krems, „Understanding the Impact of Electric Vehicle Driving Experience on Range Anxiety“, *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Bd. 57, Nr. 1, S. 177–187.

- [146] M. Kugler, S. Osswald, C. Frank und M. Lienkamp, „Assessment of Electromobility in Non-Urban Environments“, *Conference on Future Automotive Technology*, 2015.
- [147] M. Kugler und M. Lienkamp, „Development of a Mobility Demand Model for Private Usage under Non-Urban Conditions“, *20th European Conference on Mobility Management - ECOMM 2016*, 2016.
- [148] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., *Energiedaten - Strompreis für Haushalte*, 2016, URL: https://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_Energiedaten#cat/Daten%2FGrafiken%5CEnergie%20allgemein%5CEnergiedaten%5C3.%20Stromversorgung/3-15-strompreis-fuer-haushalte, [Online] abgerufen am: 10.01.2017.
- [149] Bundesministerium der Justiz, *Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG)*, 2008, URL: https://www.clearingstelle-eeg.de/files/EEG_2009_Urfassung_juris_0.pdf.
- [150] Bundesministerium der Justiz, *Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017)*, 2014, URL: https://www.clearingstelle-eeg.de/files/EEG_2009_Urfassung_juris_0.pdf.
- [151] Allgäuer Überlandwerk GmbH, *econnect eE-Tour Allgäu - SmartFacility*, 2016, URL: <http://www.ee-tour.de/smartfacility>, [Online] abgerufen am: 11.01.2017.
- [152] Avacon AG, *e-home Energieprojekt 2020*, 2016, URL: <http://www.ehomeprojekt.de/>, [Online] abgerufen am: 11.01.2017.
- [153] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung und Fraunhofer IRB, *Effizienzhaus Plus*, 2016, URL: <http://www.forschungsinitiative.de/effizienzhaus-plus/>, [Online] abgerufen am: 11.01.2017.
- [154] Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, *e-MOBILie - Schaufenster Elektromobilität Energieautarke Elektromobilität im Smart-Micro-Grid*, 2016, URL: <http://www.ewk.ei.tum.de/forschung/projekte/e-mobilie/>, [Online] abgerufen am: 11.01.2017.
- [155] F. Dimroth, *Solarzelle mit 46 % Wirkungsgrad - neuer Weltrekord; Französisch-deutsche Kooperation bestätigt Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Photovoltaikindustrie*, Presseinformation 26/14, Fraunhofer ISE, 2014.
- [156] C. Märkel, *Solaranlagen Preise für Photovoltaik- und Solarthermie-Anlagen*, 2016, URL: <http://www.solaranlagen-portal.com/solar/solaranlage/preise>, [Online] abgerufen am: 10.01.2017.
- [157] *Photovoltaik-Kosten*, 2017, URL: <http://www.photovoltaiksolarstrom.de/photovoltaik-kosten>, [Online] abgerufen am: 11.01.2017.
- [158] P. Stenzel, J. Fleer und J. Linssen, „Elektrochemische Speicher“, *Energietechnologien der Zukunft*, S. 157–214.
- [159] *Photovoltaik4All - Speicher*, 2017, URL: <http://www.photovoltaik4all.de/speicher/>, [Online] abgerufen am: 11.01.2017.

- [160] *Solarladen - Preisvergleichsliste Batteriespeichersysteme bei TST*, 2016, URL: <http://www.solarladen.de/tst-pv-produkte/preisvergleich/speichersysteme>, [Online] abgerufen am: 11.01.2017.
- [161] *Solarstromspeicher-Preismonitor Deutschland - Ergebnisse 2. Halbjahr 2014* 2014.
- [162] J. Rost, „Vergleichende Analyse der Energiebilanz zweier Untersuchungsflächen der Landnutzungen „Grasland“ und „Wald“ in der südlichen Oberrheinebene“, Diss., Meteorologisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2004.
- [163] R. Stull, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Springer Nature, 1988.
- [164] D. Burridge und A. Gadd, *The Meteorological Office operational 10-level numerical weather prediction model (December 1975)*, English, London : H.M.S.O, 1977, URL: <http://trove.nla.gov.au/work/8531497?selectedversion=NBD1261031>.
- [165] K. Mertens, *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologien und Praxis*, Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verlag, 2011, URL: <https://books.google.de/books?id=EVLFXwAACAAJ>.
- [166] Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW), *KfW-Programm Erneuerbare Energien „Speicher“*, im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, 2016, URL: [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-%E2%80%93-Speicher-\(275\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/F%C3%B6rderprodukte/Erneuerbare-Energien-%E2%80%93-Speicher-(275)/), [Online] abgerufen am: 13.01.2017.
- [167] M. Mierau, D. Noeren und F. Becker, *Potential der Ladung von Elektrofahrzeugen durch Photovoltaikenergie im Privathaushalt*, Fraunhofer ISE, 2014.
- [168] Institut für angewandte Sozialwissenschaft (infas), Institut für Verkehrsforschung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), IVT Research und infas 360, *Mobilität in Deutschland (MiD)*, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2008, URL: <http://www.mobilitaet-in-deutschland.de/index.html>, [Online] abgerufen am: 13.01.2017.
- [169] M. van der Kam und W. van Sark, „Smart charging of electric vehicles with photovoltaic power and vehicle-to-grid technology in a microgrid; a case study“, *Applied Energy*, Bd. 152, S. 20–30.
- [170] M. Castillo-Cagigal, E. Caamaño-Martín, E. Matallanas, D. Masa-Bote, A. Gutiérrez, F. Monasterio-Huelin und J. Jiménez-Leube, „PV self-consumption optimization with storage and Active DSM for the residential sector“, *Solar Energy*, Bd. 85, Nr. 9, S. 2338–2348.
- [171] P. Nobis, F. Samweber und S. Fischhaber, „PV-Eigenverbrauch mit Elektrofahrzeugen und Hausspeichersystemen“, *IEWT Wien 2015*, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V, 2015.
- [172] T. Tjaden, J. Weniger, J. Bergner, F. Schnorr und V. Quaschnig, „Einfluss des Standorts und des Nutzerverhaltens auf die energetische Bewertung von PV-Speichersystemen“, *29. Symposium Photovoltaische Solarenergie*, 2014.

- [173] P. Wellbrock, M. Fette, J. Gabriel und K. Janßen, *Bewertung der CO₂-Emissionen von Elektrofahrzeugen - Stand der wissenschaftlichen Debatte*, Techn. Ber., Bremer Energie Institut, Sep. 2011.
- [174] U. Tietge, S. Díaz, P. Mock, J. German, A. Bandivadekar und N. Ligterink, *Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen neuer Pkw in der EU - Prüfstand versus Realität*, Techn. Ber., International Council on Clean Transportation (ICCT), 2016.
- [175] S. Radke, *Verkehr in Zahlen 2014/2015*, Techn. Ber., Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2014.
- [176] G. Hensler, J. Hochhuber und V. Linckh, *Leitfaden für effiziente Energienutzung in Industrie und Gewerbe*, 2009.
- [177] BMW AG, *BMW i3 Antrieb & Technik*, 2017, URL: <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2015/antrieb-technik.html>, [Online] abgerufen am: 17.01.2017.
- [178] M. Brand, *ADAC Autotest BMW i3*, Techn. Ber., ADAC, 2013.
- [179] Volkswagen AG, *VWe-golf2017 - Technik und Preise*, Techn. Ber., Volkswagen AG, 2016.
- [180] S. Giuliani, *ADAC Autotest VW e-Golf*, Techn. Ber., ADAC, 2014.
- [181] P. Icha und G. Kuhs, *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015*, Techn. Ber., Umweltbundesamt, 2016.
- [182] SWM Versorgungs GmbH, *Energie für die Wirtschaft - M/ Ökostrom*, Techn. Ber., 2014.
- [183] R. Freire, J. Delgado, J. M. Santos und A. T. de Almeida, „Integration of renewable energy generation with EV charging strategies to optimize grid load balancing“, *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*.
- [184] L. Kessler und K. Bogenberger, „Mobility patterns and charging behavior of BMW i3 customers“, *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*.
- [185] M. Kugler und M. Lienkamp, „Parametric evaluation of emission savings potential based on a mobility demand model“, *Air Pollution XXIV*.
- [186] W. Brazil, B. Caulfield und N. Rieser-Schüssler, „Understanding carbon: Making emissions information relevant“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Bd. 19, S. 28–33.
- [187] A. Taniguchi, F. Hara, S. E. Takano, S. I. Kagaya und S. Fujii, „Psychological and Behavioral Effects of Travel Feedback Program for Travel Behavior Modification“, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Bd. 1839, S. 182–190.

- [188] D.-J. Moon und C.-H. Park, „Cost functions for multiple transportation modes in the presence of congestion“, *The Annals of Regional Science*, Bd. 36, Nr. 2, S. 315–346.
- [189] D. J. Vanier und R. R. Trippi, „Consumer choice consistency in transportation decisions“, *Journal of the Academy of Marketing Science*, Bd. 4, Nr. 3, S. 617–630.
- [190] K. Götz, G. Sunderer, B. Birzle-Harder und J. Deffner, „Attraktivität und Akzeptanz von Elektroautos“, *Institut für sozial-ökologische Forschung*, S. 8.
- [191] L. Fazel, „Akzeptanz von Elektromobilität - Entwicklung und Validierung eines Modells unter Berücksichtigung der Nutzungsform des Carsharing“, Diss., Technische Universität Chemnitz, 2014.
- [192] I. Frenzel, J. Jarass, S. Trommer und B. Lenz, *Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland - Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung*, Berlin: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), 2015.
- [193] H. Jonuschat, M. Wölk und V. Handke, *Untersuchung zur Akzeptanz von Elektromobilität als Stellglied im Stromnetz*, Berlin: Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), 2012.
- [194] B. Reuter, „Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten zur Rohstoff- und Technologieauswahl für Elektrofahrzeuge“, Diss., Technische Universität München, 2016.
- [195] Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, *Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen*, 2009, URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex:32009R0443>, [Online] abgerufen am: 16.02.2017.

Verzeichnis eigener Veröffentlichungen im Kontext der Promotion

- [136] M. Kugler, C. Frank, S. Osswald, M. Miramontes, J. Kinigadner und M. Lienkamp, *sun2car@GAP - Untersuchung des Kundenannahmeverhaltens zur Integration von Erneuerbarer Energie in Elektrofahrzeuge innerhalb der e-GAP Modellkommune Garmisch-Partenkirchen*, Abschlussbericht, Technische Universität München, Feb. 2016.
- [137] M. Kugler, S. Osswald, C. Frank und M. Lienkamp, „Mobility Tracking System for CO₂ Footprint Determination“, *Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '14*.
- [146] M. Kugler, S. Osswald, C. Frank und M. Lienkamp, „Assessment of Electromobility in Non-Urban Environments“, *Conference on Future Automotive Technology*, 2015.
- [147] M. Kugler und M. Lienkamp, „Development of a Mobility Demand Model for Private Usage under Non-Urban Conditions“, *20th European Conference on Mobility Management - ECOMM 2016*, 2016.
- [185] M. Kugler und M. Lienkamp, „Parametric evaluation of emission savings potential based on a mobility demand model“, *Air Pollution XXIV*.

Studentische Arbeiten

Während der Anfertigung dieser Dissertation wurden diverse studentische Arbeiten betreut. Im Folgenden sind die für diese Arbeit relevanten Bachelor-, Semester- und Masterarbeiten aufgeführt. Vielen Dank geht hier an die Bearbeiter für die umfangreiche Unterstützung im Rahmen dieses Forschungsprojekts.

- [196] T. Templer, „Offline-Erkennung genutzter Verkehrsmittel basierend auf Fahrprofil-Kennwerten“, unveröffentlichte Semesterarbeit, Technische Universität München, 2013.
- [197] B. Bencsik, „Potenziale und Grenzen im Nutzerverhalten der Elektromobilität zum Beitrag der Integration von Solarstrom“, Masterarbeit, Technische Universität München, 2016.
- [198] D. Schwegler, „Dynamische Separation von Bewegungsprofilen auf Basis von GPS-Daten“, unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München, 2013.
- [199] C. Angerer, „Entwicklung und Evaluation einer systematischen Emissionslandkarte auf Basis des Mobilitätsverhaltens“, unveröffentlichte Semesterarbeit, Technische Universität München, 2014.
- [200] C. Seitz, „Analyse der optimalen Fahrtantrittszeiten im individuellen Mobilitätsverhalten unter Berücksichtigung erneuerbarer Energien“, unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München, 2015.
- [201] J. Jung, „Analyse des Ladeverhaltens von privaten Elektrofahrzeugen“, unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München, 2015.
- [202] C. Paulus, „Charakterisierung und Evaluation von Stillstandszeiten und Unterbrechungen im Mobilitätsverhalten“, unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München, 2015.
- [203] M. Petersen, „Analyse des Ladeverhaltens von privaten Elektrofahrzeugen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit“, unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München, 2015.
- [204] F. Bock, „Analyse, Bestimmung sowie parametrische Evaluation des Emissionspotentials im privaten Mobilitätsverhalten“, Masterarbeit, Technische Universität München, 2015.
- [205] C. Eder, „Analyse von Mobilitätsmustern und Verknüpfung mit Kartendaten zur Bestimmung übergeordneter Fahrtzwecke“, unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München, 2015.
- [206] G. Milani, „Analyse des Ladeverhaltens von privaten Elektrofahrzeugen unter Berücksichtigung des Mobilitätsverhaltens“, unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München, 2016.

- [207] A. Schreiner, „Entwicklung eines Mobilitätsplans - Verifikation und Validierung der alltäglichen Mobilität“, unveröffentlichte Bachelorarbeit, Technische Universität München, 2016.
- [208] P. Albrecht, „Wirtschaftliche Optimierung von emissionsarmer privater Mobilität in Verbindung mit Photovoltaikanlage und hausinternem Speicher“, unveröffentlichte Semesterarbeit, Technische Universität München, 2016.
- [209] L. Merkle, „Klassifizierung sowie Potentialbewertung der Variabilität im täglichen Mobilitätsverhalten“, unveröffentlichte Semesterarbeit, Technische Universität München, 2016.

A. Anhang

A.1. Rechenaufwand Optimierungsprozess

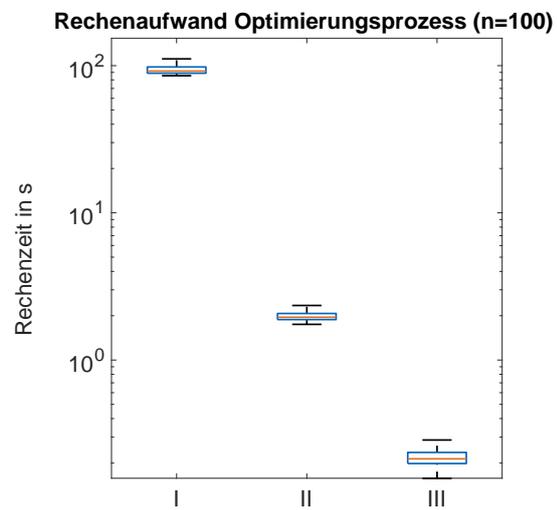


Abbildung A.1 Vergleich des Rechenaufwands pro Emissions-Kennfeld für die verschiedenen Intervall-schritt-Kombinationen I bis III

A.2. Ausgangslage Emissionen

Durchschnittliche wöchentliche Emissionen durch Nutzung eines BEV mit Netzstrom und PV unterschieden nach verwendeter Ladeleistung.

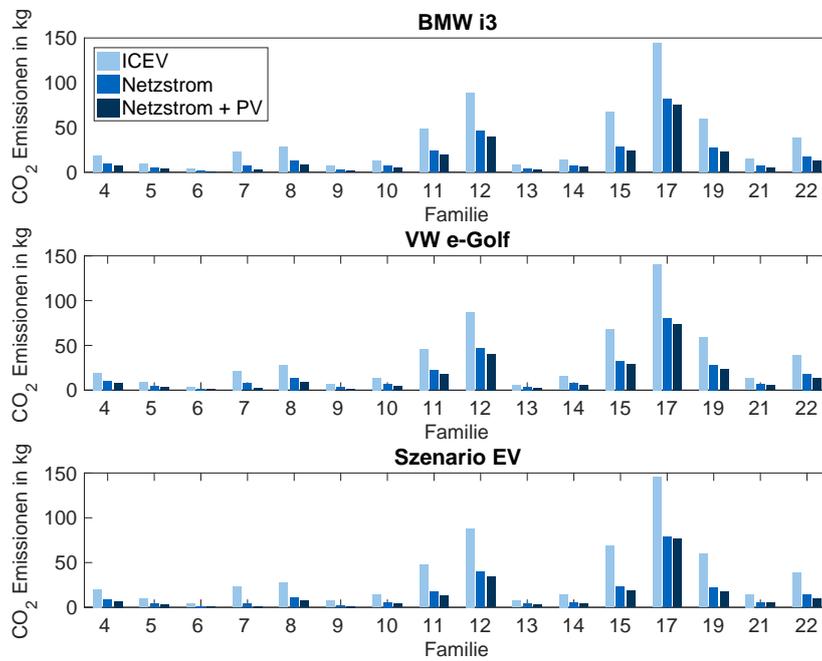


Abbildung A.2 Ladeleistung 2,3 kW

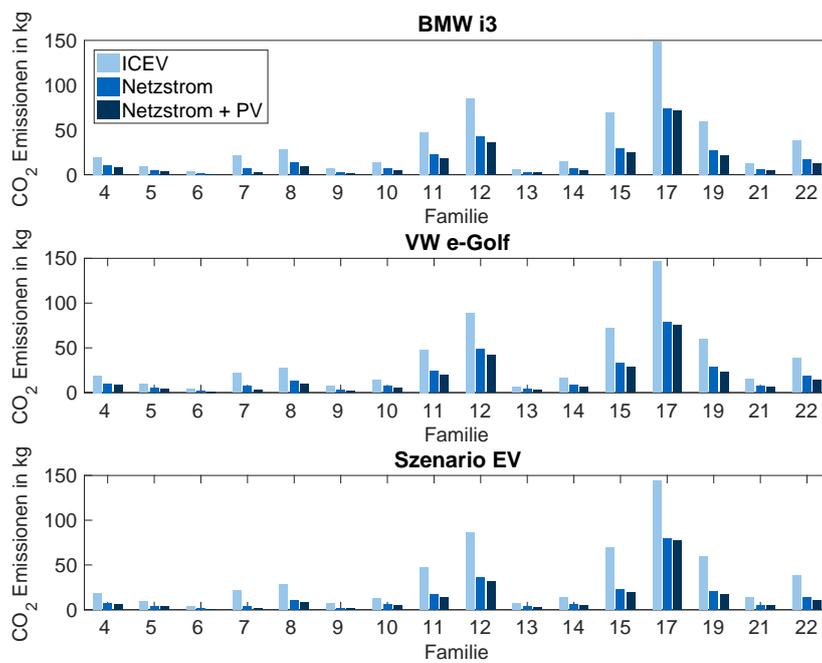


Abbildung A.3 Ladeleistung 7,4 kW

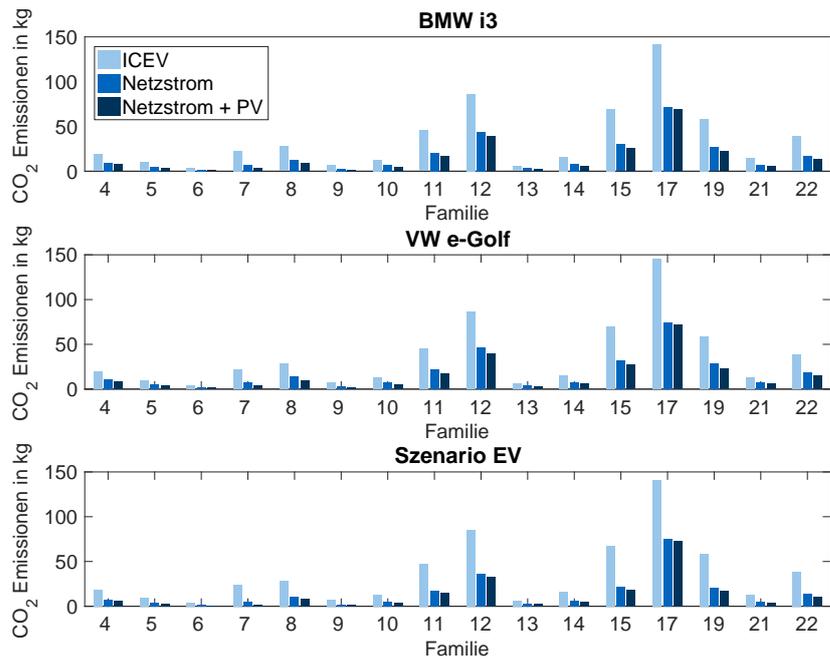


Abbildung A.4 Ladeleistung 11 kW

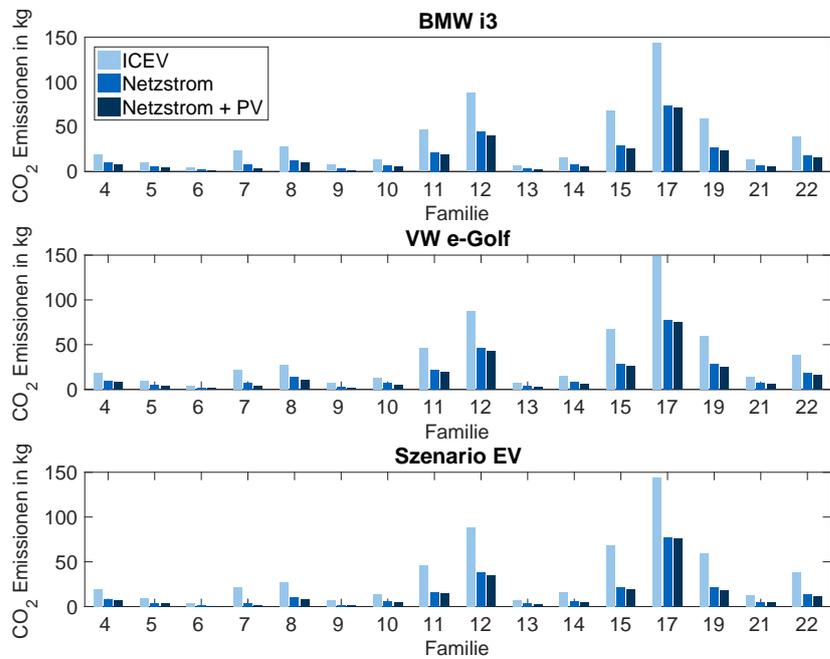


Abbildung A.5 Ladeleistung 22 kW

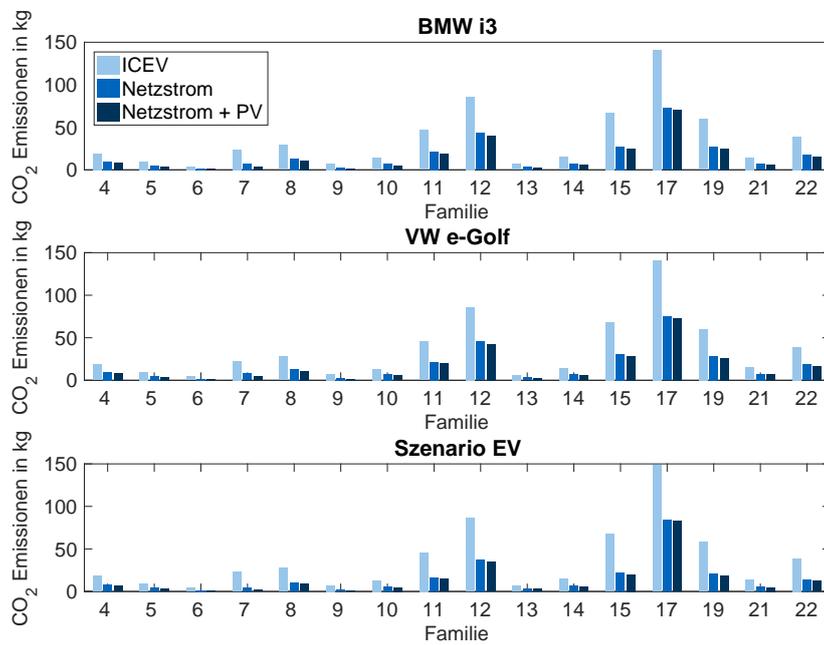


Abbildung A.6 Ladeleistung 43 kW

A.3. Prozentuale Emissionseinsparung

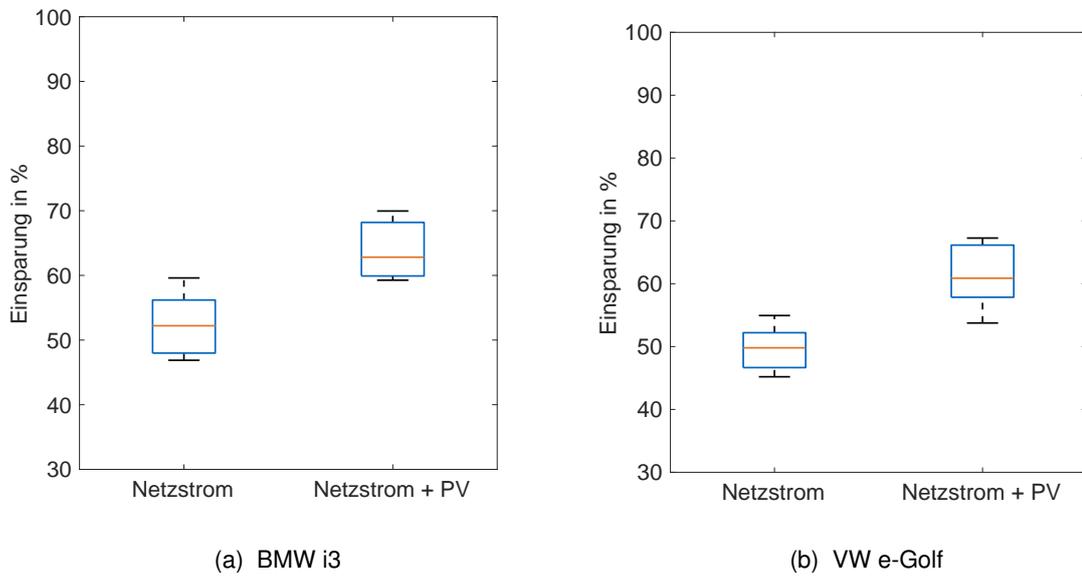


Abbildung A.7 Prozentuales Einsparpotential durch Nutzung eines BEV mit Netzstrom und PV; ohne Pufferspeicher; Ladeleistung 2.3 kW

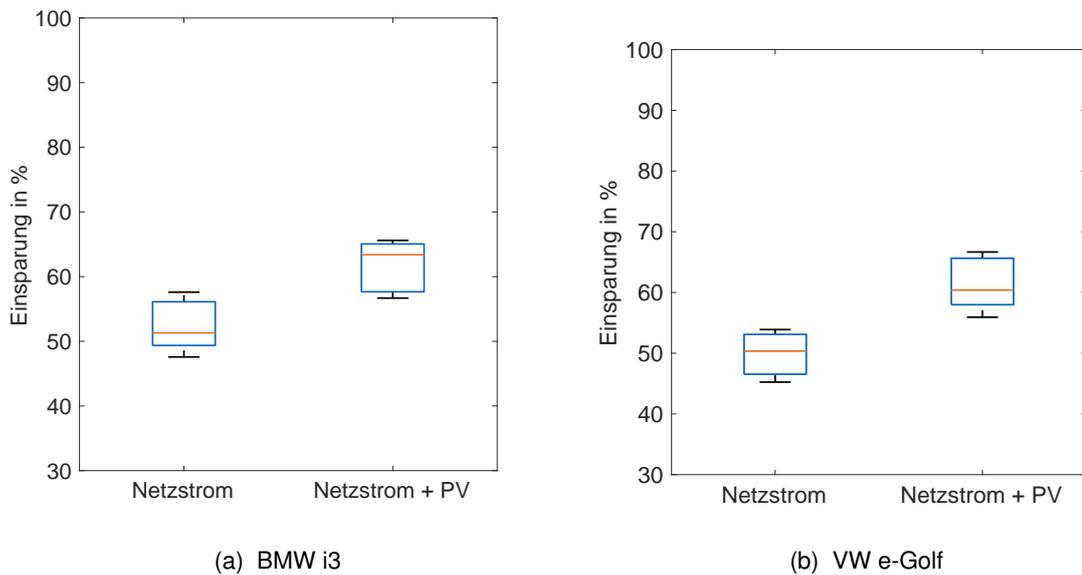
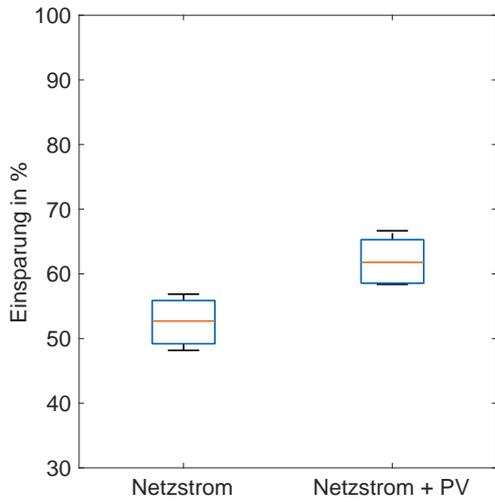
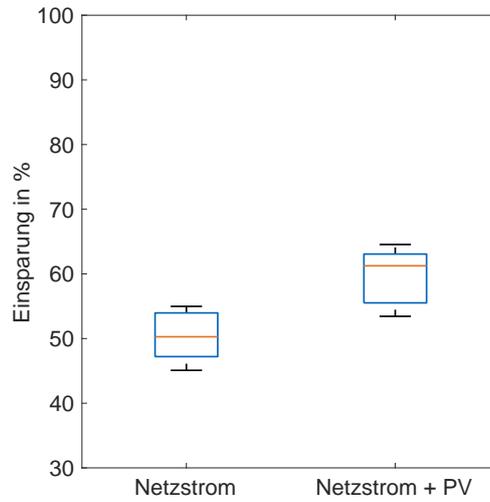


Abbildung A.8 Prozentuales Einsparpotential durch Nutzung eines BEV mit Netzstrom und PV; ohne Pufferspeicher; Ladeleistung 7.4 kW

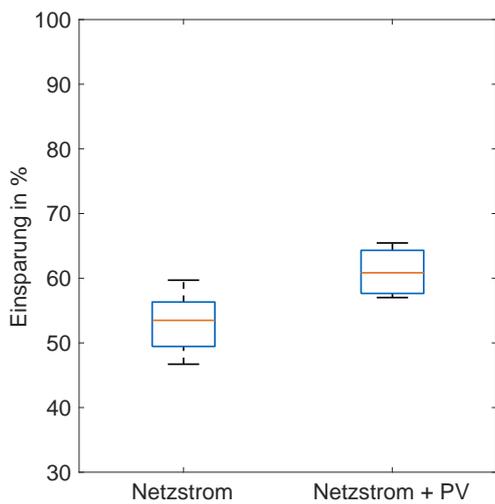


(a) BMW i3

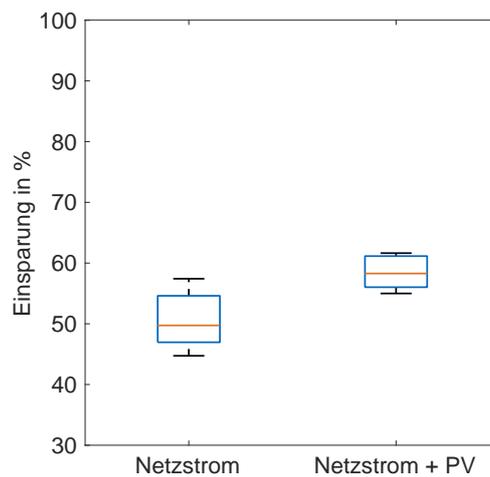


(b) VW e-Golf

Abbildung A.9 Prozentuales Einsparpotential durch Nutzung eines BEV mit Netzstrom und PV; ohne Pufferspeicher; Ladeleistung 11 kW

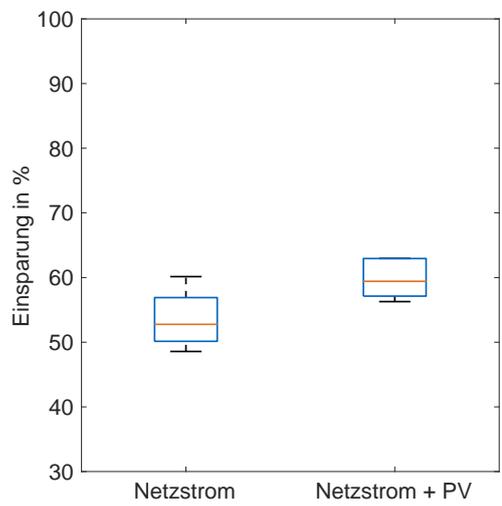


(a) BMW i3

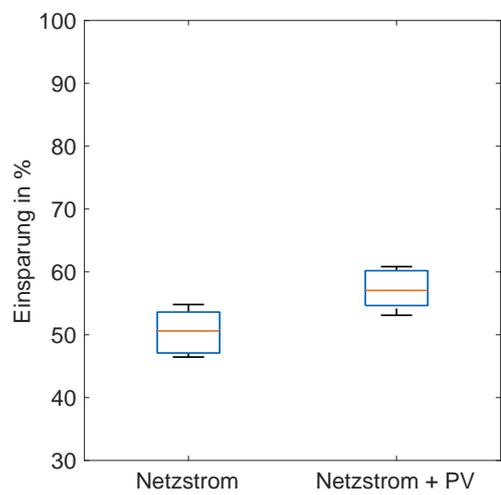


(b) VW e-Golf

Abbildung A.10 Prozentuales Einsparpotential durch Nutzung eines BEV mit Netzstrom und PV; ohne Pufferspeicher; Ladeleistung 22 kW



(a) BMW i3



(b) VW e-Golf

Abbildung A.11 Prozentuales Einsparpotential durch Nutzung eines BEV mit Netzstrom und PV; ohne Pufferspeicher; Ladeleistung 43 kW

A.4. Benötigte PV-Fläche

Tabelle A.1 Benötigte PV der Familien in m² abhängig von der Ladeleistung, wenn kein Puffer vorhanden ist

Familie	4	5	6	7	8	9	10	11
Ladeleistung 2,3 kW	65	55	40	47	59	35	50	79
Ladeleistung 3,6 kW	72	58	45	57	66	43	58	91
Ladeleistung 7,4 kW	77	59	53	69	79	53	64	88
Ladeleistung 11 kW	77	58	53	70	79	52	64	90
Ladeleistung 22 kW	79	59	52	71	81	52	65	87
Ladeleistung 43 kW	77	59	54	72	83	52	66	88

Familie	12	13	14	15	17	19	21	22
Ladeleistung 2,3 kW	68	45	51	78	74	74	52	71
Ladeleistung 3,6 kW	72	58	45	57	66	43	58	91
Ladeleistung 7,4 kW	90	57	67	92	93	92	64	90
Ladeleistung 11 kW	91	56	67	91	93	92	67	89
Ladeleistung 22 kW	91	57	67	89	93	91	68	89
Ladeleistung 43 kW	92	59	66	88	93	92	71	92

Tabelle A.2 Vorhandene und benötigte PV der Familien; Ladeleistung 3,6 kW

Familie	4	5	6	7	8	9	10	11
vorhanden in m ²	29	40	40	40	50	100	46	12
benötigt in m ²	72	58	45	57	66	43	58	91

Familie	12	13	14	15	17	19	21	22
PV in m ²	65	35	54	79	62	0	35	0
benötigt in m ²	78	55	62	91	86	84	59	80

A.5. Emissionspotential

Fahrzeugabhängige Konfigurations-Kennfelder

Auf der linken Seite sind die resultierenden optimalen Konfigurationen von PV und Pufferspeicher aus der MC der Wochenmobilitätspläne mit Ladeleistungen bis 11 kW für verschiedene Fahrzeuge dargestellt. Das 90-Perzentil der häufigsten Fahrten ist jeweils angegeben. Rechts sind die Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen gezeigt.

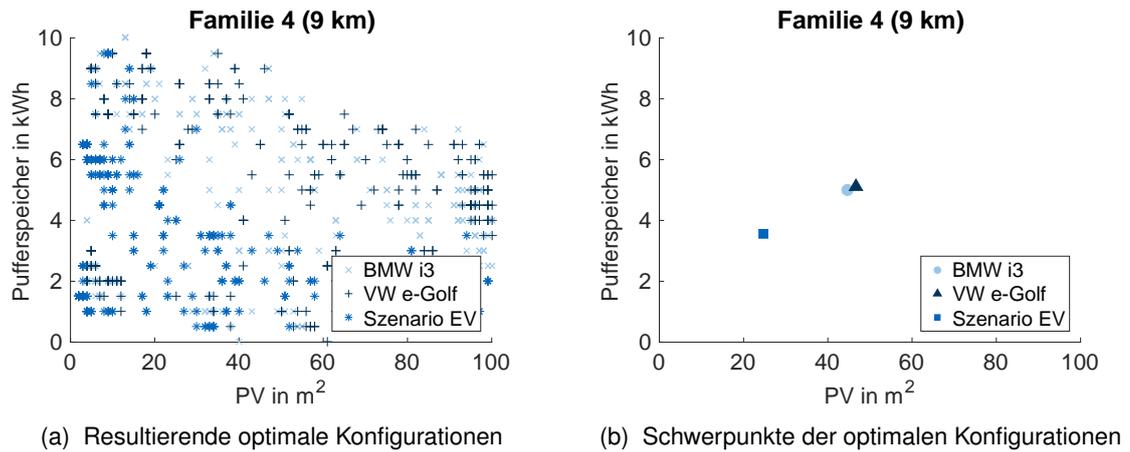


Abbildung A.12 Familie 4

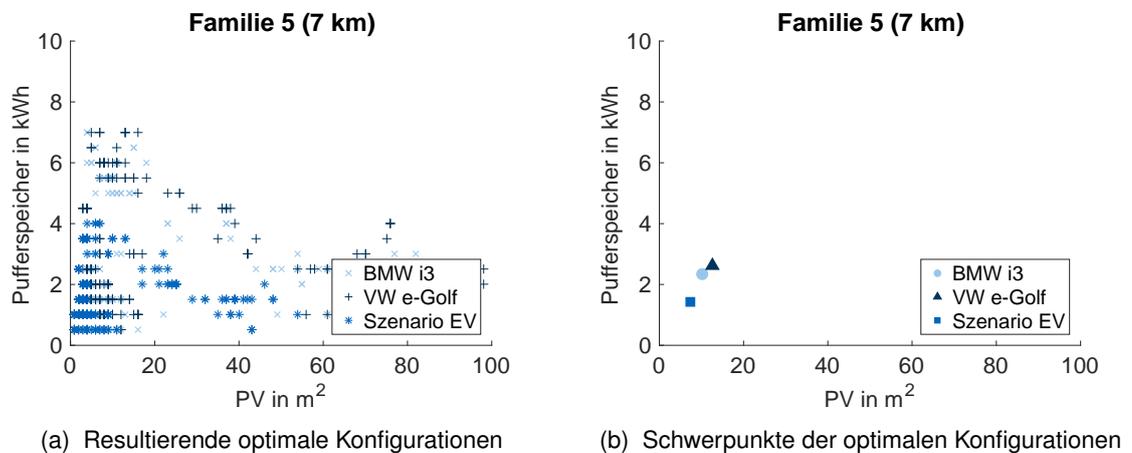
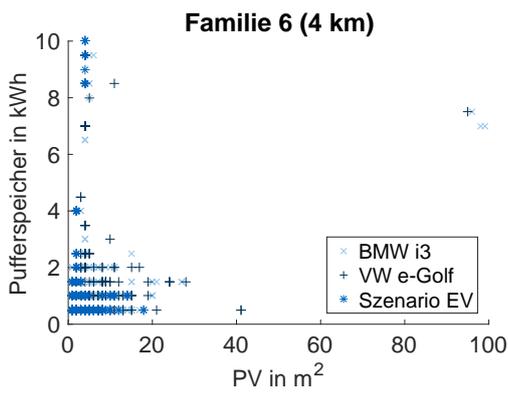
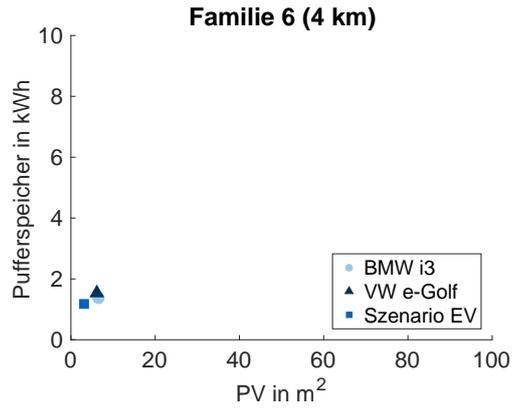


Abbildung A.13 Familie 5

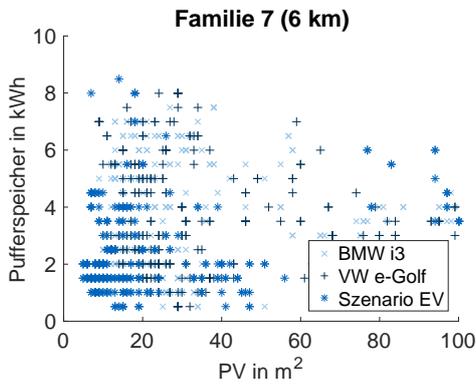


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

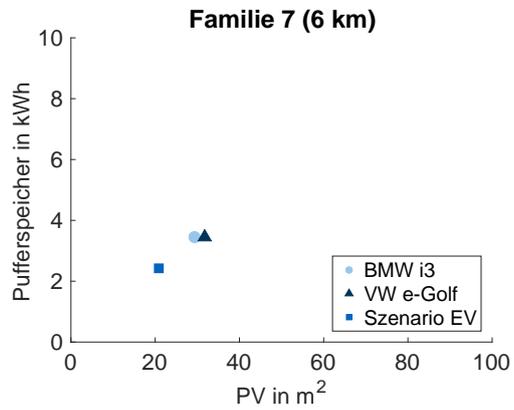


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.14 Familie 6

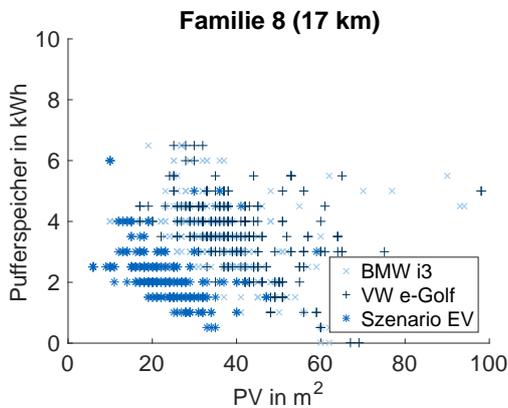


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

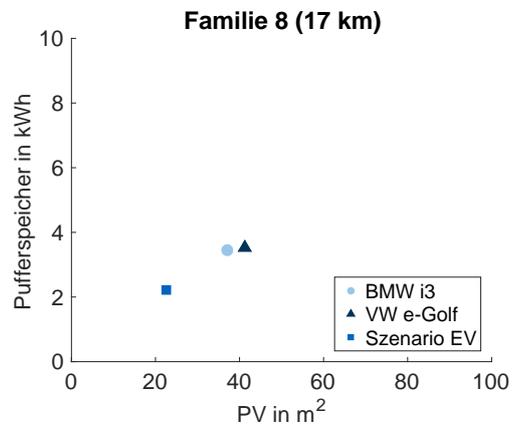


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.15 Familie 7

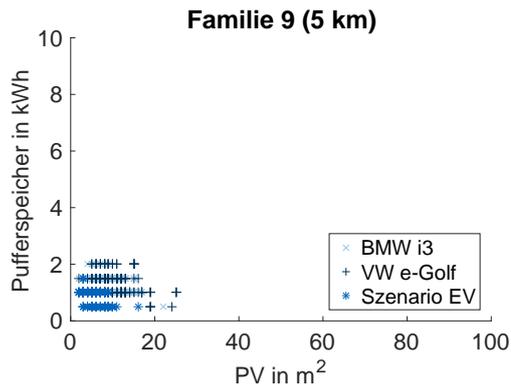


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

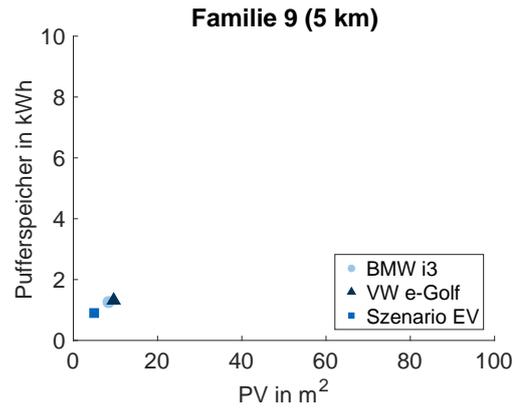


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.16 Familie 8

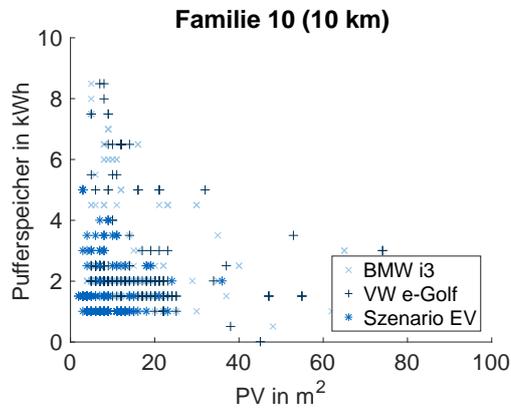


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

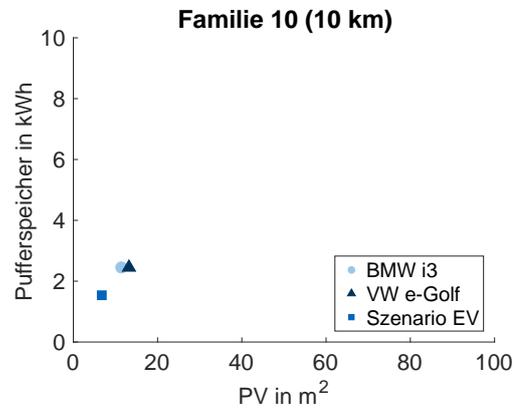


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.17 Familie 9

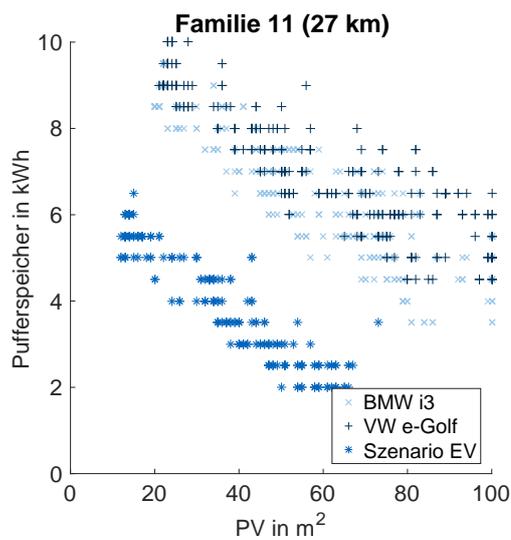


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

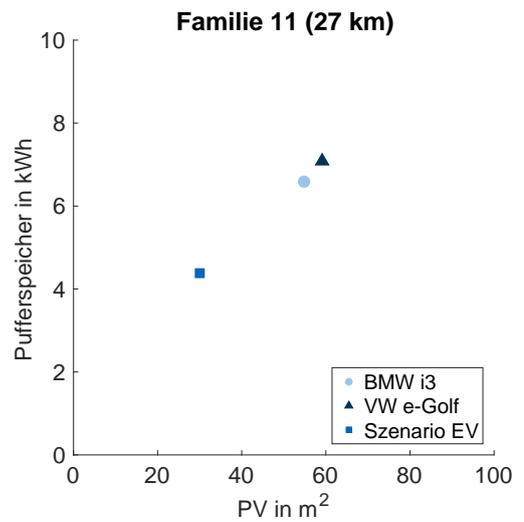


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.18 Familie 10

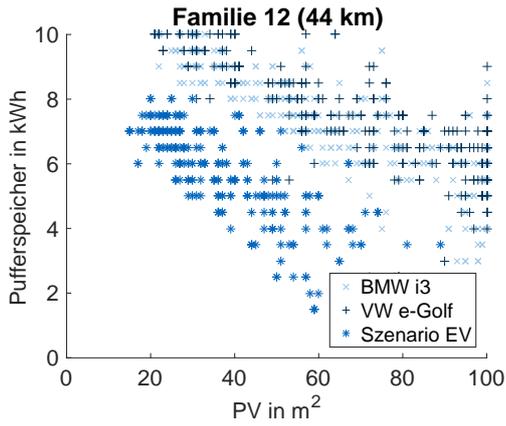


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

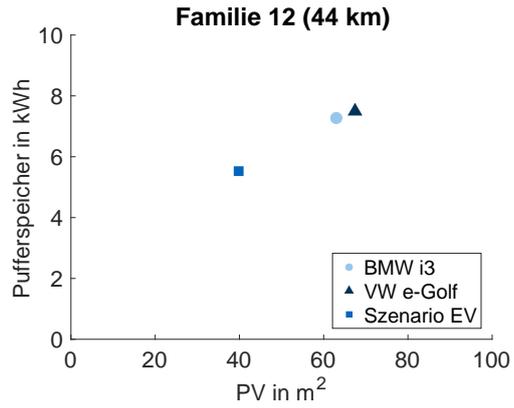


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.19 Familie 11

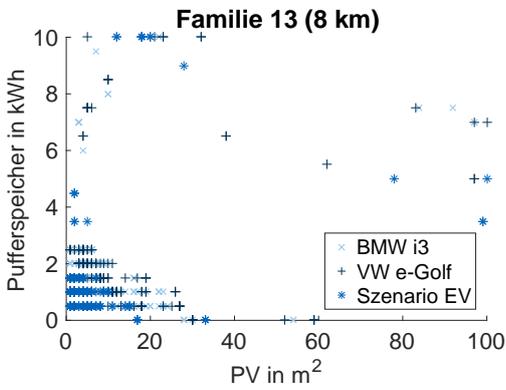


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

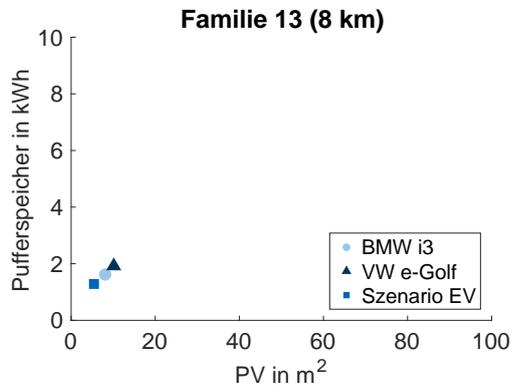


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.20 Familie 12

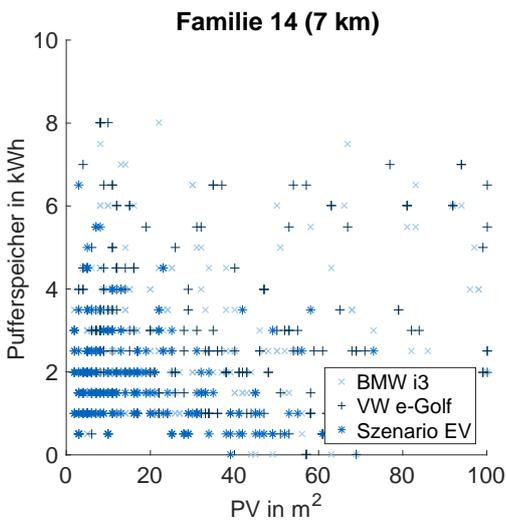


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

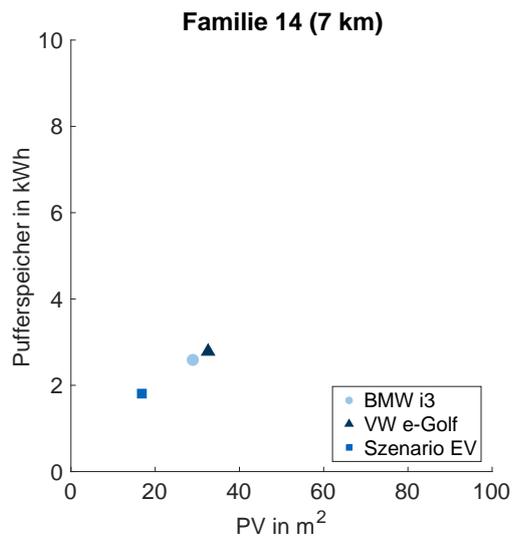


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.21 Familie 13

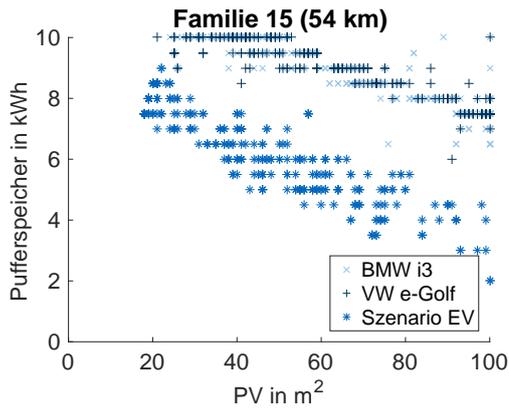


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

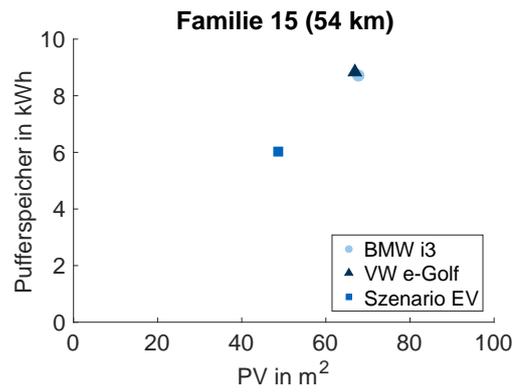


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.22 Familie 14

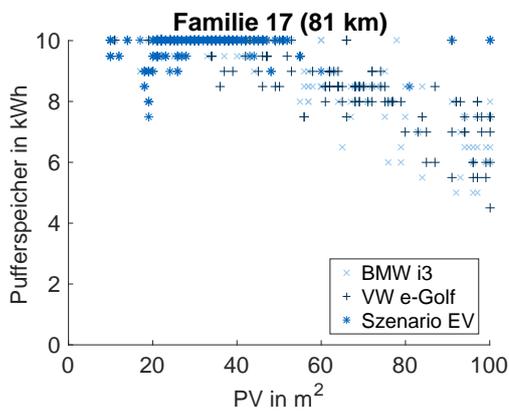


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

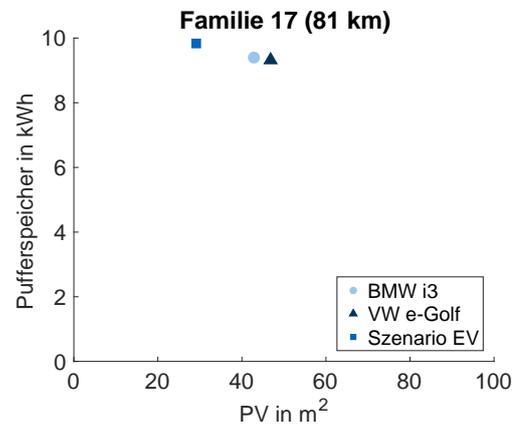


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.23 Familie 15

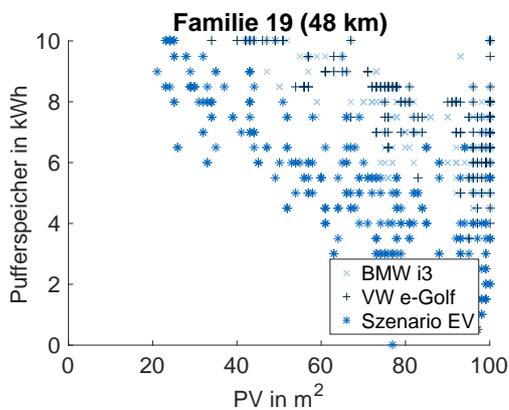


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

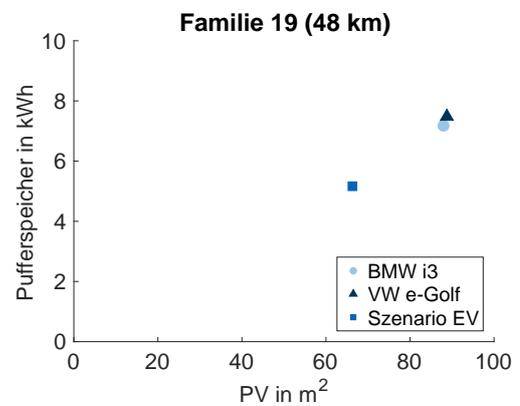


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.24 Familie 17

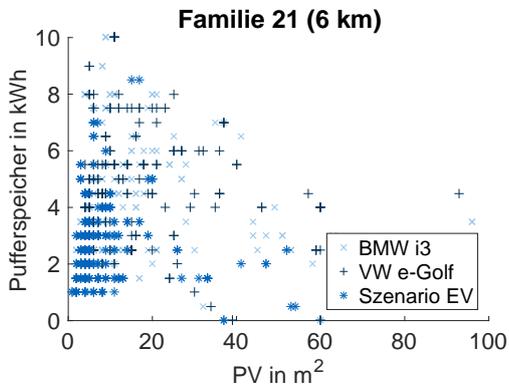


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

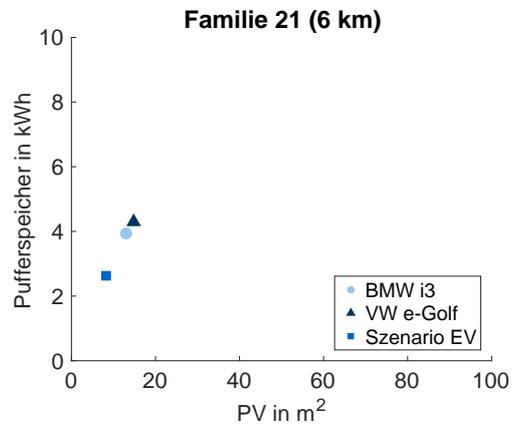


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.25 Familie 19

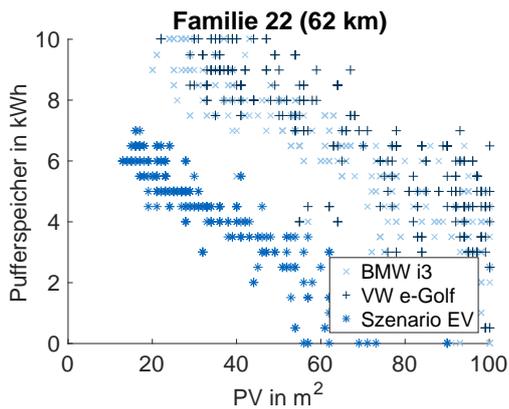


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

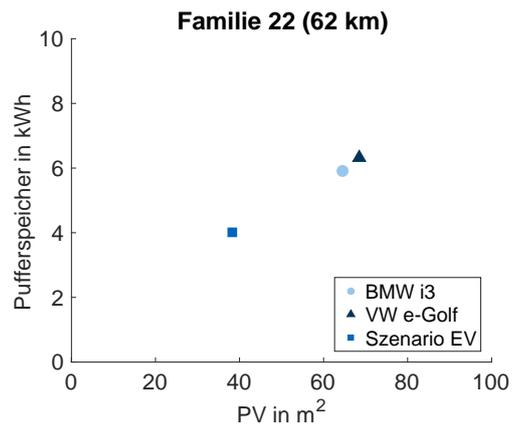


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.26 Familie 21



(a) Resultierende optimale Konfigurationen

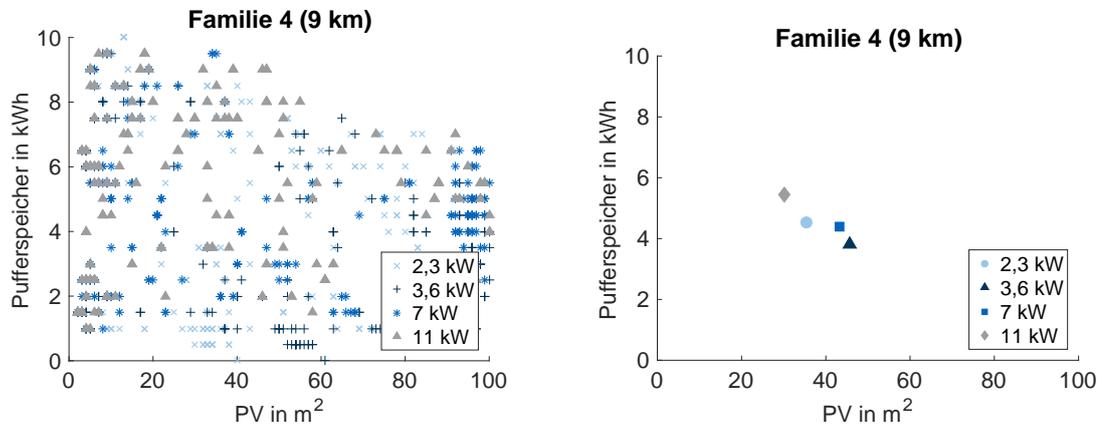


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.27 Familie 22

Ladeleistungsabhängige Konfigurations-Kennfelder

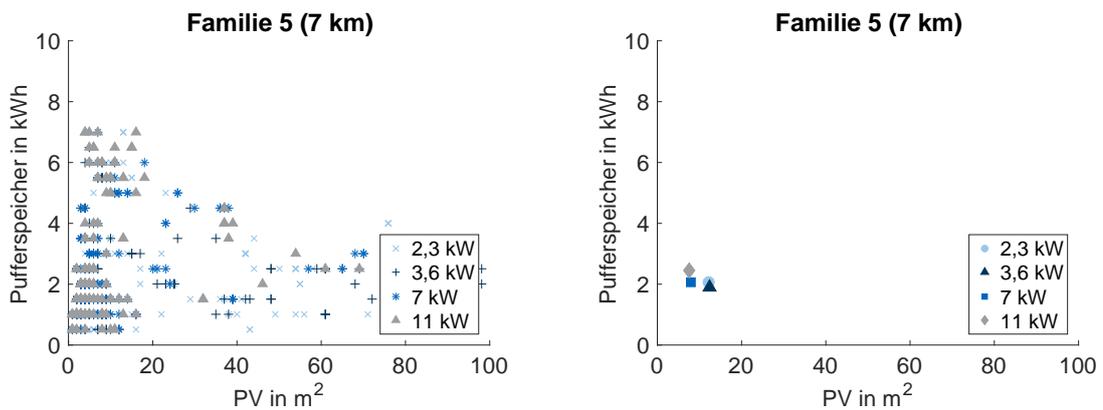
Auf der linken Seite sind die resultierenden optimalen Konfigurationen von PV und Pufferspeicher aus der MC der Wochenmobilitätspläne mit Ladeleistungen bis 11 kW dargestellt. Das 90-Perzentil der häufigsten Fahrten ist jeweils angegeben. Rechts sind die Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen gezeigt.



(a) Resultierende optimale Konfigurationen von PV und Pufferspeicher

(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

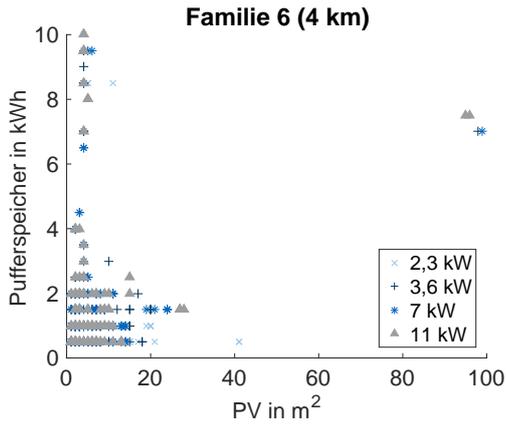
Abbildung A.28 Familie 4



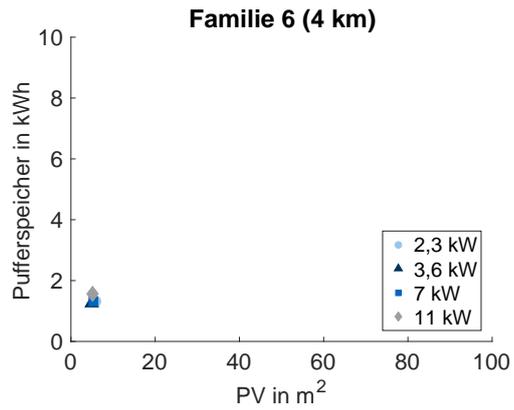
(a) Resultierende optimale Konfigurationen

(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.29 Familie 5

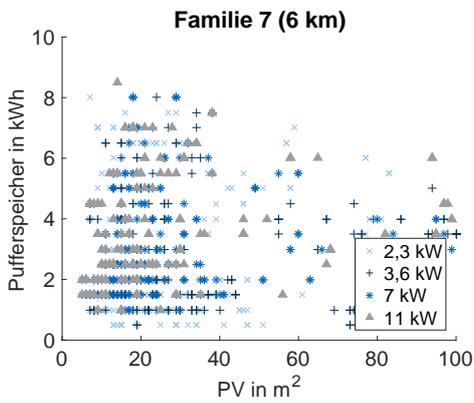


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

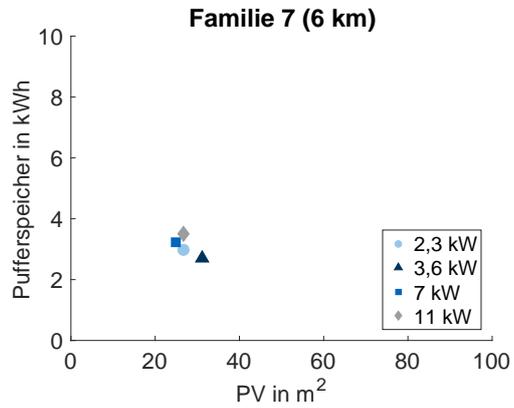


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.30 Familie 6

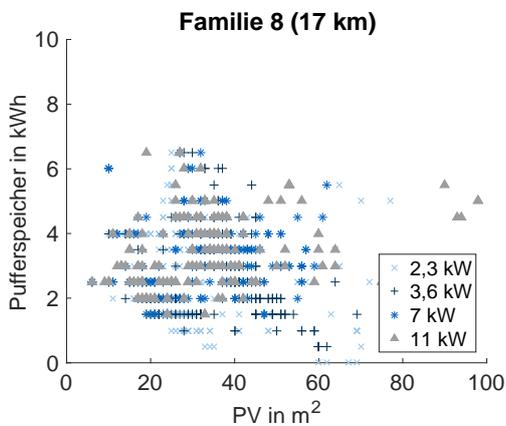


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

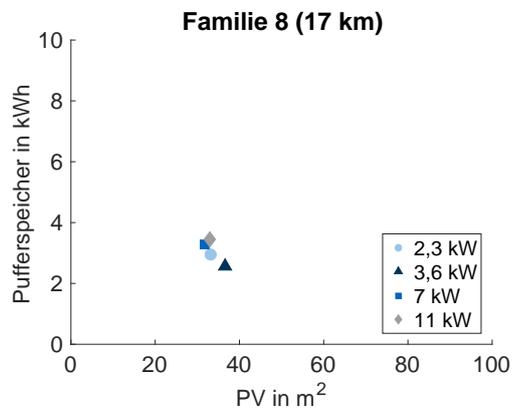


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.31 Familie 7

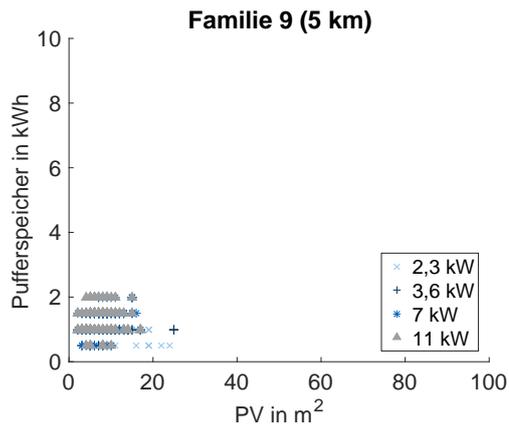


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

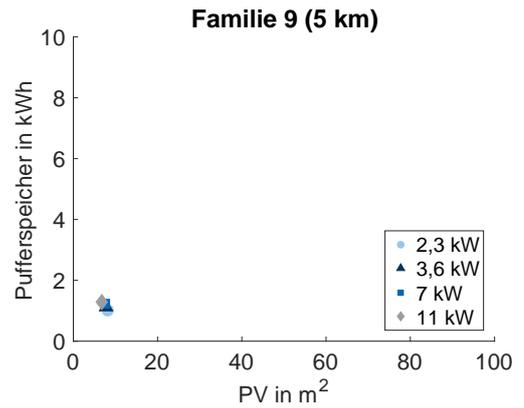


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.32 Familie 8

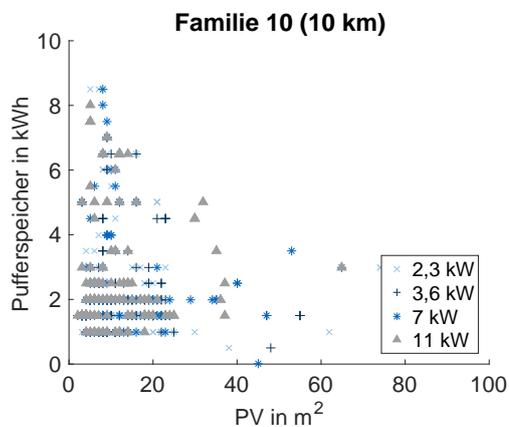


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

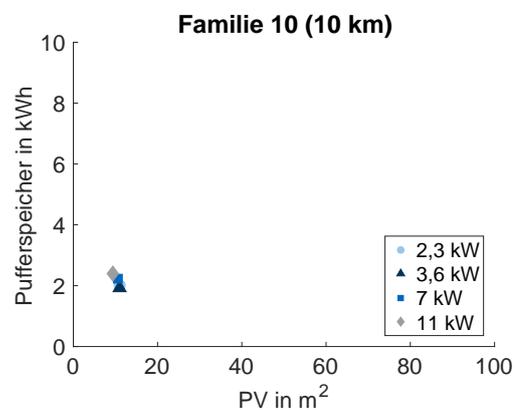


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.33 Familie 9

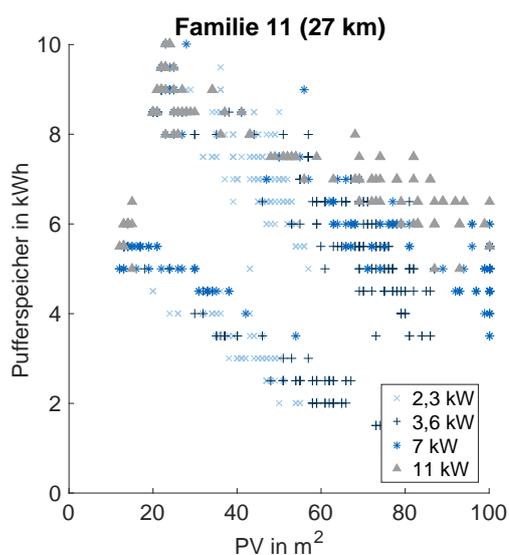


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

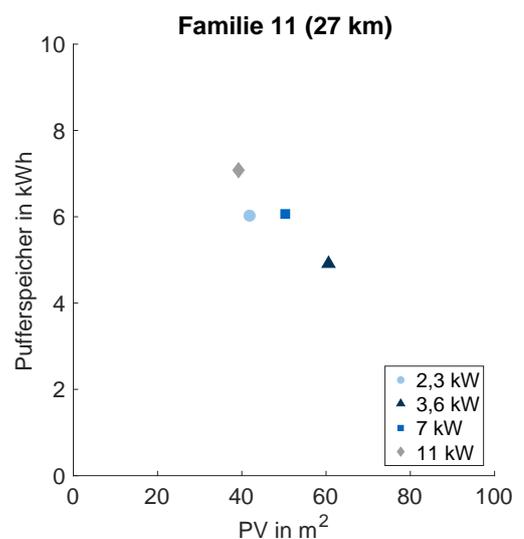


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.34 Familie 10

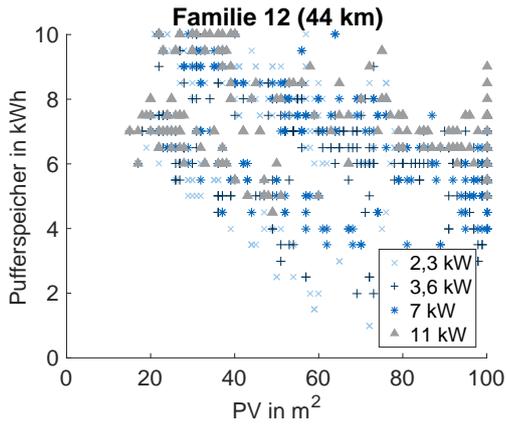


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

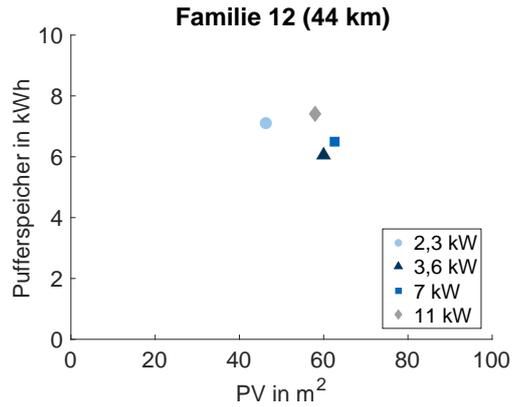


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.35 Familie 11

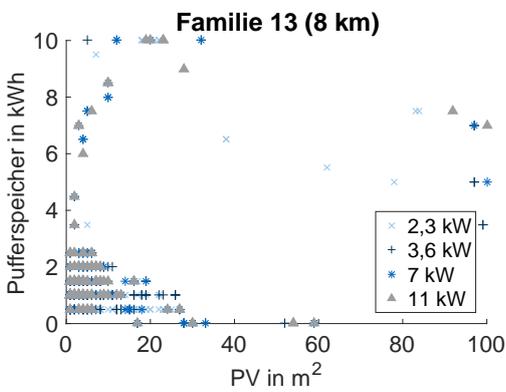


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

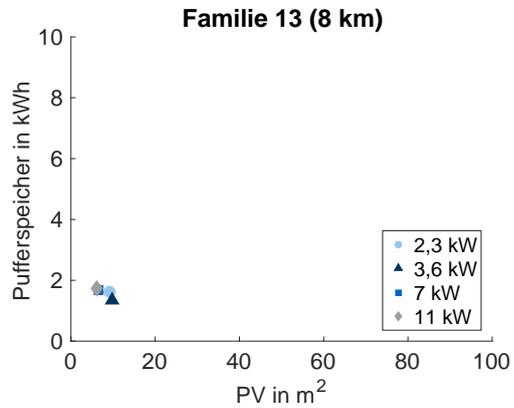


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.36 Familie 12

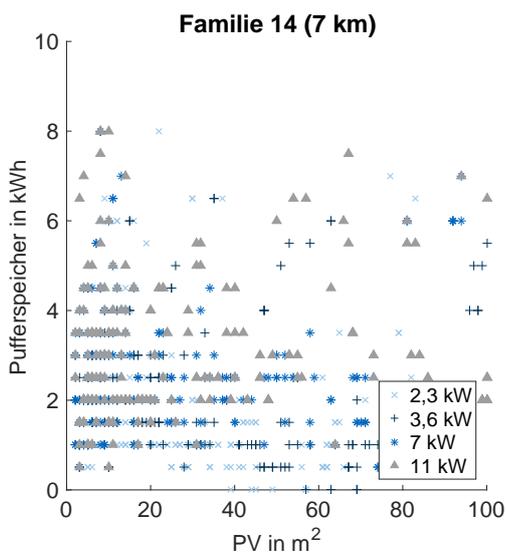


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

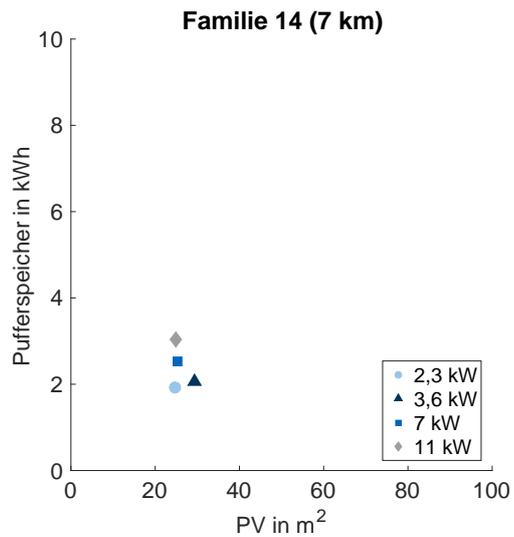


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.37 Familie 13

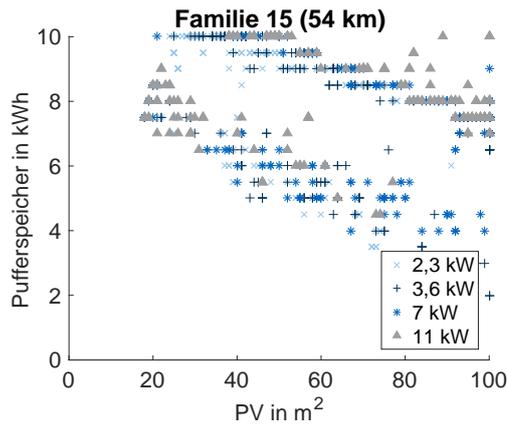


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

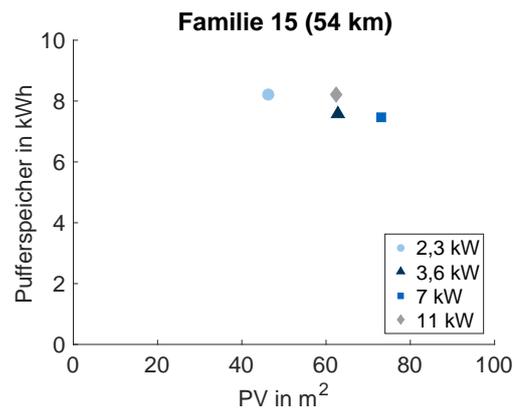


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.38 Familie 14

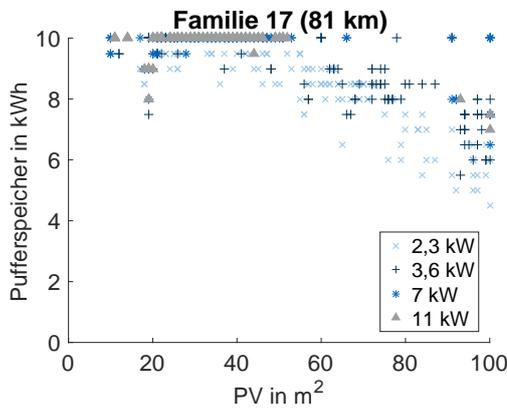


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

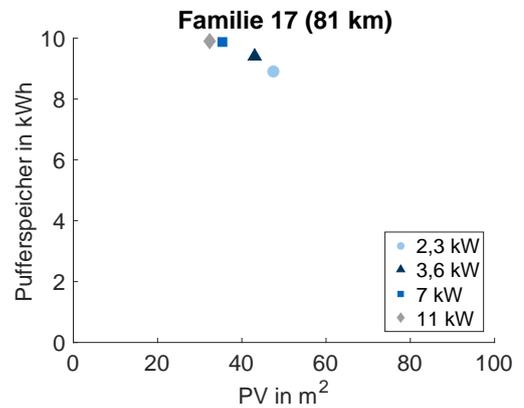


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.39 Familie 15

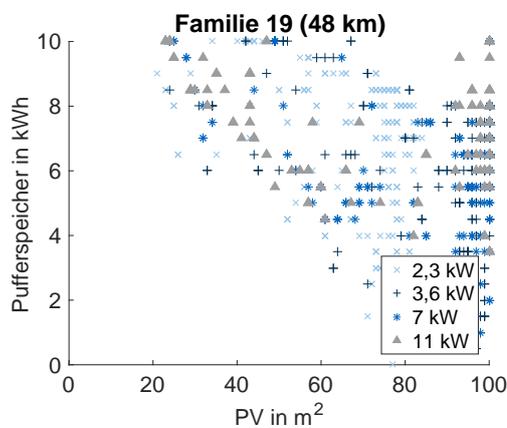


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

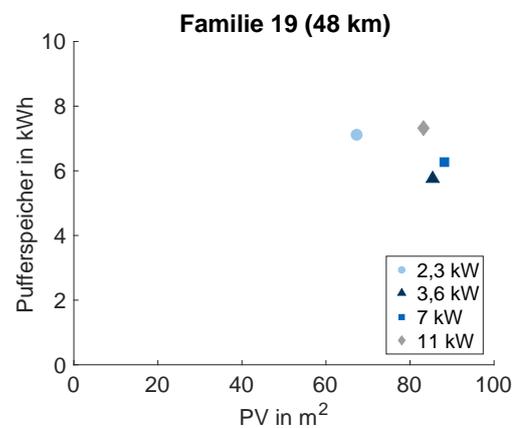


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.40 Familie 17

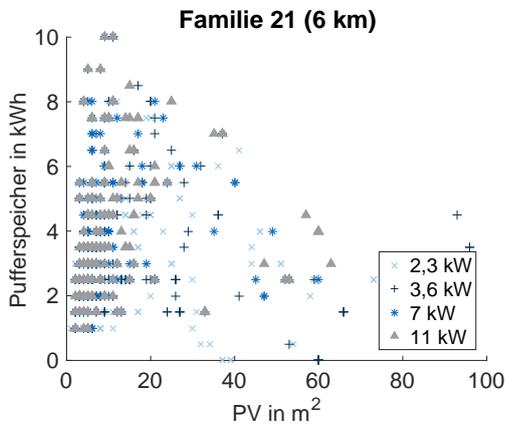


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

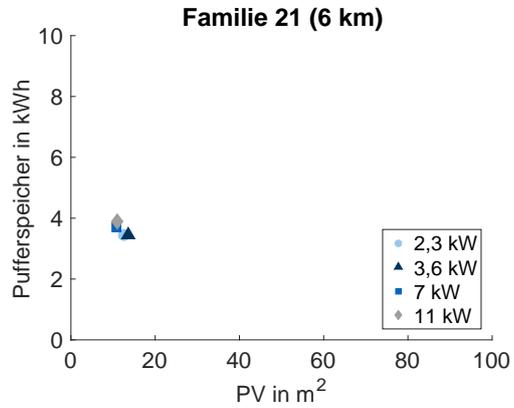


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.41 Familie 19

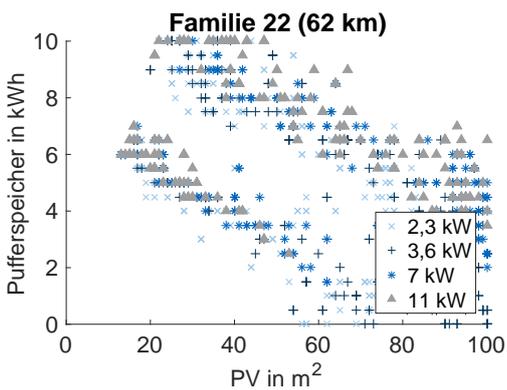


(a) Resultierende optimale Konfigurationen

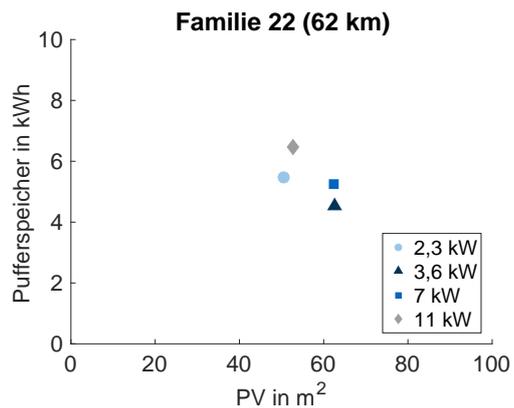


(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.42 Familie 21



(a) Resultierende optimale Konfigurationen



(b) Schwerpunkte der optimalen Konfigurationen

Abbildung A.43 Familie 22

Szenariobewertung

Es wird das Emissionspotential für alle Familien resultierend aus der MC der Wochenmobilitätspläne mit einer Ladeleistung von 3,6 kW für das Fahrzeug VW e-Golf dargestellt.

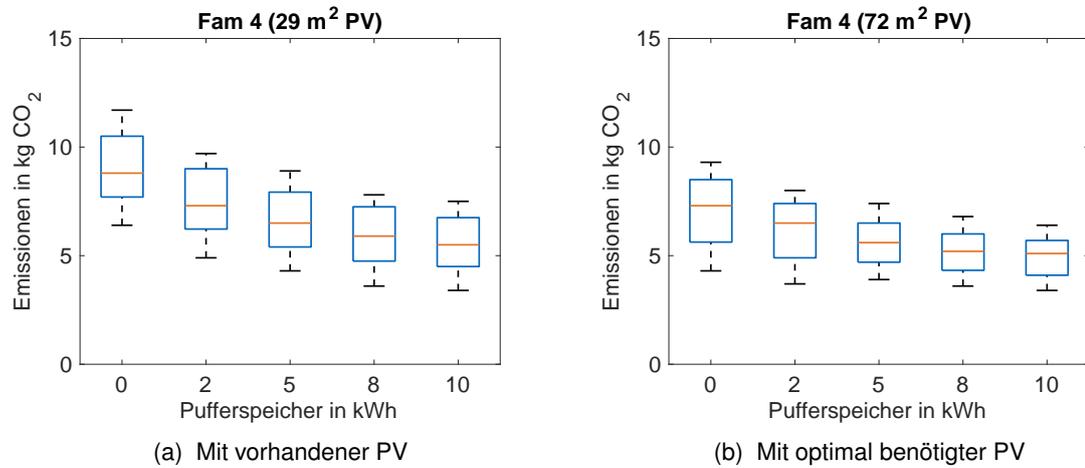


Abbildung A.44 Familie 4

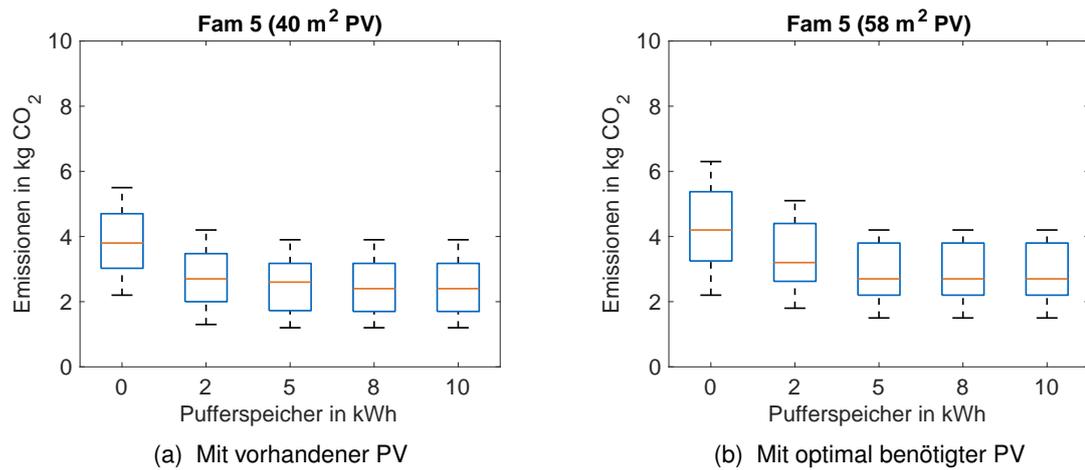


Abbildung A.45 Familie 5

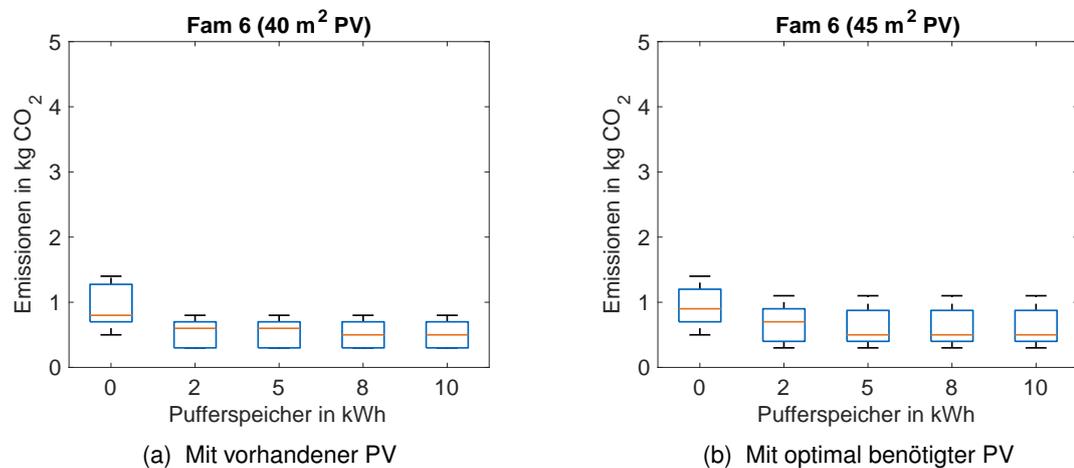
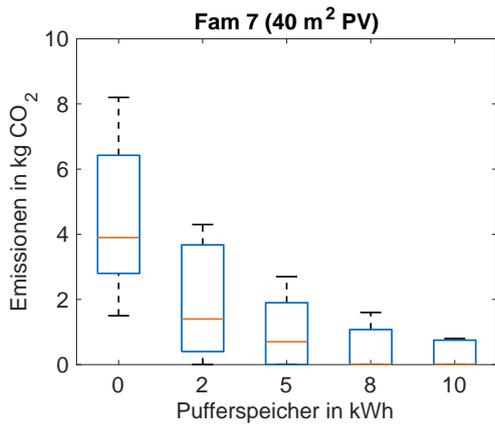
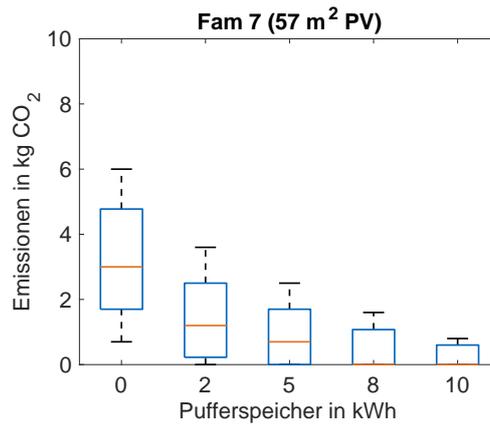


Abbildung A.46 Familie 6

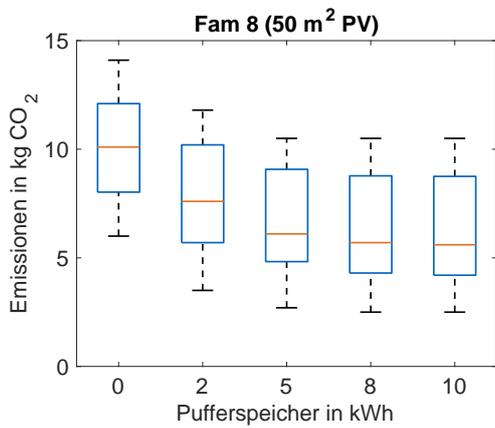


(a) Mit vorhandener PV

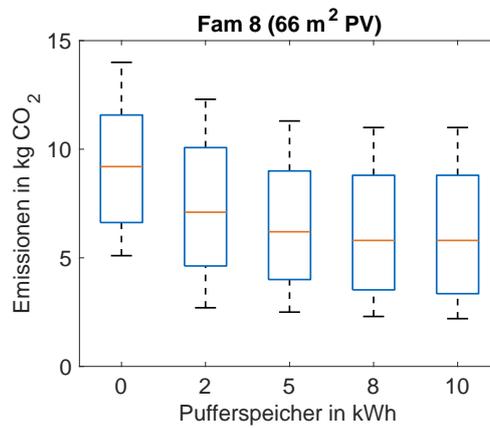


(b) Mit optimal benötigter PV

Abbildung A.47 Familie 7

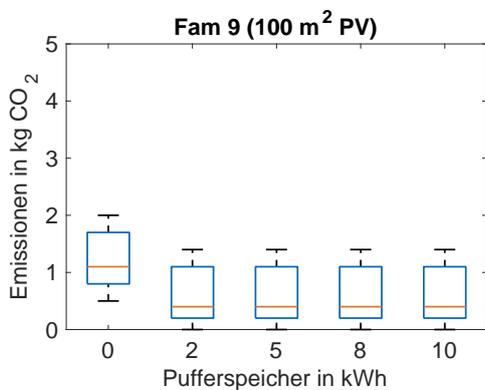


(a) Mit vorhandener PV

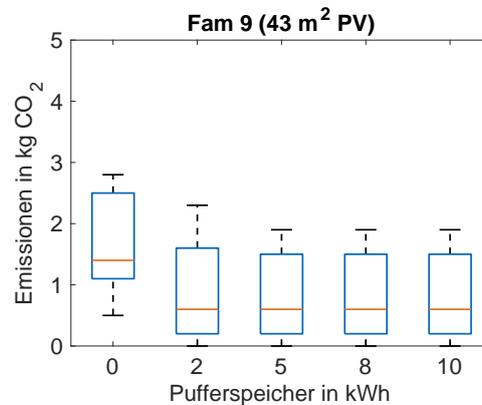


(b) Mit optimal benötigter PV

Abbildung A.48 Familie 8

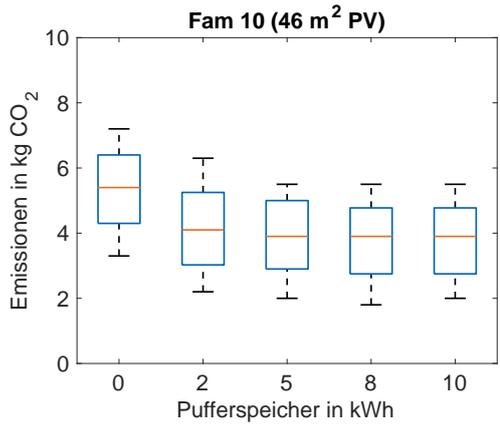


(a) Mit vorhandener PV

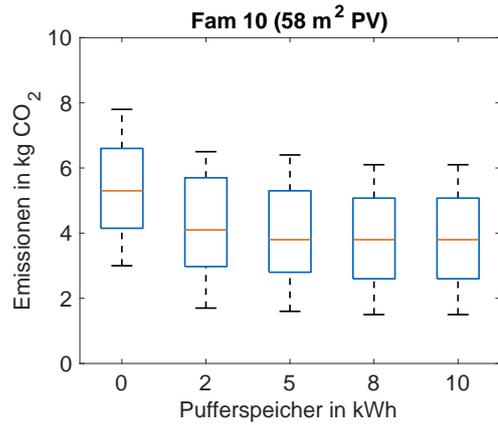


(b) Mit optimal benötigter PV

Abbildung A.49 Familie 9

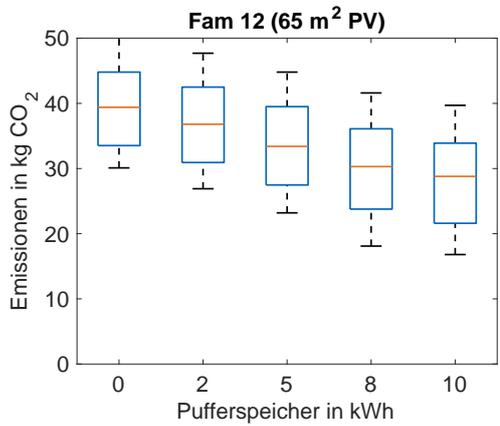


(a) Mit vorhandener PV

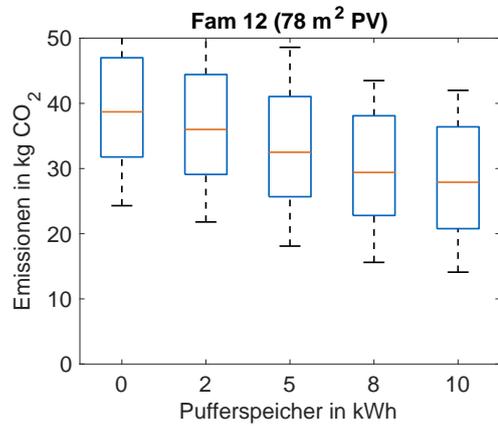


(b) Mit optimal benötigter PV

Abbildung A.50 Familie 10

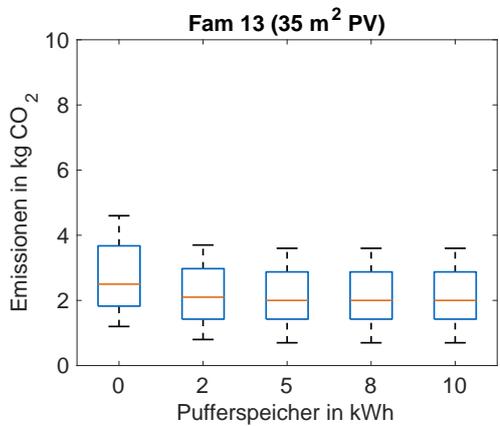


(a) Mit vorhandener PV

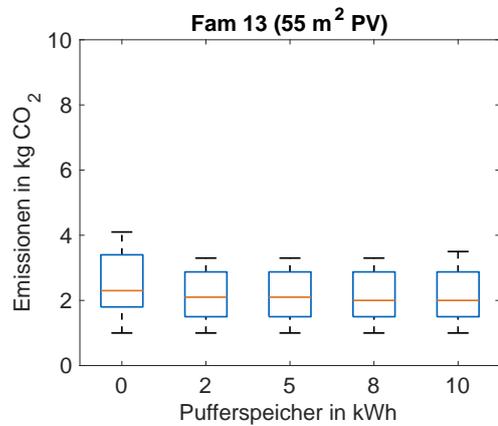


(b) Mit optimal benötigter PV

Abbildung A.51 Familie 12

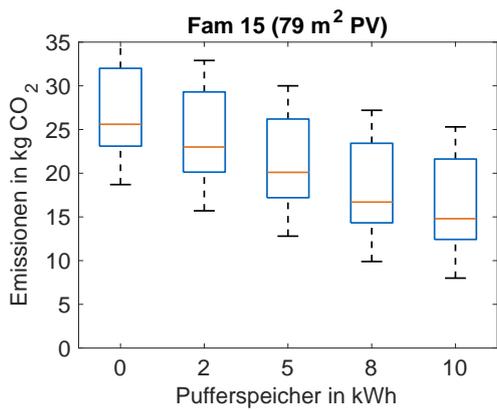


(a) Mit vorhandener PV

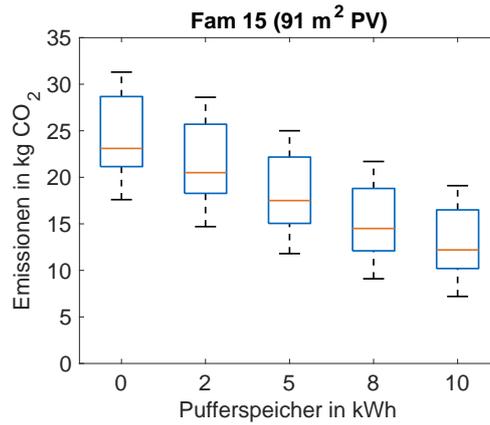


(b) Mit optimal benötigter PV

Abbildung A.52 Familie 13

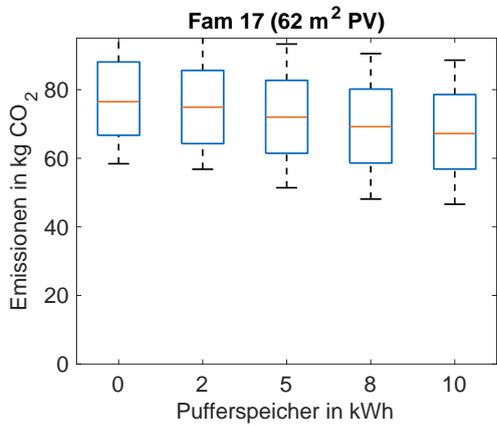


(a) Mit vorhandener PV

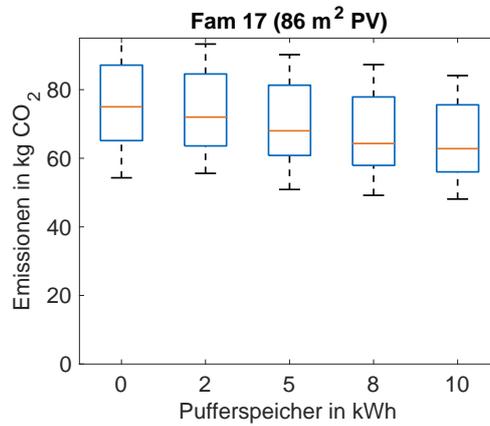


(b) Mit optimal benötigter PV

Abbildung A.53 Familie 15

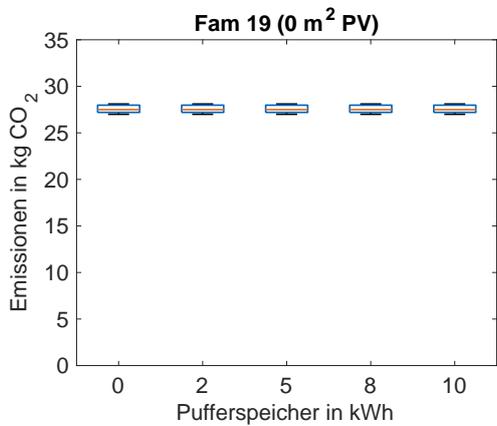


(a) Mit vorhandener PV

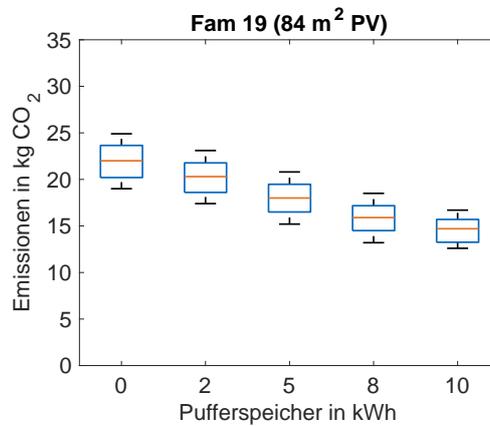


(b) Mit optimal benötigter PV

Abbildung A.54 Familie 17

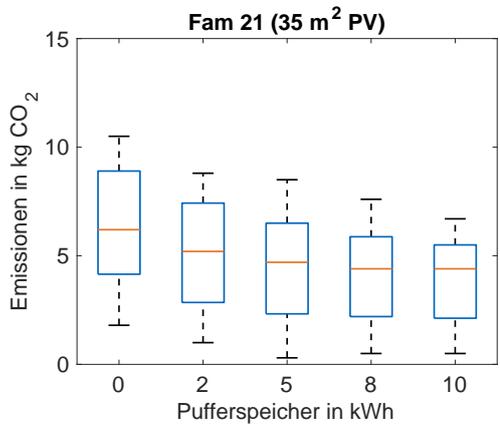


(a) Mit vorhandener PV

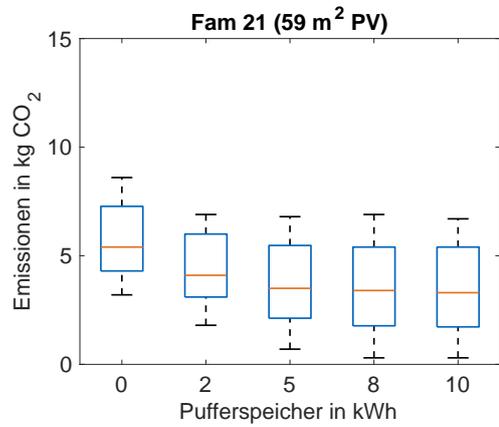


(b) Mit optimal benötigter PV

Abbildung A.55 Familie 19

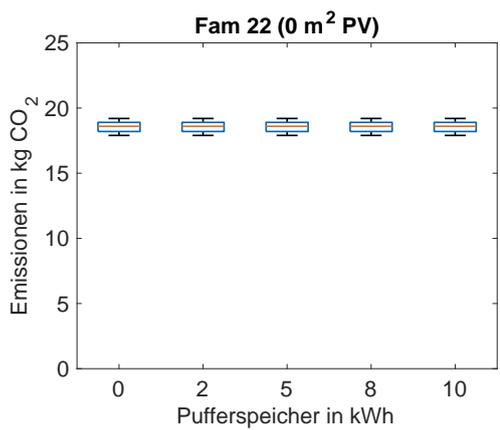


(a) Mit vorhandener PV

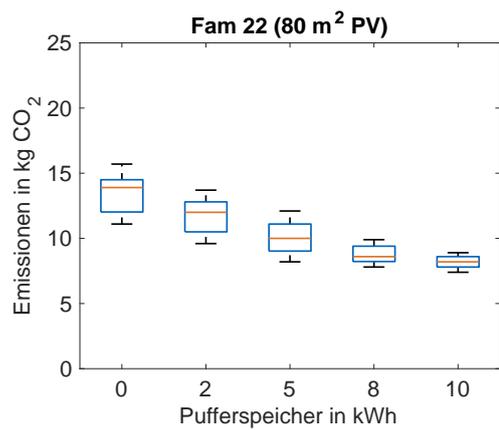


(b) Mit optimal benötigter PV

Abbildung A.56 Familie 21



(a) Mit vorhandener PV



(b) Mit optimal benötigter PV

Abbildung A.57 Familie 22

Wetterabhängigkeit

Es wird das Emissionspotential für alle Familien resultierend aus der MC der Wochenmobilitätspläne mit einer Ladeleistung von 3,6 kW und der optimal benötigten PV dargestellt. Es wird das Fahrzeug VW e-Golf betrachtet.

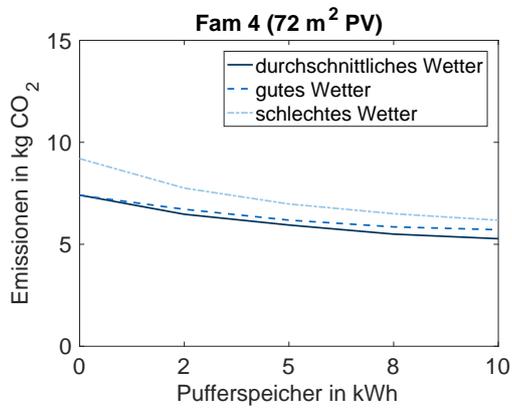


Abbildung A.58 Familie 4

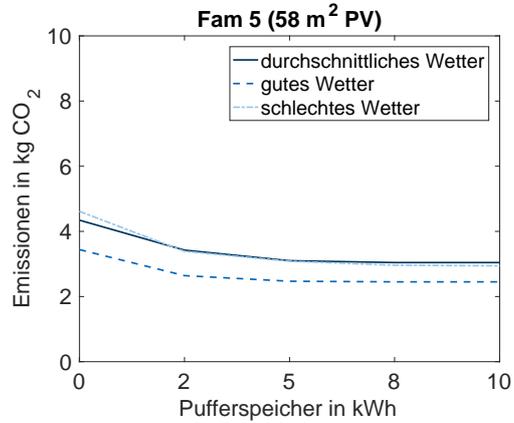


Abbildung A.59 Familie 5

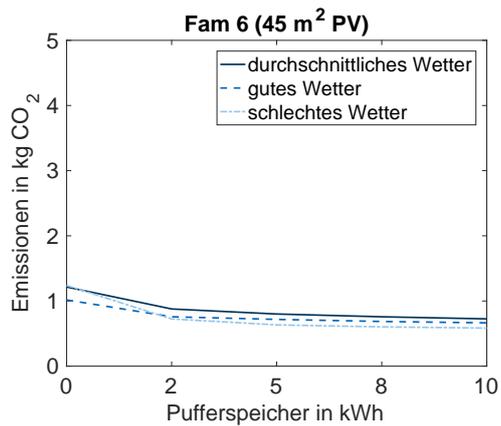


Abbildung A.60 Familie 6

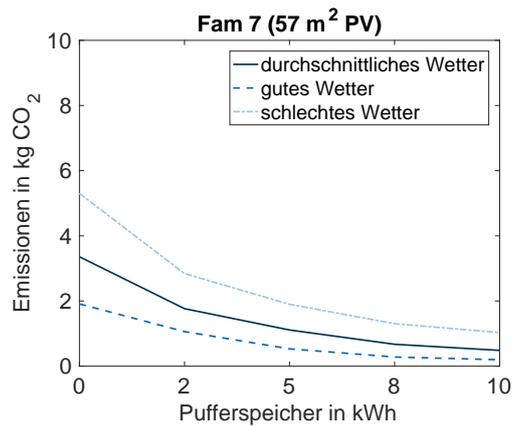


Abbildung A.61 Familie 7

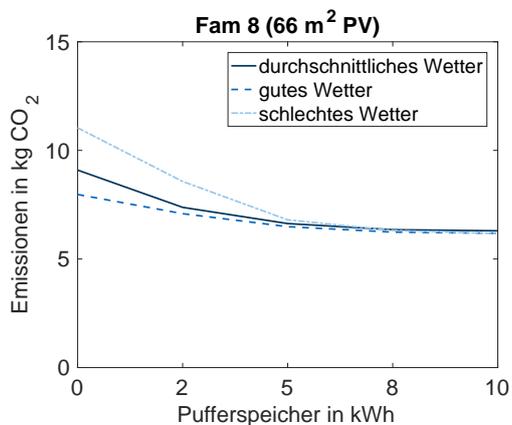


Abbildung A.62 Familie 8

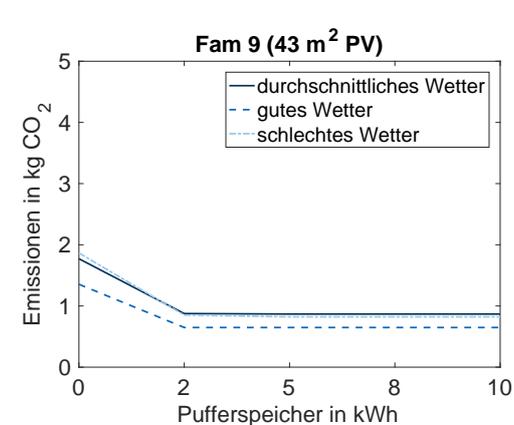


Abbildung A.63 Familie 9

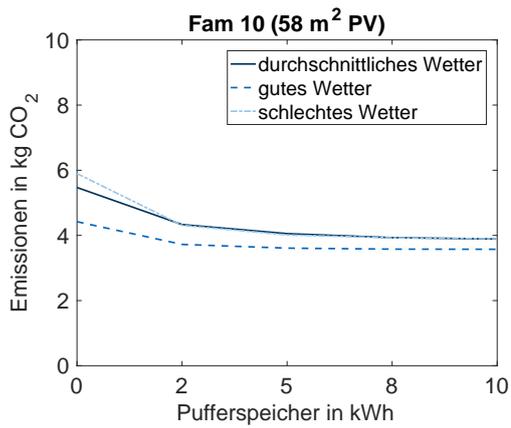


Abbildung A.64 Familie 10

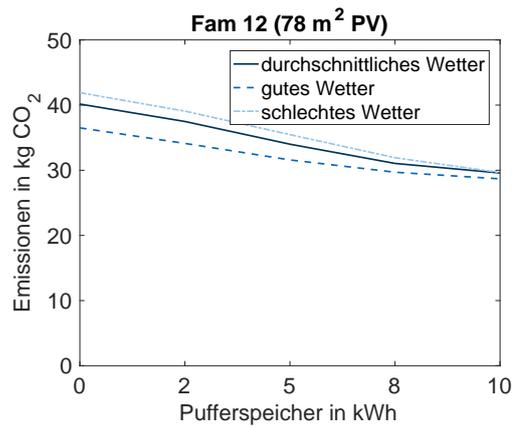


Abbildung A.65 Familie 12

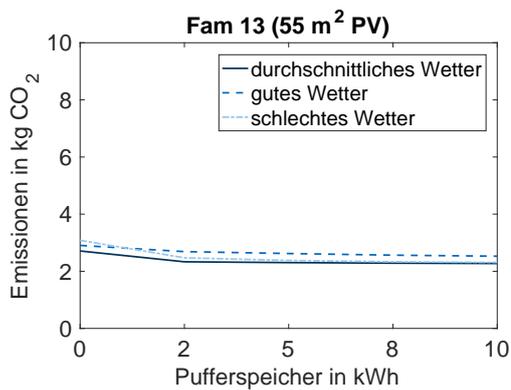


Abbildung A.66 Familie 13

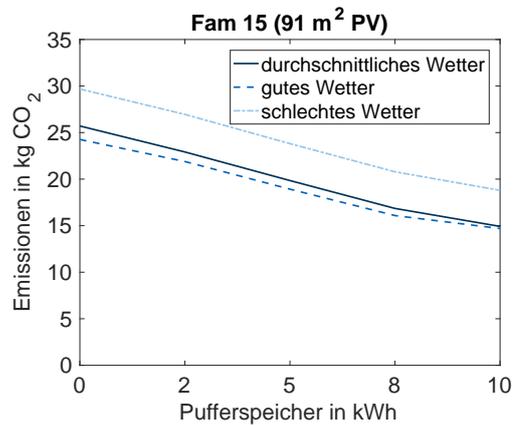


Abbildung A.67 Familie 15

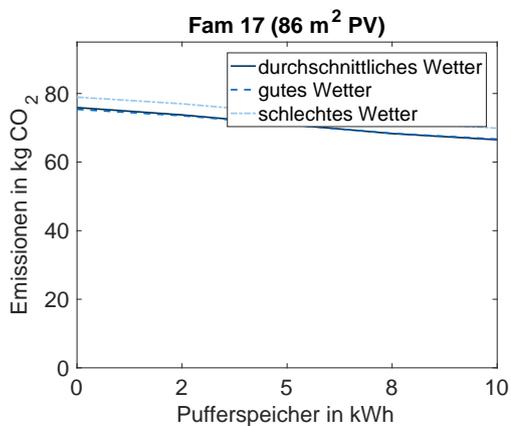


Abbildung A.68 Familie 17

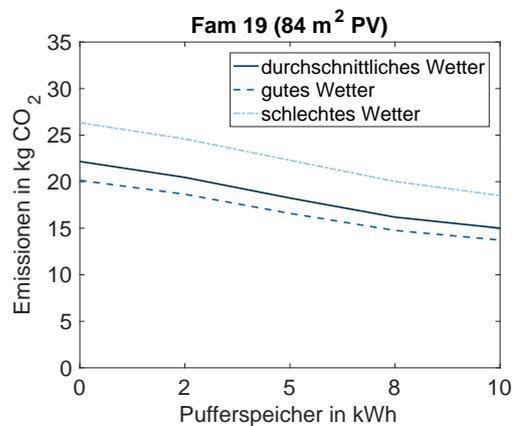


Abbildung A.69 Familie 19

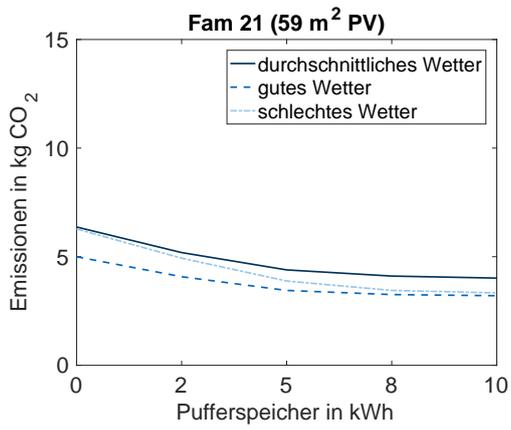


Abbildung A.70 Familie 21

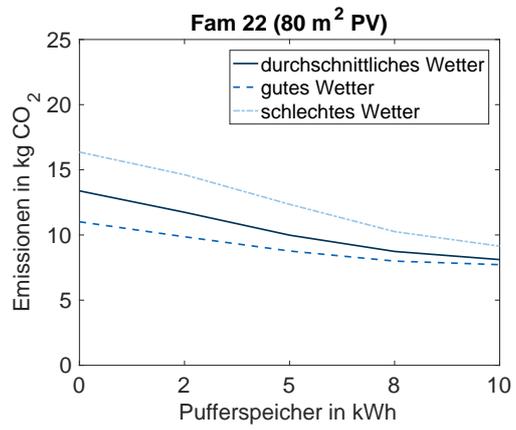


Abbildung A.71 Familie 22

A.6. Kostenanalyse

Es werden die Szenario-Kosten für Neuanschaffung der optimalen Haustechnik-Installationen für die jeweiligen Familien gezeigt.

Tabelle A.3 Notwendige mittlere Kosten in € für optimale PV-Pufferspeicher-Kombination für alle Familien; Fahrzeug VW e-Golf, Ladeleistung 3,6 kW

Familie	4	5	6	7	8	9	10	11
Szenario 1A	12004	4643	2650	8015	9157	2780	4382	16187
Szenario 2B	6006	2265	1221	4038	4719	1364	2138	8145
Szenario 3C	3845	1438	761	2591	3048	868	1358	5223
Familie	12	13	14	15	17	19	21	22
Szenario 1A	17377	3666	7991	18911	17696	19961	6800	15681
Szenario 2B	8723	1794	4145	9193	8446	10191	3169	8022
Szenario 3C	5589	1141	2683	5831	5325	6565	1982	5171